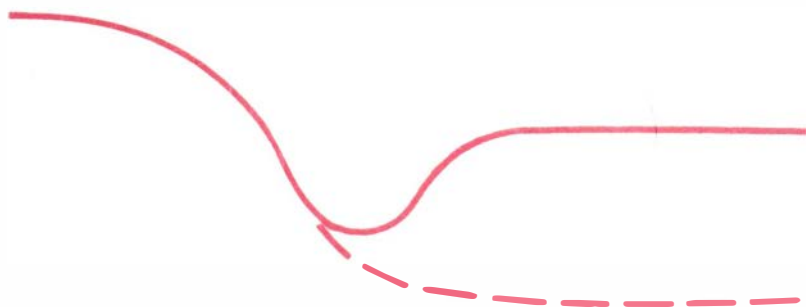


АЛЬБОМ
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
КРИВЫХ
ЭЛЕКТРО -
МАГНИТНОГО
КАРОТАЖНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ



НОВОСИБИРСК - 1983

*Всех
П.В. Билин
Учен.
совет
и др.*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

АЛЬБОМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ КАРОТАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

8. август 1983
Н.И. Иванова

НОВОСИБИРСК 1983

Альбом теоретических кривых каротажного электромагнитного зондирования / Составители: Ю.Н. Антонов, С.С. Жмаев. Изд. ИГиГ СО АН СССР. Новосибирск, 1983. 190 с.

В альбоме содержатся результаты математического моделирования гармонических, электромагнитных полей, возбуждение и измерение которых выполняется магнитными диполями, ориентированными своими осями вдоль оси скважины (цилиндрически-слоистые модели среды) или ортогонально границам пластов (модели пластов без проникновения, профилирование пластов и др.). Все материалы альбома по неоднородным средам представлены для изопараметрических зондов, примененных в макетах аппаратуры высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) и опробованных в скважинах, бурящихся на нефть. Приведены каротажные диаграммы, полученные в нефтяных скважинах Западной Сибири аппаратурой ВИКИЗ, а также палетки для геофизической интерпретации.

Альбом предназначен для геологов и геофизиков, а также научных и инженерно-технических работников-специалистов в области промысловой геофизики.

С о с т а в и т е л и :

канд. геол.-мин. наук Ю.А. Антонов, С.С. Жмаев

Р е ц е н з е н т ы :

канд. физ.-мат. наук Л.А. Табаровский
(Институт геологии и геофизики СО АН СССР),
канд. геол.-мин. наук Ю.Л. Брылкин
(СНИИГТИМС Мингео СССР)

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

В альбоме содержатся результаты расчетов различных характеристик электромагнитного поля, возбуждаемого магнитным диполем, в котором электрический ток изменяется по гармоническому закону. Измерение компонент поля осуществляется либо одним, либо парой магнитных диполей, разнесенных на расстояние, значительно меньшее, чем расстояние до первичного источника поля. Оси всех магнитных диполей ориентированы в пространстве так, что они совпадают с прямой линией. Такая система датчиков образует трехэлементный каротажный зонд, который при моделировании цилиндрических-слоистых сред ориентирован вдоль оси скважины, а при профилировании пластов - ортогонально границам пластов.

Все материалы альбома по неоднородным средам представлены для геометрически и электродинамически подобных (изопараметрических) зондов. Такие зонды применены в аппаратуре высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) для изучения разрезов скважин, бурящихся на нефть.

Для примеров приведены каротажные диаграммы, полученные в нефтяных скважинах Западной Сибири аппаратурой ВИКИЗ, а также палетки для геофизической интерпретации.

I. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Исследование различных характеристик электромагнитного поля проведено в зависимости от обобщенных безразмерных величин

$$\rho = Z \sqrt{\frac{\gamma \mu \omega}{2}}, \quad \chi = Z \gamma \sqrt{\frac{\mu}{4\epsilon}}, \quad \beta = \frac{\omega \epsilon}{\gamma} \quad \text{и} \quad \rho^2 \beta = \omega^2 \mu \epsilon Z^2 / 2.$$

Эти величины определяются такими параметрами среды, как электропроводность (γ), магнитная проницаемость (μ) и диэлектрическая проницаемость (ϵ), а также размерами установок (Z)^{*} и частотой возбуждаемого электромагнитного поля ($f = \omega / 2\pi$).

В однородной среде выражение для поля на оси магнитного диполя с моментом M имеет следующий вид:

$$H_z = M / 2\pi Z^3 [e^{-\kappa Z} (1 + \kappa Z)],$$

$$\text{где} \quad \kappa^2 = -\omega^2 \epsilon \mu - i \gamma \mu \omega = -(\alpha + i\beta)^2.$$

* Z - максимальный размер трехэлементного зонда.

Действительную и мнимую части коэффициента распространения электромагнитного поля K можно представить в следующих трех видах.

Первый вид -

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma \mu \omega}{2}} \cdot \sqrt{1 + \beta^2} + \beta,$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\gamma \mu \omega}{2}} \cdot \sqrt{1 + \beta^2} - \beta.$$

Здесь, при $\beta \rightarrow 0^*$, выражение $\sqrt{\gamma \mu \omega / 2}$ известно как величина, обратная глубине проникновения поля в проводящей среде: $\delta = \sqrt{2 / \gamma \mu \omega}$ (скин-слой). Оно характеризует затухание поля. Например, при $\beta \ll 1$ и $Z = \delta$, в точку размещения измерительного диполя проникает только 37% энергии поля, поглощаемой в проводящей среде. При $Z = 2\pi\delta = \lambda$, (λ - длина волны в проводящей среде) проникает только 0,186% энергии поля.

Второй вид -

$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + (1/\beta)^2} + 1 \right]},$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + (1/\beta)^2} - 1 \right]}.$$

Такое представление компонент волнового числа K позволяет рассматривать произведение $\omega \sqrt{\epsilon \mu}$ ($\beta \gg 1$) как величину, обратную длине электромагнитной волны в непроводящей среде, поскольку $\lambda = 2\pi c / \omega = 2\pi / \omega \sqrt{\epsilon \mu}$.

Здесь c - скорость распространения волны в вакууме.

И, наконец, третий вид следующий:

$$\alpha = \frac{\gamma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{2\beta(\sqrt{\beta^2 + 1} + \beta)},$$

$$\beta = \frac{\gamma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{2\beta(\sqrt{\beta^2 + 1} - \beta)}.$$

Здесь $\frac{\gamma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{1}{Z_0}$ - величина, обратная характеристической длине среды. При этом под характеристической длиной понимается такое расстояние от источника поля до точки измерения, при котором приведенное расстояние $X = Z / Z_0 = 1$. Величина Z_0 имеет раз-

* Условие, когда токи проводимости значительно превышают токи смещения.

верность длины и определяется только электрическими характеристиками среды.

Следовательно, обобщенные параметры являются физически ясными величинами, с помощью которых упрощается анализ различных характеристик поля.

В данном разделе в соответствии с формулой (I) приведены графики зависимости именно от обобщенных параметров для следующих характеристик электромагнитного поля:

- модуля относительной амплитуды магнитного поля

$$|h_z| = H_z/H_0 = e^{-\beta z} \sqrt{(1+\beta Z)^2 + a^2 Z^2} ; \quad (2)$$

- ее фазы

$$\varphi = aZ - \arctg \frac{aZ}{1+\beta Z} , \quad (3)$$

- активной компоненты

$$J_{mh} = |h| \cdot \sin \varphi , \quad (4)$$

- реактивной компоненты

$$Reh = |h| \cdot \cos \varphi , \quad (5)$$

- а также измеряемых и интерпретируемых в методах электромагнитного каротажного зондирования таких характеристик, как разность фаз

$$\Delta \varphi = \varphi(Z_1) - \varphi(Z_2) , \quad (6)$$

- разность амплитуд

$$|\Delta h| = |h(Z_1) - h(Z_2)| = \quad (7)$$

$$= \sqrt{(h_1 \sin \varphi_1 - h_2 \sin \varphi_2)^2 + (h_1 \cos \varphi_1 - h_2 \cos \varphi_2)^2} , \quad (8)$$

- отношение амплитуд

$$\frac{|\Delta h|}{|h(Z_1)|} = \frac{|h(Z_1) - h(Z_2)|}{h(Z_1)}$$

и

$$\frac{|\Delta h|}{|h(Z_2)|} = \frac{|h(Z_1) - h(Z_2)|}{|h(Z_2)|} . \quad (9)$$

Зондовые установки изопараметрического зондирования для измерения характеристик поля (6) + (9) состоят из двух измерительных катушек, отстоящих друг от друга на расстоянии $\Delta Z = 0,32l$, где l — расстояние между генераторной и наиболее удаленной измерительной катушкой в трехэлементном зонде.

На рис. 1-12 все вышеприведенные характеристики поля даны в двух различных зависимостях от безразмерных параметров, а именно: β и $\rho^2\beta$, β и χ . При этом шифром кривых является параметр ρ . Такое дублирование для одной и той же характеристики облегчает анализ, позволяя рассматривать численные обозначения графиков, зависимиыми только от длин зондов, либо электропроводности среды в функции изменений диэлектрической проницаемости, поскольку ось абсцисс обозначается соответственно либо $\omega\epsilon/\tau$, либо $\omega^2\mu\epsilon\frac{Z^2}{2}$.

На поле графиков некоторых рисунков нанесены штриховые линии, которыми поле кривых делится на две области: с большим (правее кривой) и меньшим (левее кривой) вкладом диэлектрической проницаемости среды в соответствующую характеристику поля, чем это указано в обозначении рассматриваемой штриховой линии.

На рис. 13, а, б, в представлена амплитуда $|h_2|$ в функции приведенной частоты β для различных значений приведенного расстояния χ . Точки на координатных сетках рисунков соответствуют общей координате ($h_2 = 10^{-2}$ и $\beta = 10^0$) и при совмещении рисунков этими точками поле графиков расширяется в область меньших значений h_2 и больших величин $\omega\epsilon/\tau$. Графики на рис. 13, б, и 13, в особенно показательны тем, что имеют четкий минимум интенсивности поля для частоты, близкой к характеристической $f = \frac{1}{2\pi} \frac{\tau}{\epsilon}$.

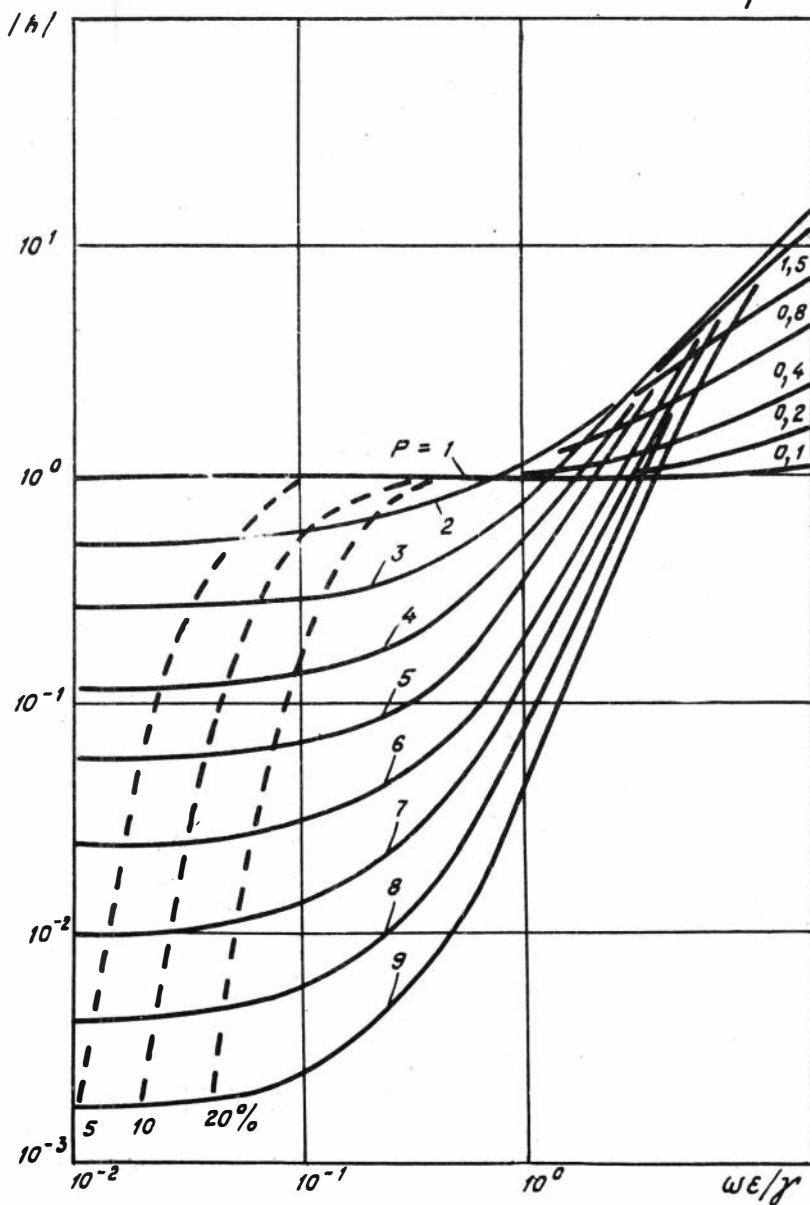
На рис. 14 амплитуда $|h_2|$ представлена зависимостью от χ с шифром кривых — β . Примечателен рост поля с увеличением частоты, если зафиксирована приведенная длина в области $\chi < 1$ и, наоборот, уменьшение амплитуды, если $\chi > 1$. Выразителен максимум амплитуды, который соответствует расстоянию от источника близком к характеристической длине среды.

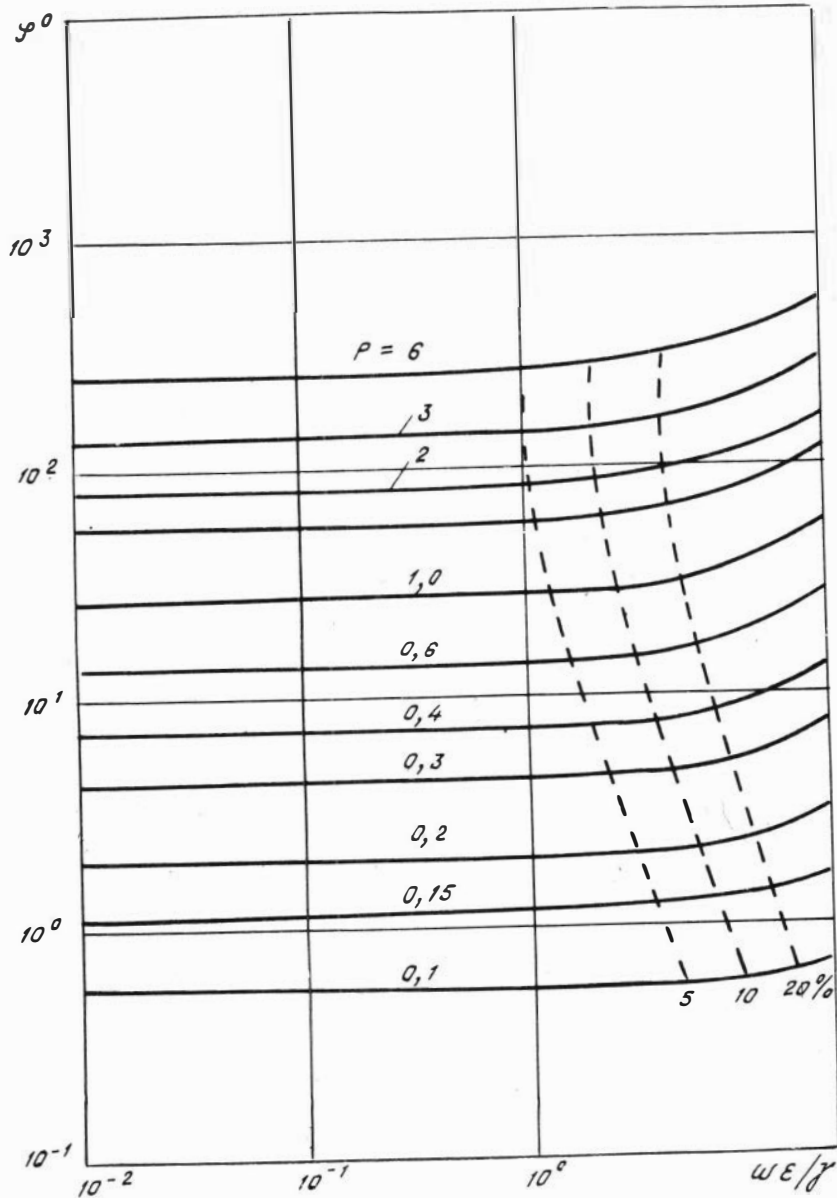
На рис. 15, а, б, в и 16, а, б, дана фаза комплексной амплитуды поля в функции приведенной частоты и приведенной длины, соответственно, для различных значений приведенных длин и частот, т.е.

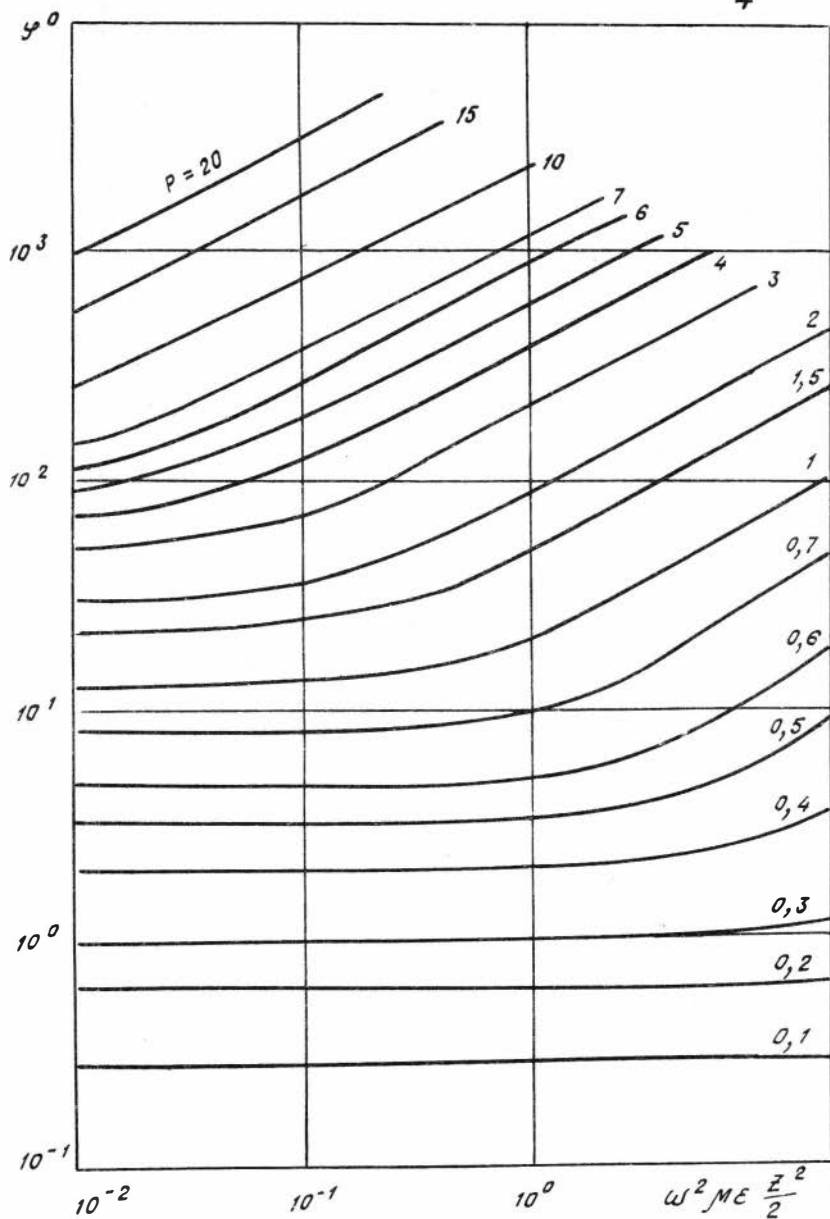
так же, как и для амплитуды на рис. I3-I4. Отметим только отсутствие каких-либо особенностей в поведении графиков для фазы.

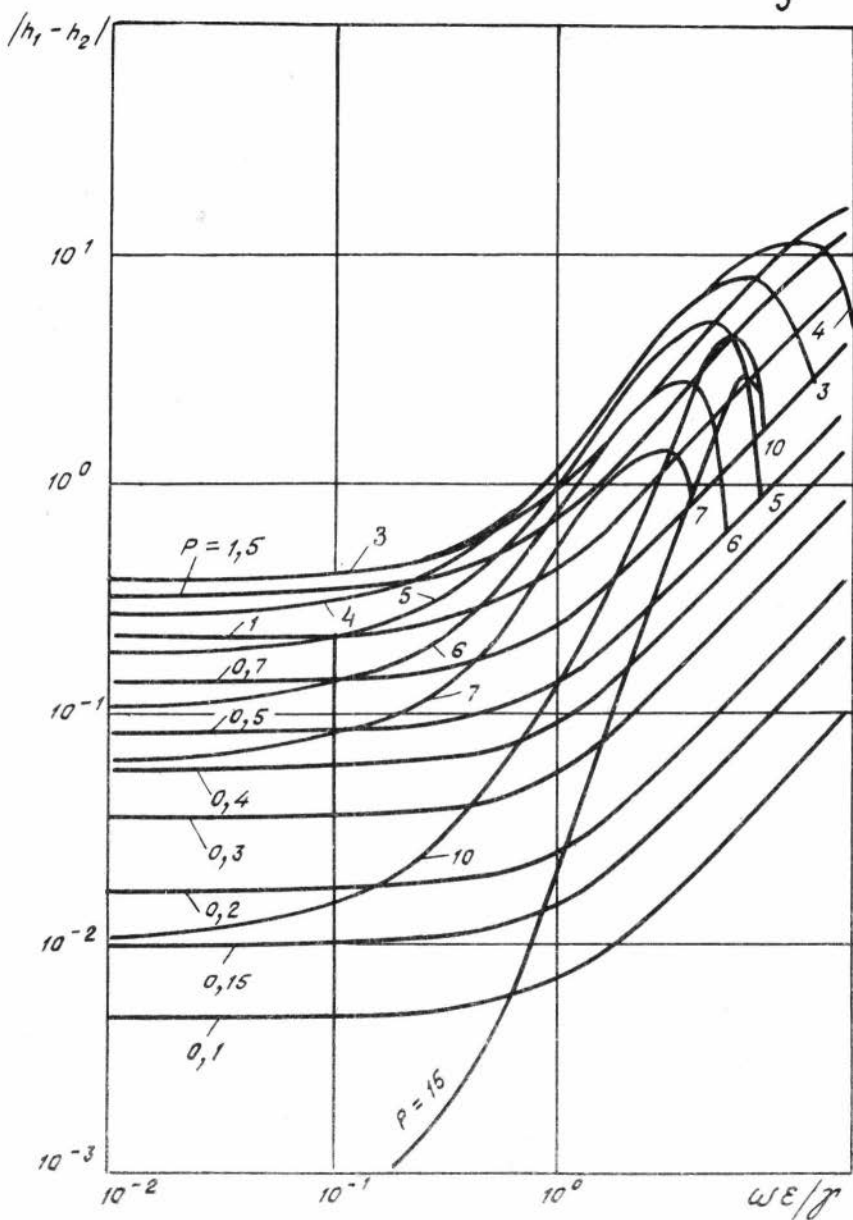
На рис. I7-20 изображены графики для активной $J_m h_z$ и реактивной $Re h_z$ составляющих магнитного поля, индуцируемого в проводящей поляризуемой среде.

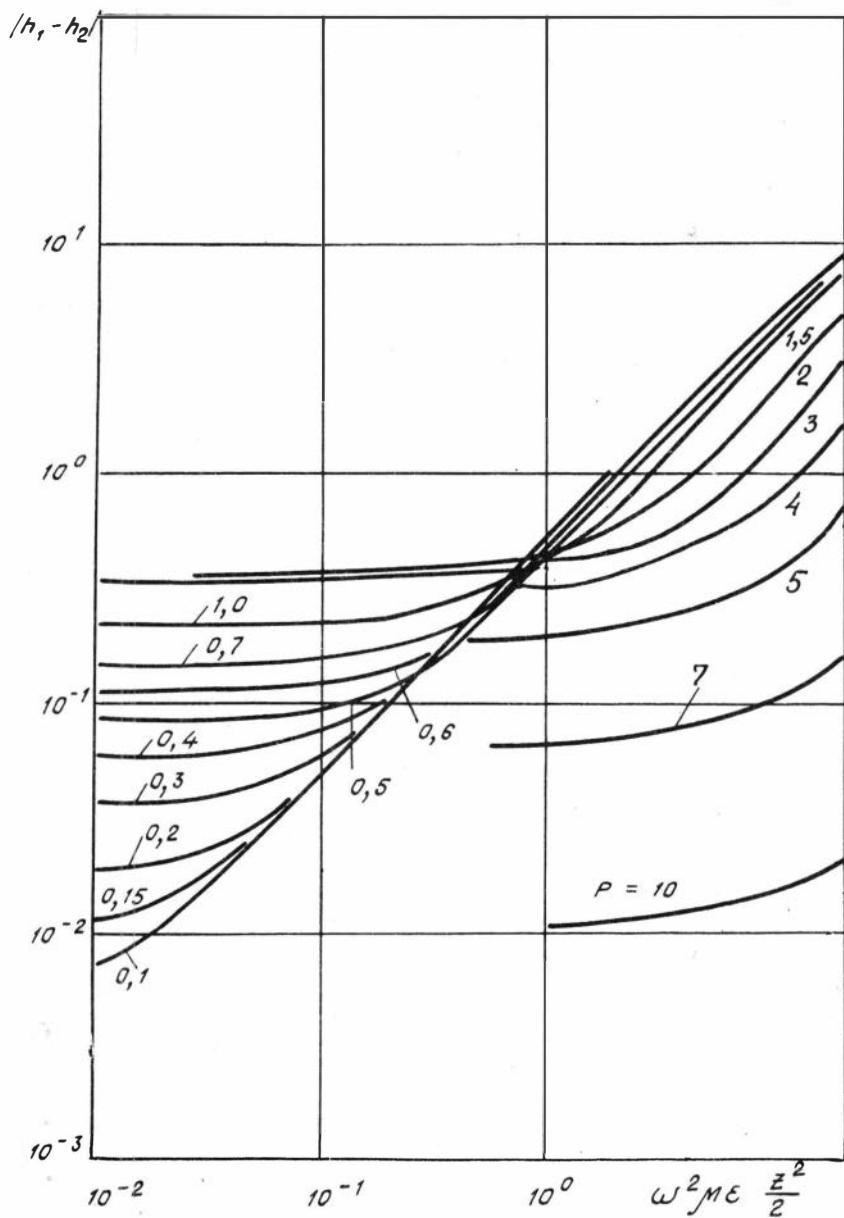
В таблицах приведены значения различных компонент электромагнитного поля, рассчитанные по формуле (I) для восьми значений обобщенного параметра χ в функции β .

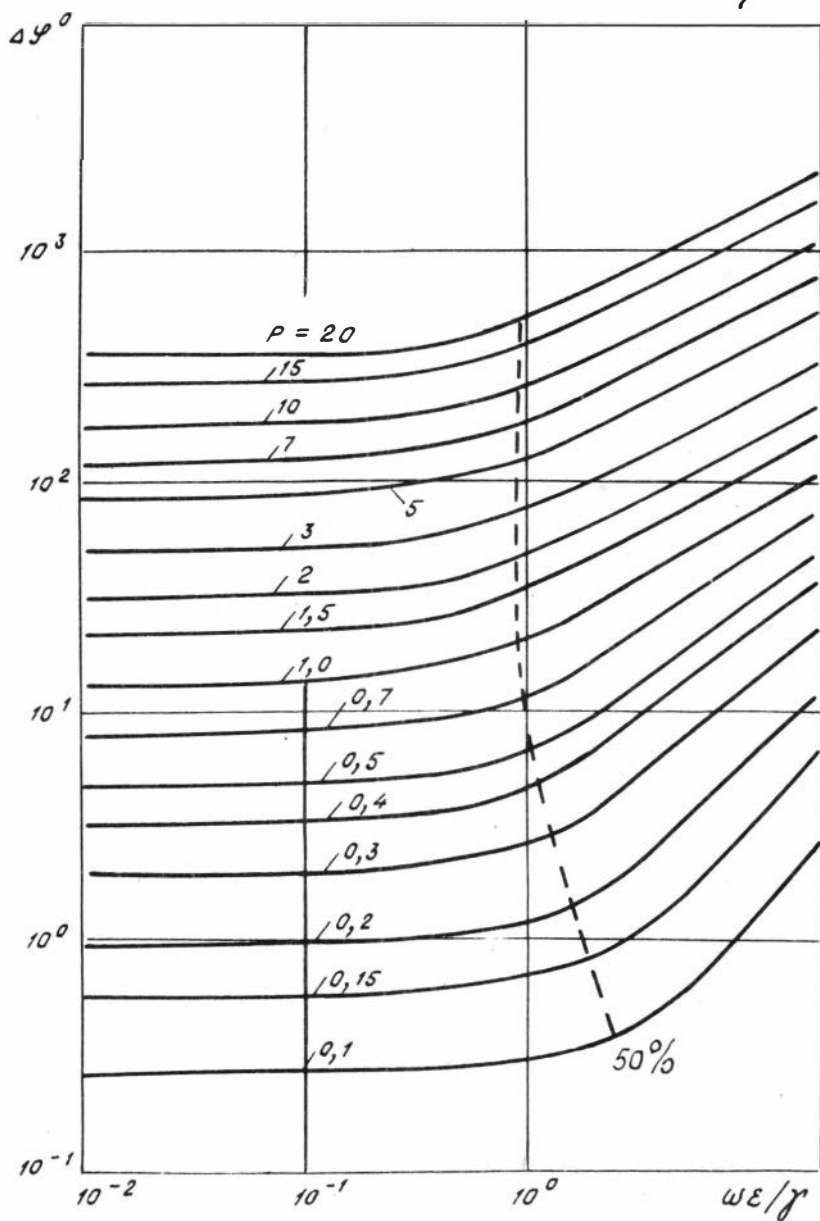


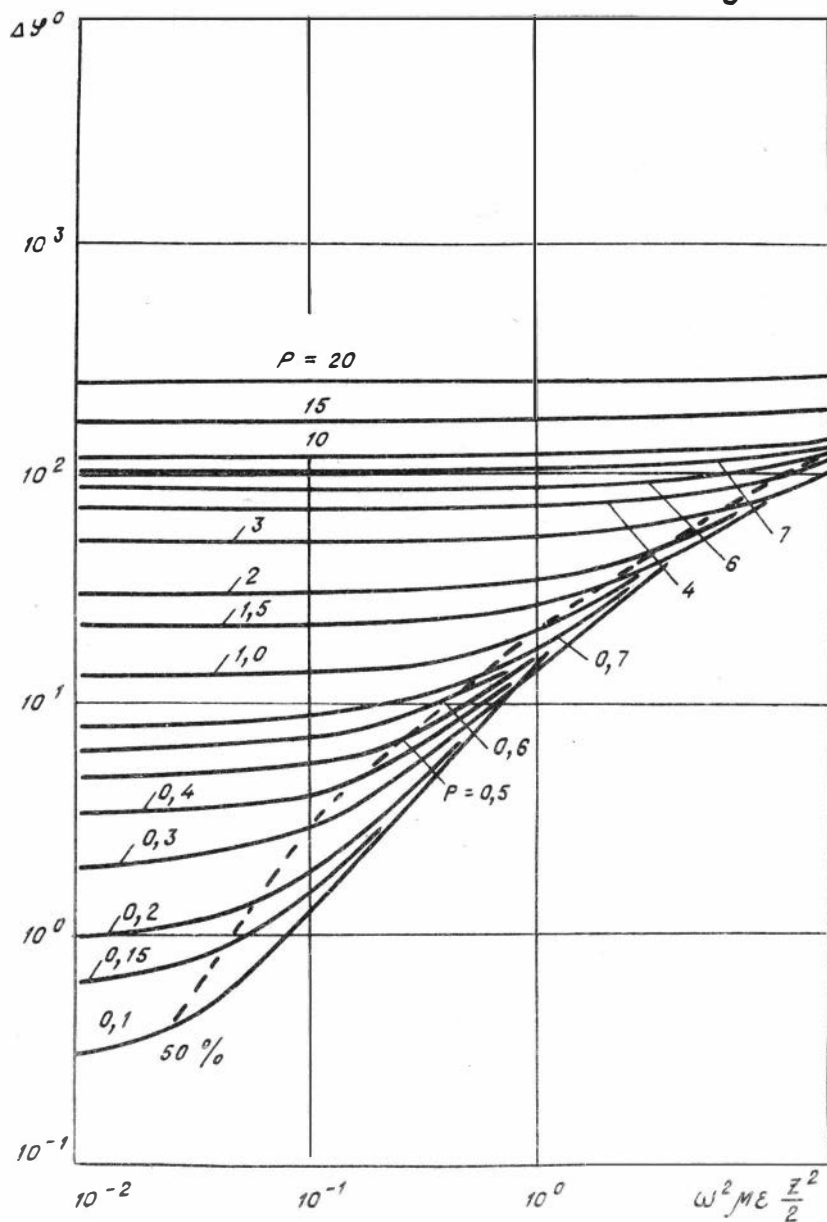


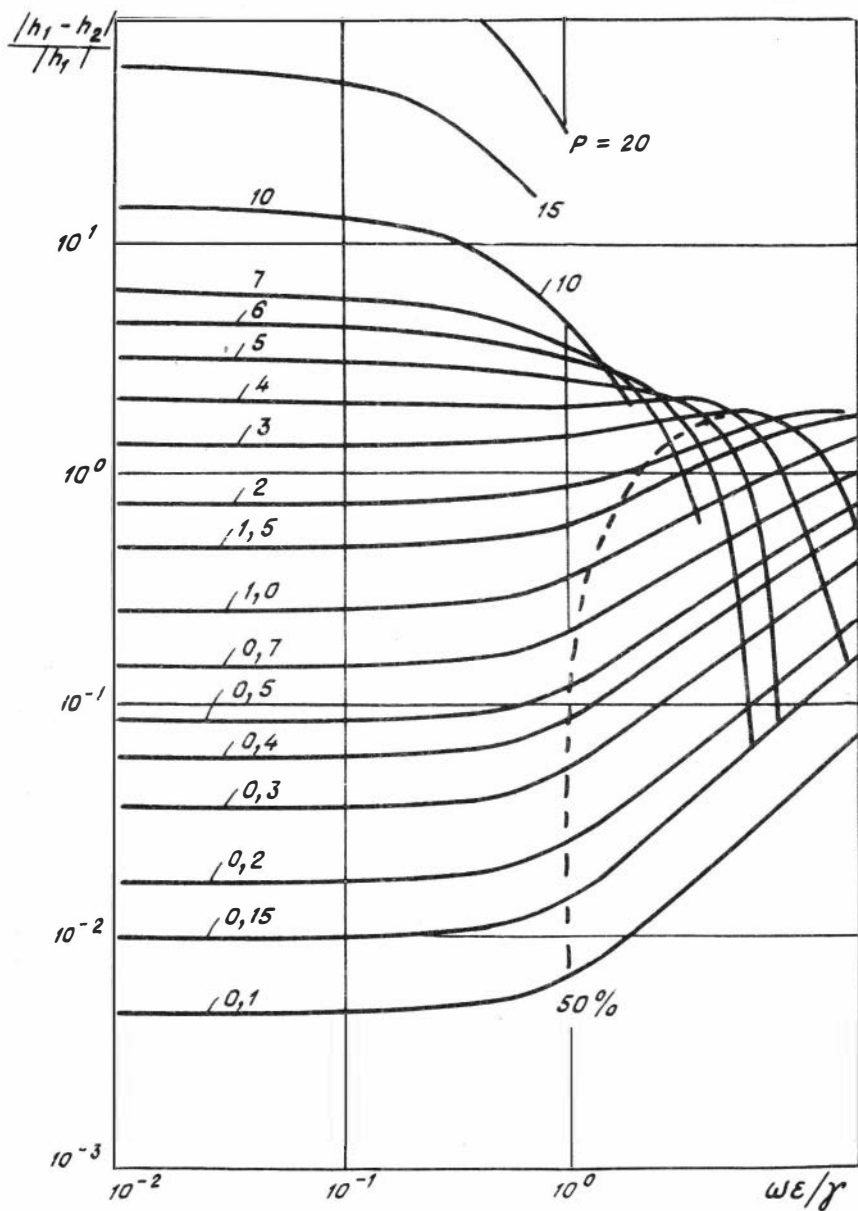


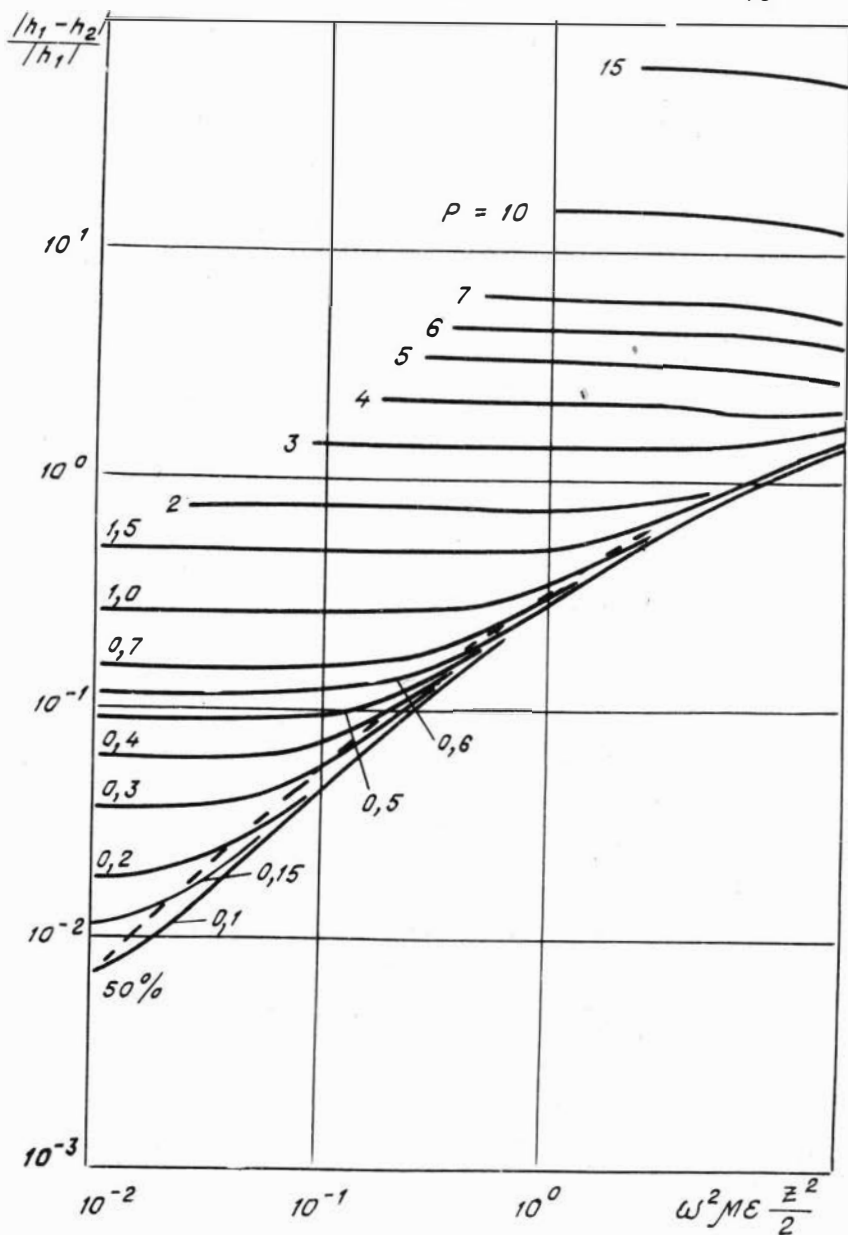


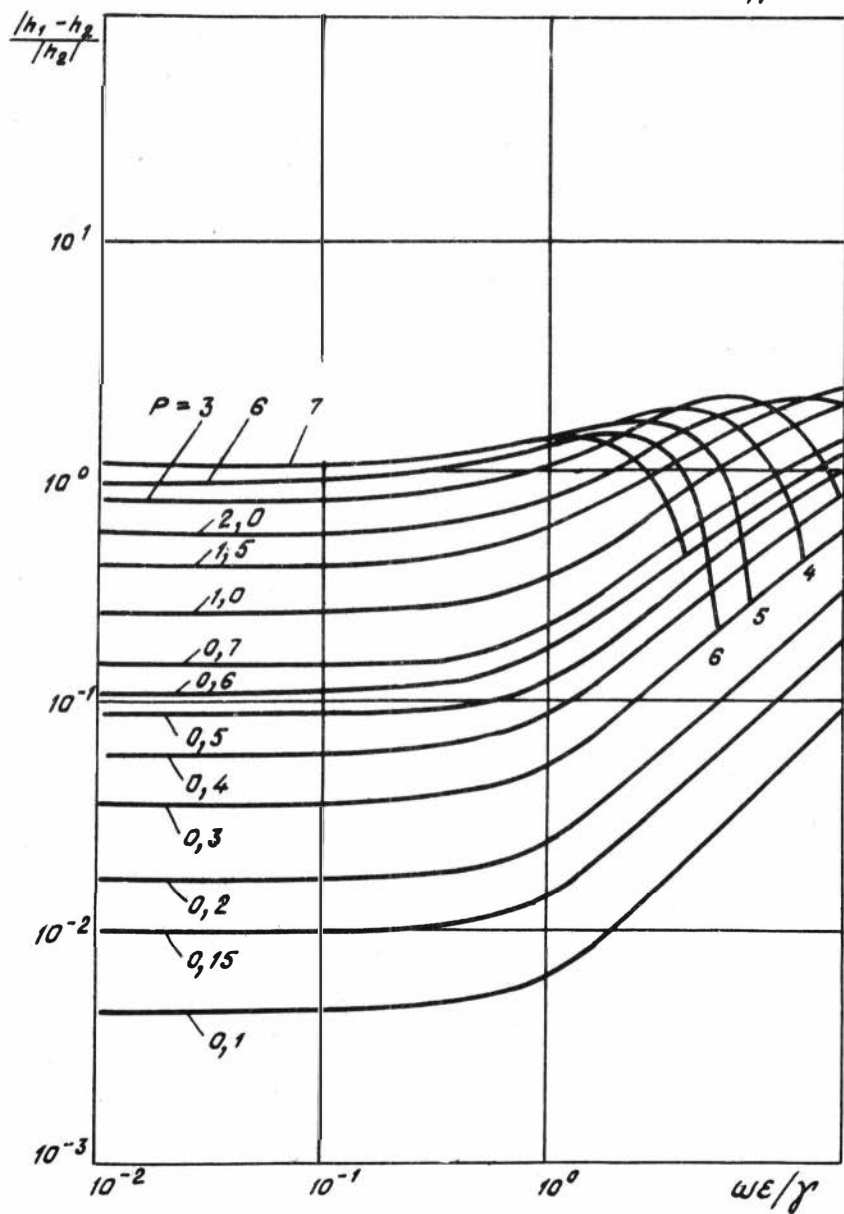


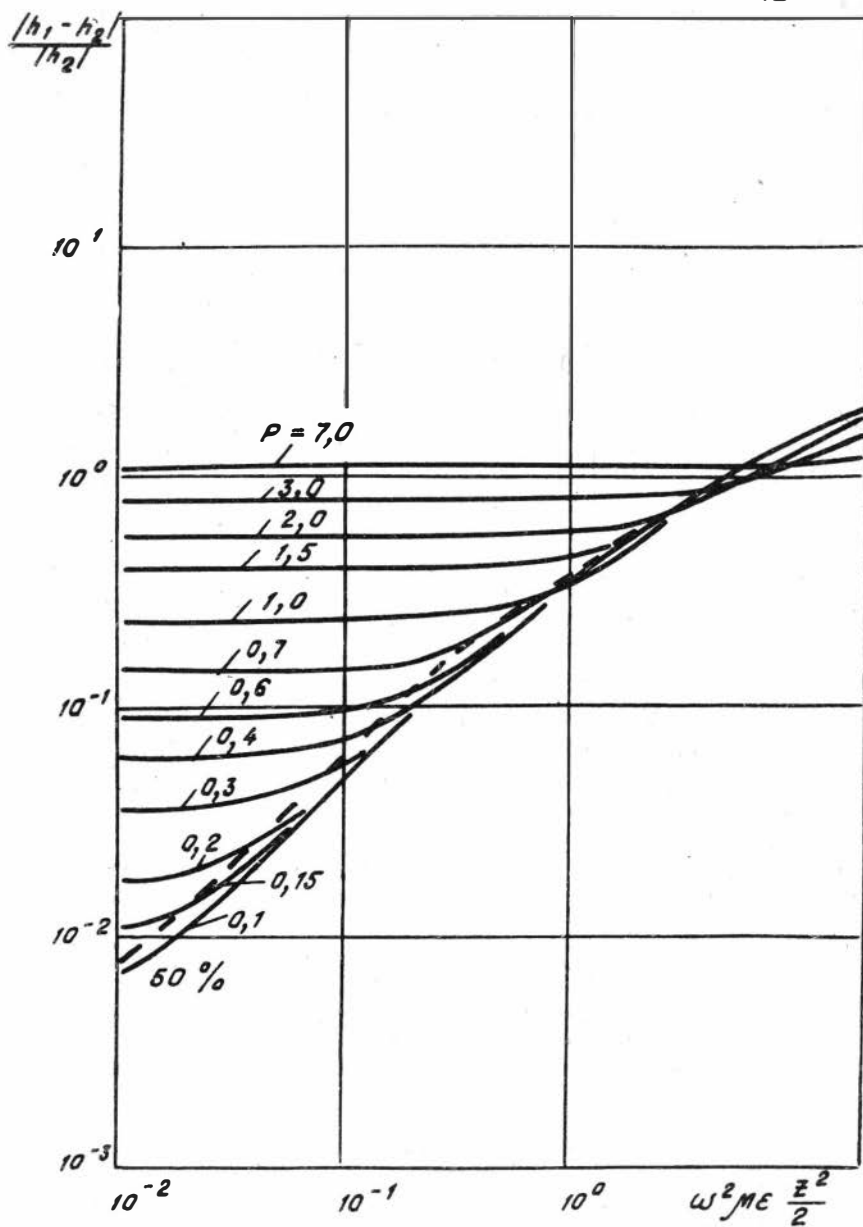


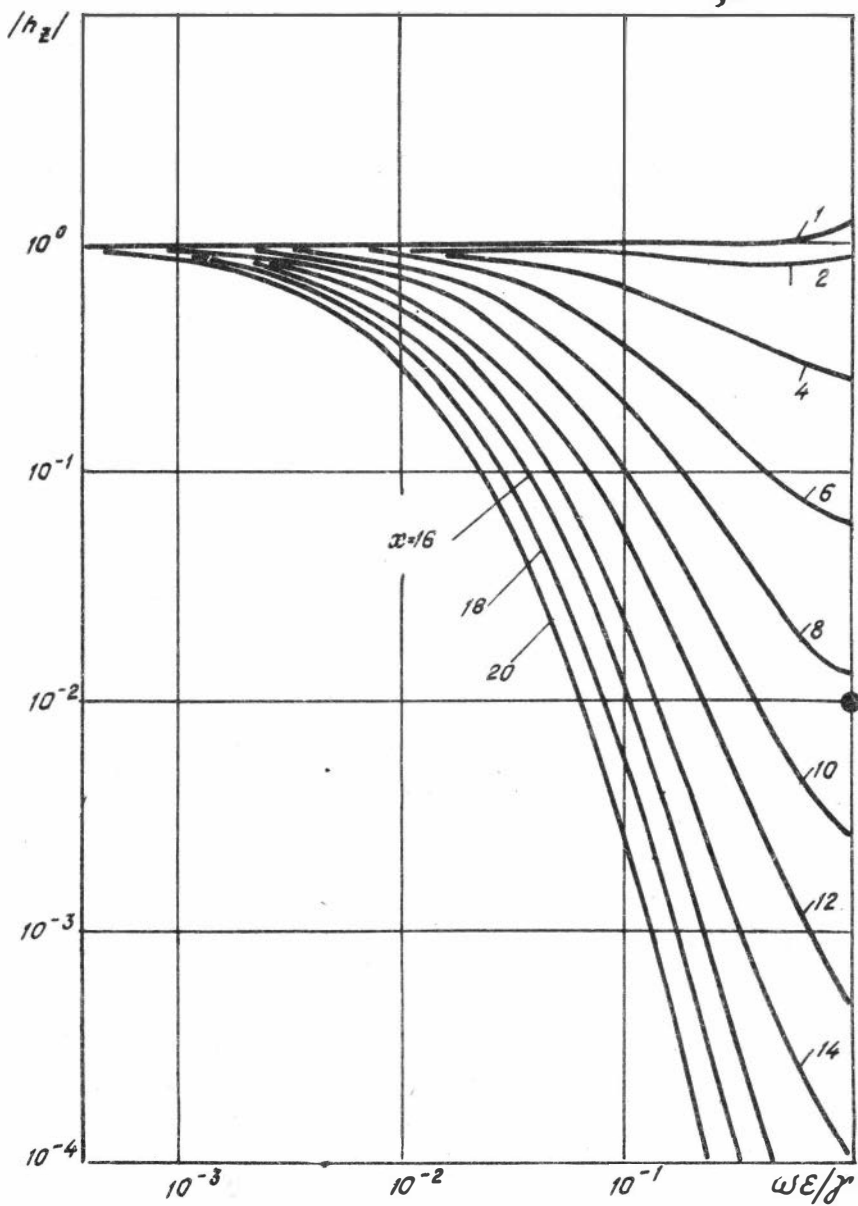


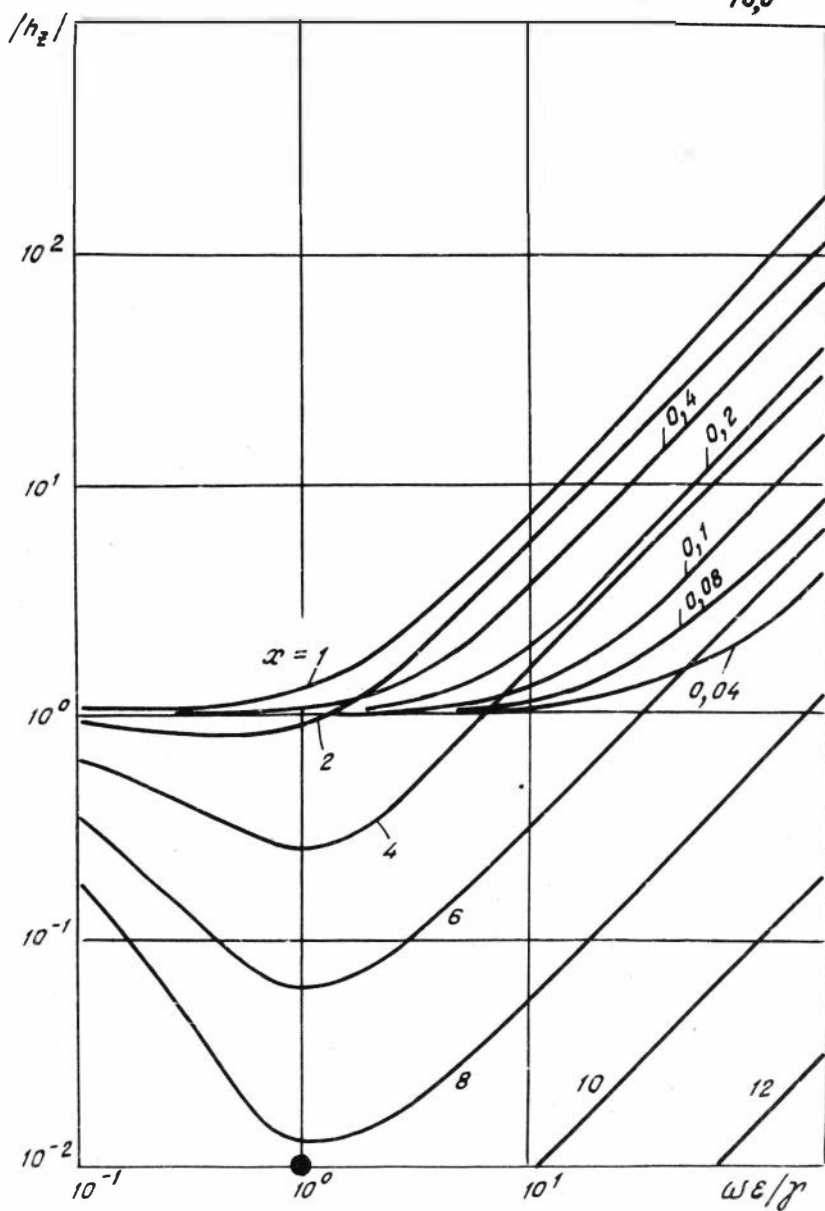


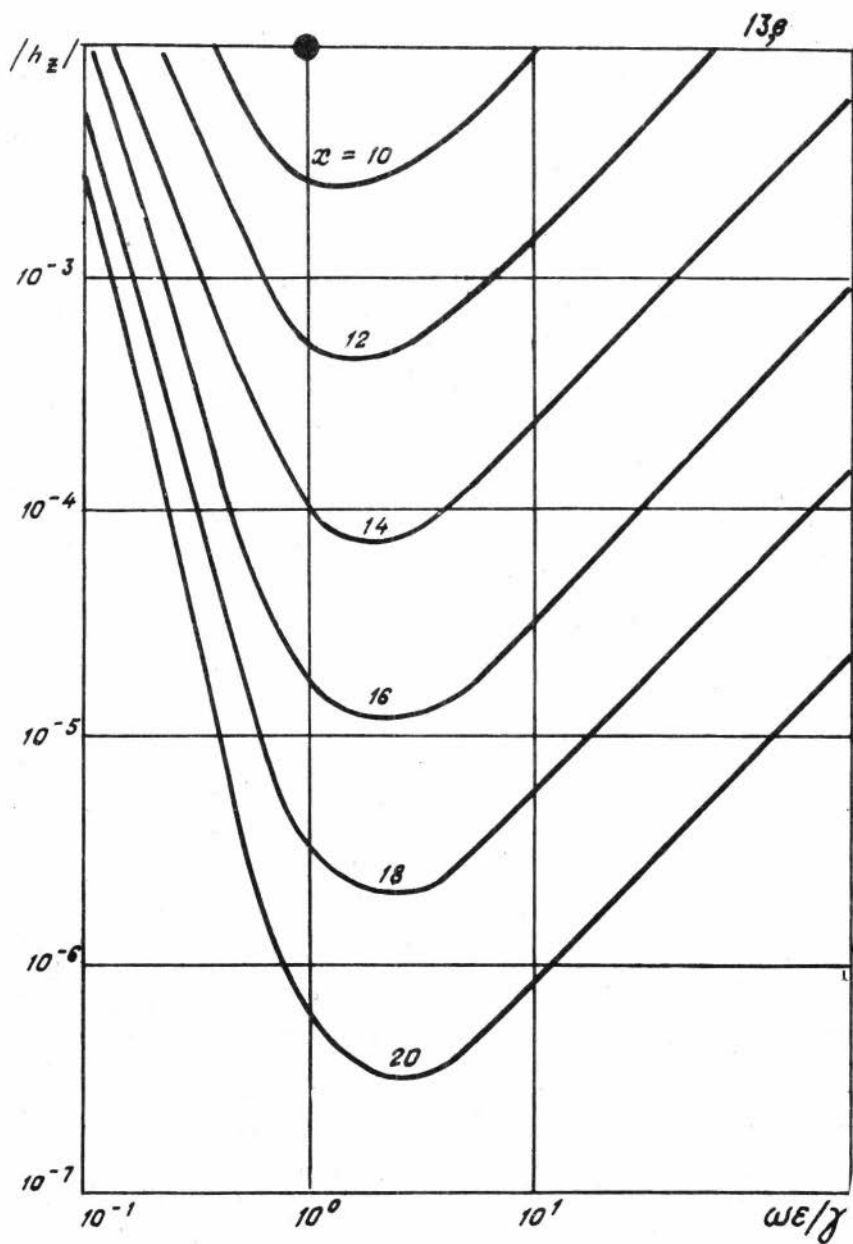


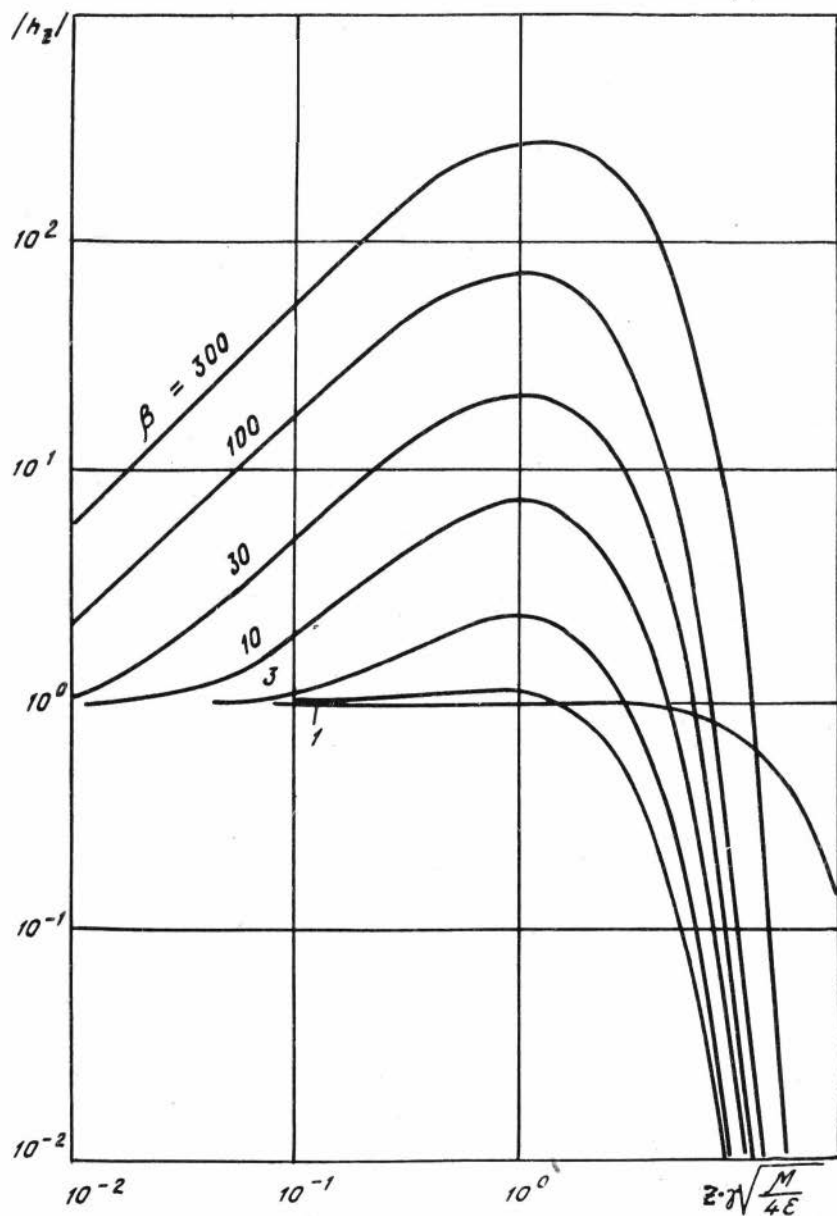




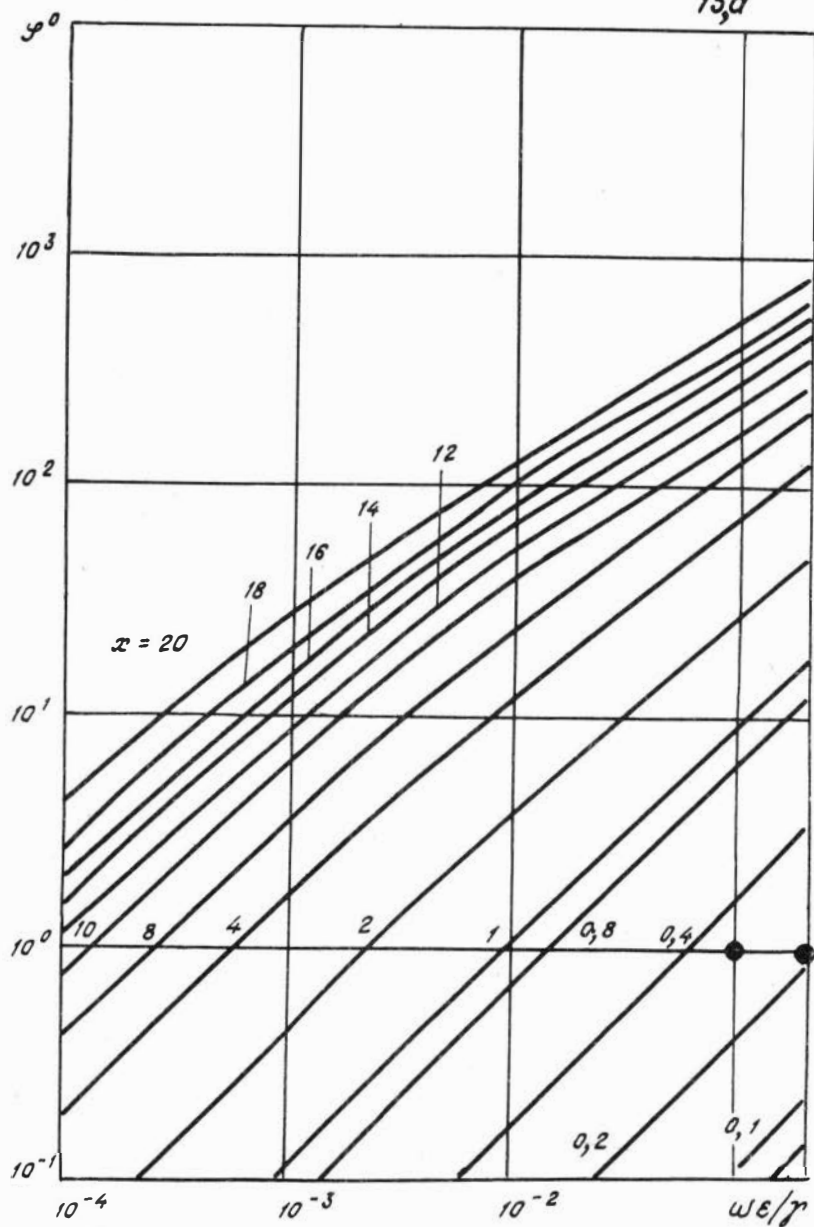


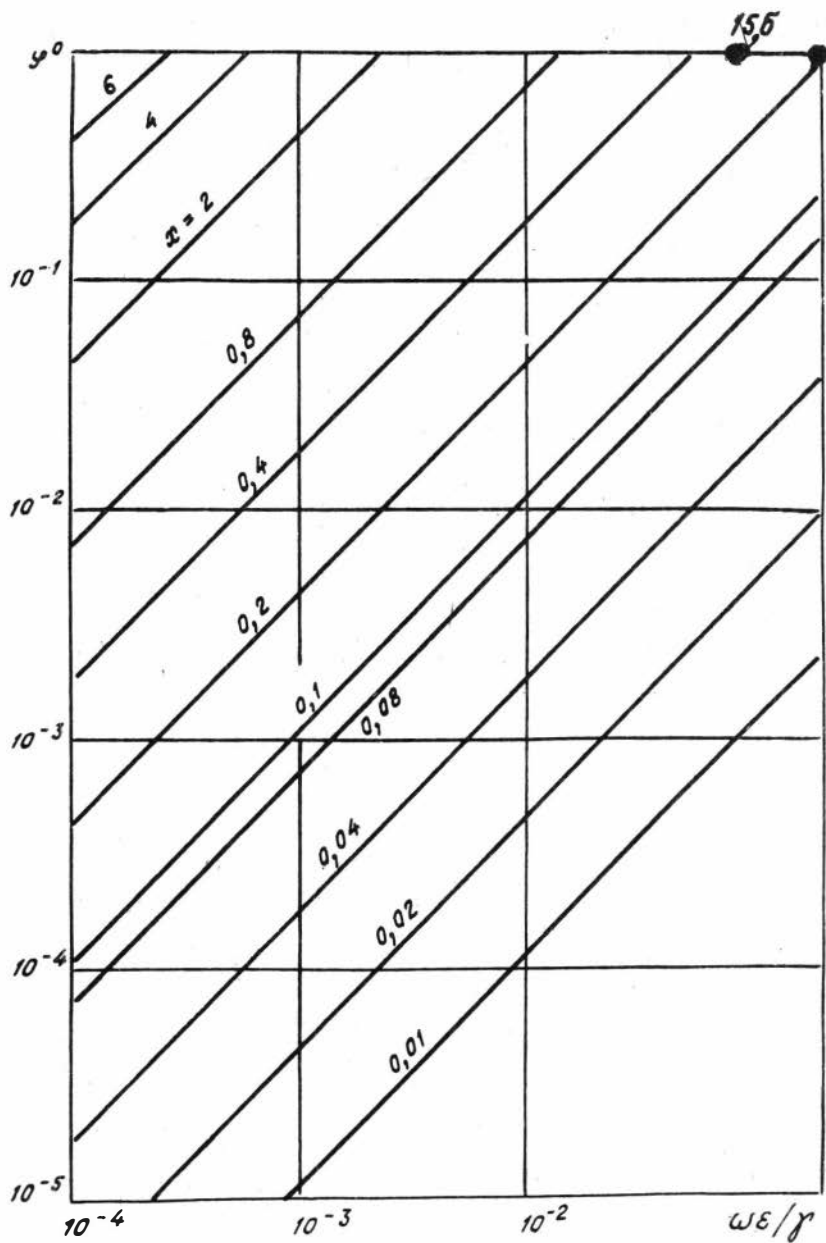


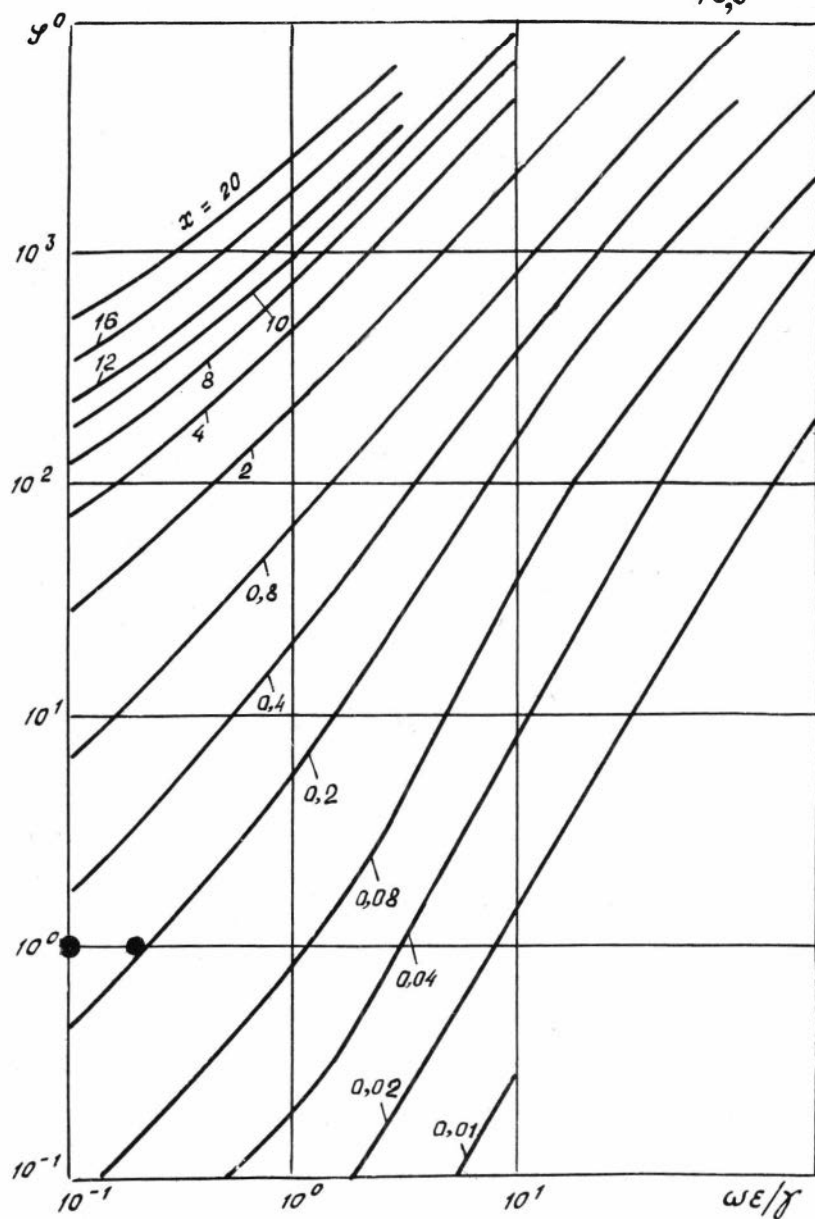


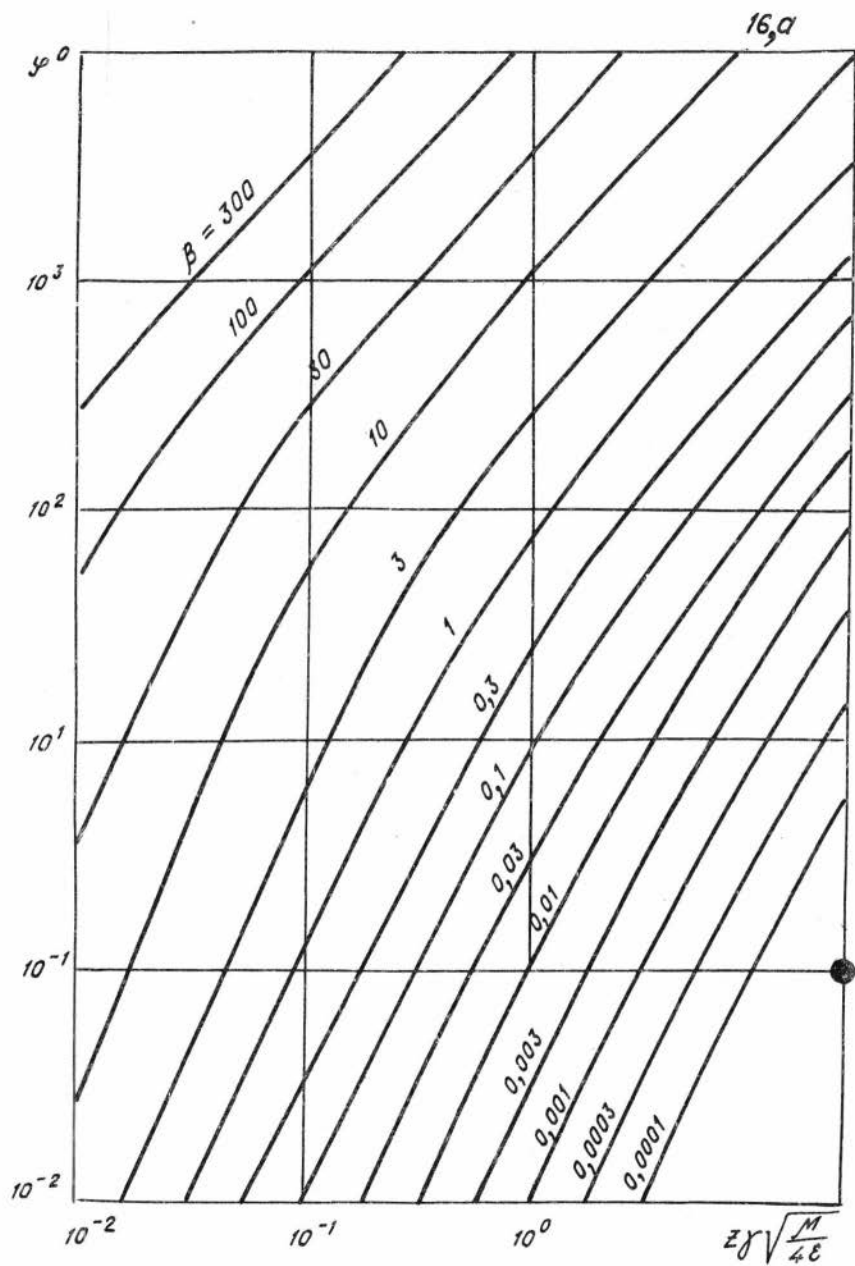


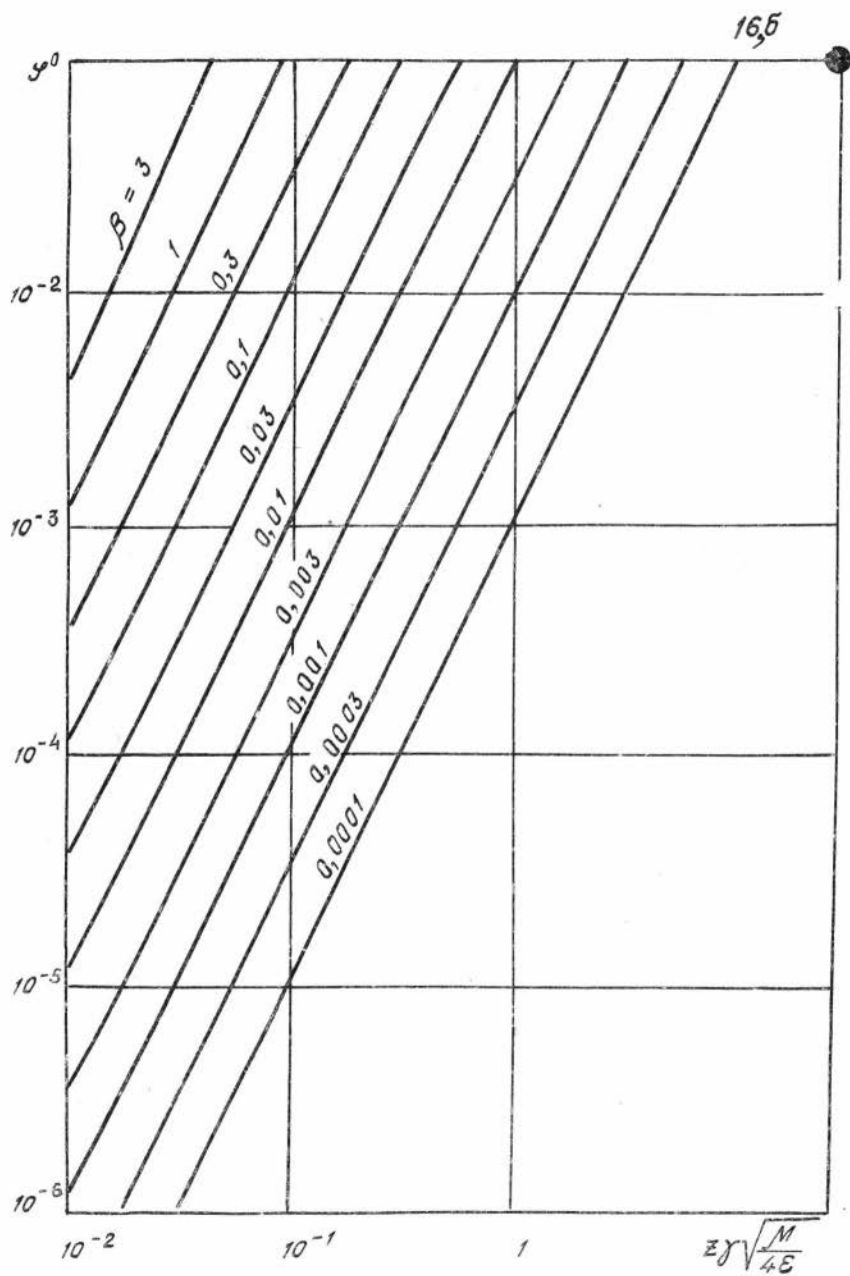
15,0

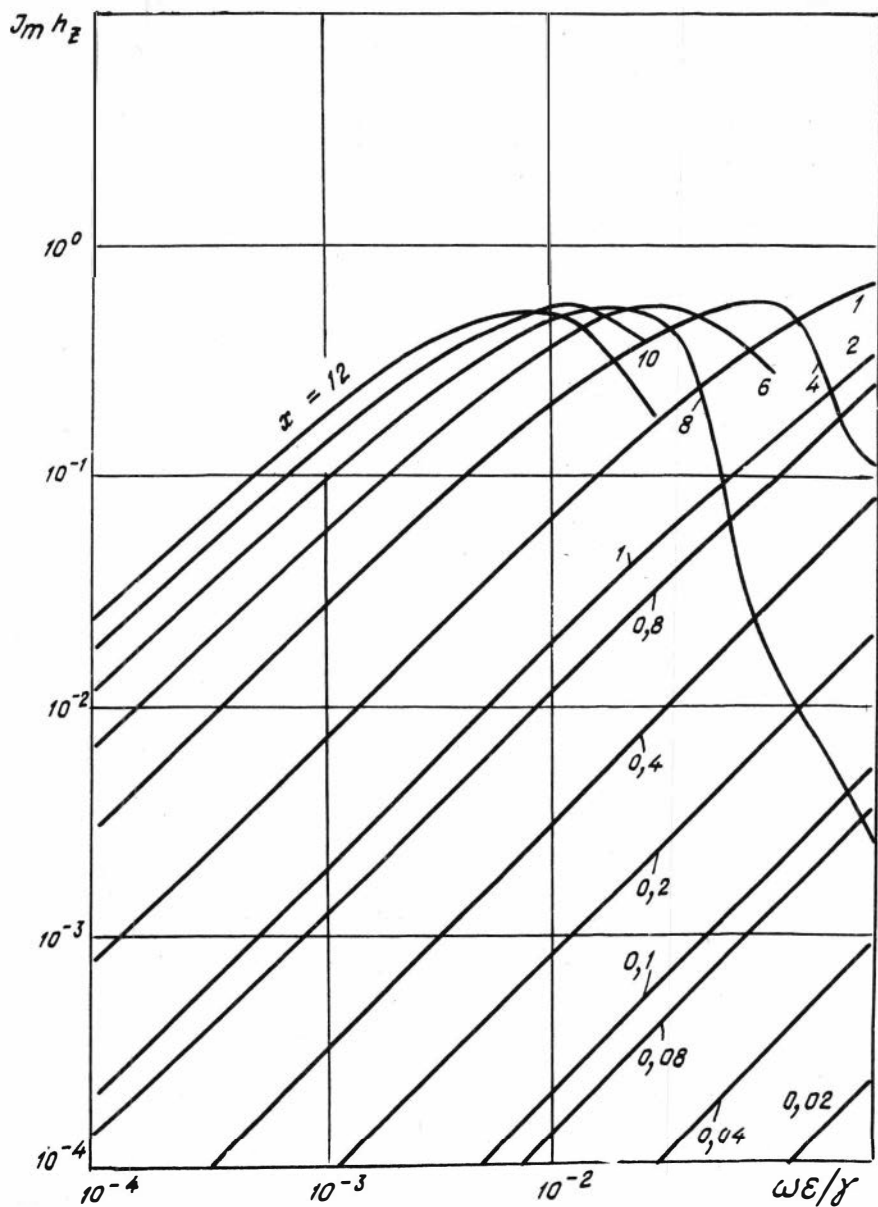


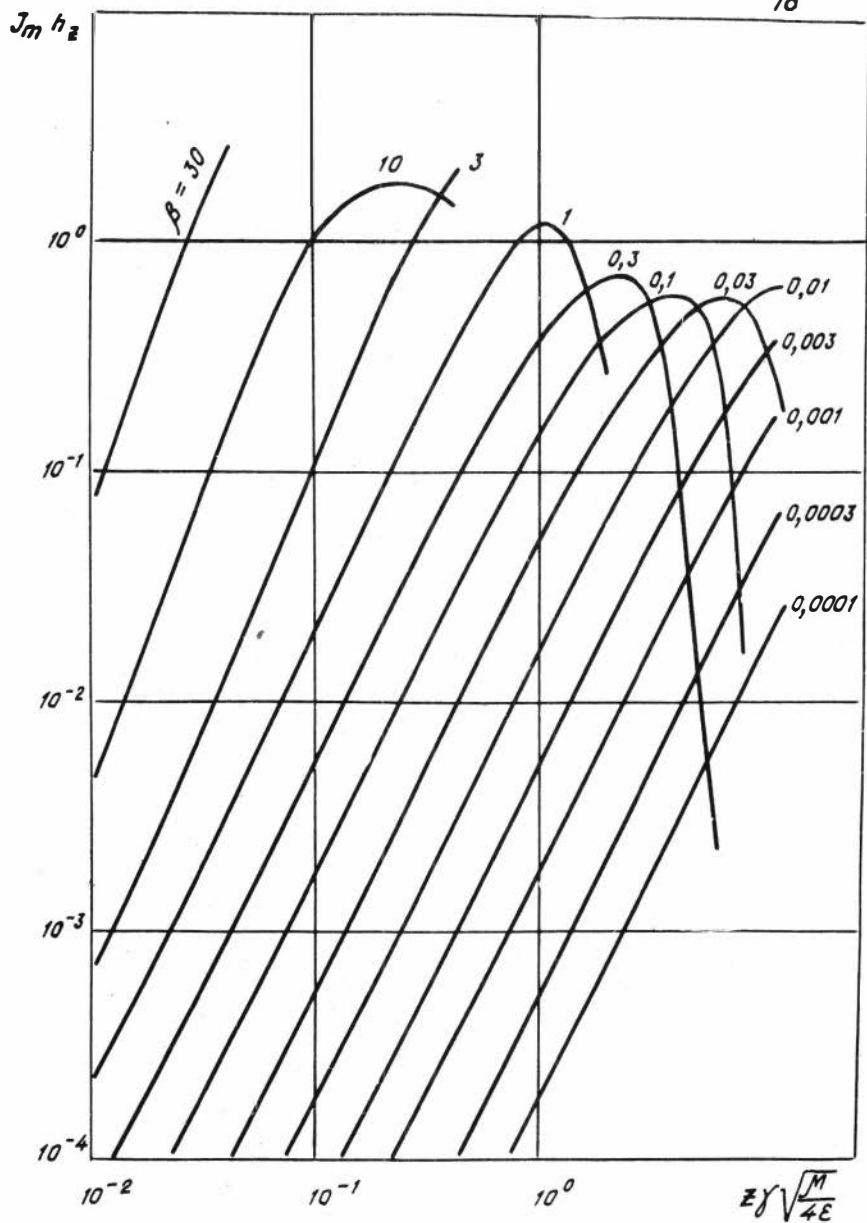


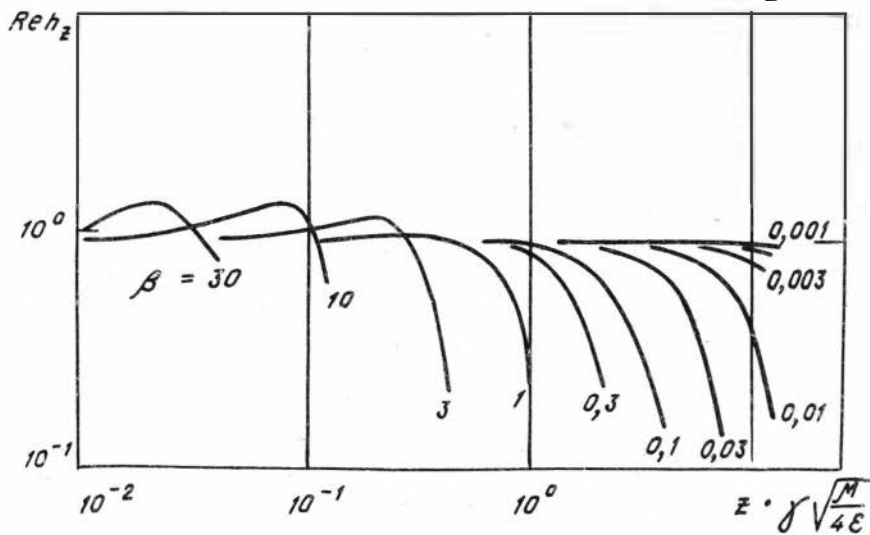
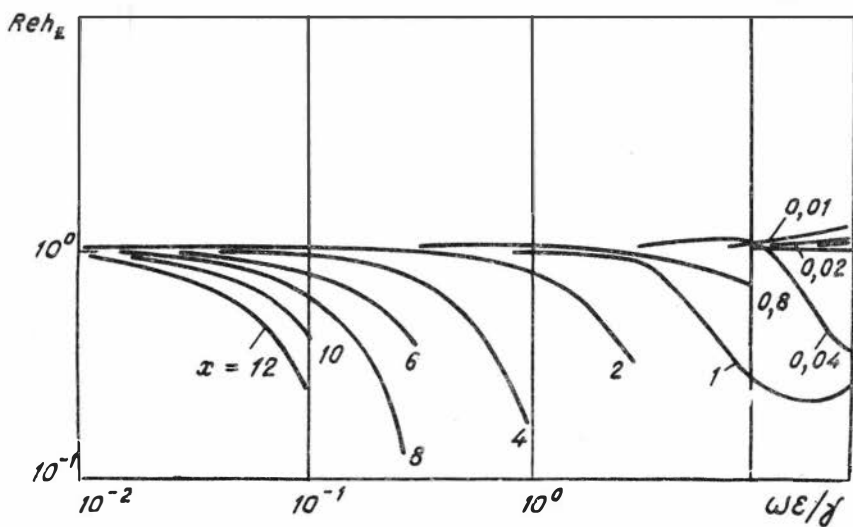












β	a_z	b_z	$ h_z $	φ	$Re h_z$	$Im h_z$
$X = 0,1$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,44744 \cdot 10^{-2}$	$0,44699 \cdot 10^{-2}$	$1,00000$	$0,11408 \cdot 10^{-2}$	$1,00000$	$0,00003$
$I \cdot 10^{-2}$	$0,14213 \cdot 10^{-1}$	$0,14072 \cdot 10^{-1}$	$0,99999$	$0,11350 \cdot 10^{-1}$	$0,99999$	$0,00020$
$I \cdot 10^{-1}$	$0,47010 \cdot 10^{-1}$	$0,42543 \cdot 10^{-1}$	$1,00011$	$0,11165 \cdot 10^0$	$1,00011$	$0,00197$
I	$0,21974 \cdot 10^{-1}$	$0,91018 \cdot 10^{-1}$	$1,01608$	$0,12024 \cdot 10^1$	$1,01585$	$0,02133$
10	$0,20025 \cdot 10^1$	$0,99799 \cdot 10^{-1}$	$2,06760$	$0,53510 \cdot 10^2$	$1,22956$	$1,66229$
$X = 0,2$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,89487 \cdot 10^{-2}$	$0,89398 \cdot 10^{-2}$	$1,00000$	$0,45521 \cdot 10^{-2}$	$1,00000$	$0,00009$
$I \cdot 10^{-2}$	$0,28426 \cdot 10^{-1}$	$0,28143 \cdot 10^{-1}$	$0,99997$	$0,44971 \cdot 10^{-1}$	$0,99997$	$0,00078$
$I \cdot 10^{-1}$	$0,94020 \cdot 10^{-1}$	$0,85087 \cdot 10^{-1}$	$1,00029$	$0,43472 \cdot 10^0$	$1,00027$	$0,00761$
I	$0,43947 \cdot 10^0$	$0,18203 \cdot 10^0$	$1,05119$	$0,47849 \cdot 10^1$	$1,04754$	$0,08770$
10	$0,40050 \cdot 10^1$	$0,19960 \cdot 10^0$	$3,42425$	$0,15614 \cdot 10^3$	$3,13165$	$1,38500$
$X = 0,4$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,17897 \cdot 10^{-1}$	$0,17880 \cdot 10^{-1}$	$0,99999$	$0,18105 \cdot 10^{-1}$	$0,99999$	$0,00032$
$I \cdot 10^{-2}$	$0,56852 \cdot 10^{-1}$	$0,56286 \cdot 10^{-1}$	$0,99990$	$0,17651 \cdot 10^0$	$0,99990$	$0,00309$
$I \cdot 10^{-1}$	$0,18804 \cdot 10^0$	$0,17017 \cdot 10^0$	$0,99970$	$0,16448 \cdot 10^1$	$0,99929$	$0,02871$
I	$0,87894 \cdot 10^0$	$0,36407 \cdot 10^0$	$1,12752$	$0,17563 \cdot 10^2$	$1,07496$	$0,34025$
10	$0,80099 \cdot 10^1$	$0,39920 \cdot 10^0$	$5,45482$	$0,37884 \cdot 10^3$	$5,16250$	$1,76185$

β	αz	βz	$ h_z $	φ	$Re h_z$	$Im h_z$
$X = 1,0$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,44744 \cdot 10^{-1}$	$0,44699 \cdot 10^{-1}$	0,99993	$0,11116 \cdot 10^0$	0,99993	0,00195
$I \cdot 10^{-2}$	$0,14213 \cdot 10^0$	$0,14072 \cdot 10^0$	0,99862	$0,10412 \cdot 10^1$	0,99846	0,01816
$I \cdot 10^{-1}$	$0,47010 \cdot 10^0$	$0,42544 \cdot 10^0$	0,98084	$0,86823 \cdot 10^1$	0,96960	0,14807
I	$0,21974 \cdot 10^1$	$0,91018 \cdot 10^0$	1,17175	$0,76899 \cdot 10^2$	0,26558	1,14126
10	$0,20025 \cdot 10^2$	$0,99799 \cdot 10^0$	7,41790	$0,10630 \cdot 10^4$	7,09500	-2,16420
$X = 2,0$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,89487 \cdot 10^{-1}$	$0,89398 \cdot 10^{-1}$	0,99958	$0,43122 \cdot 10^0$	0,99956	0,00753
$I \cdot 10^{-2}$	$0,28426 \cdot 10^{+0}$	$0,28143 \cdot 10^0$	0,99059	$0,37794 \cdot 10^1$	0,98844	0,06530
$I \cdot 10^{-1}$	$0,94020 \cdot 10^0$	$0,85087 \cdot 10^0$	0,88652	$0,26940 \cdot 10^2$	0,79033	0,40164
I	$0,43947 \cdot 10^1$	$0,18204 \cdot 10^1$	0,84577	$0,19448 \cdot 10^3$	-0,81888	-0,21162
10	$0,40050 \cdot 10^2$	$0,19960 \cdot 10^1$	5,45714	$0,22089 \cdot 10^4$	3,58322	4,11633
$X = 4,0$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,17897 \cdot 10^0$	$0,17880 \cdot 10^0$	0,99707	$0,16212 \cdot 10^1$	0,99667	0,02822
$I \cdot 10^{-2}$	$0,56852 \cdot 10^0$	$0,56286 \cdot 10^0$	0,94722	$0,12584 \cdot 10^2$	0,92447	0,20639
$I \cdot 10^{-1}$	$0,18804 \cdot 10^1$	$0,17017 \cdot 10^1$	0,60029	$0,72899 \cdot 10^4$	0,17650	0,57376
I	$0,87894 \cdot 10^1$	$0,36407 \cdot 10^1$	0,26075	$0,44142 \cdot 10^3$	0,03885	0,25784
10	$0,80099 \cdot 10^2$	$0,39920 \cdot 10^1$	1,48177	$0,45029 \cdot 10^4$	-1,47986	-0,07566

β	aZ	bZ	$ h_z $	φ	$Re h_z$	$Im h_z$
$X = 6,0$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,26846 \cdot 10^0$	$0,26819 \cdot 10^0$	$0,99134$	$0,34292 \cdot 10^1$	$0,98956$	$0,59310 \cdot 10^{-1}$
$I \cdot 10^{-2}$	$0,85278 \cdot 10^0$	$0,84429 \cdot 10^0$	$0,87341$	$0,24045 \cdot 10^2$	$0,79763$	$0,35589 \cdot 10^0$
$I \cdot 10^{-1}$	$0,28206 \cdot 10^1$	$0,25526 \cdot 10^0$	$0,35327$	$0,12316 \cdot 10^3$	$-0,19324$	$0,29573 \cdot 10^0$
I	$0,13184 \cdot 10^2$	$0,54610 \cdot 10^0$	$0,06238$	$0,69149 \cdot 10^3$	$+0,05483$	$-0,29760 \cdot 10^{-1}$
IO	$0,12015 \cdot 10^3$	$0,59879 \cdot 10^0$	$0,30194$	$0,67972 \cdot 10^4$	$0,22205$	$-0,20442 \cdot 10^0$
$X = 8,0$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,35795 \cdot 10^0$	$0,35759 \cdot 10^0$	$0,98187$	$0,57381 \cdot 10^1$	$0,97695$	$0,98180 \cdot 10^{-1}$
$I \cdot 10^{-2}$	$0,11370 \cdot 10^1$	$0,11257 \cdot 10^1$	$0,78208$	$0,37005 \cdot 10^2$	$0,62455$	$0,47073 \cdot 10^0$
$I \cdot 10^{-1}$	$0,37608 \cdot 10^1$	$0,34035 \cdot 10^1$	$0,19259$	$0,17498 \cdot 10^3$	$-0,19185$	$0,16853 \cdot 10^{-1}$
I	$0,17579 \cdot 10^2$	$0,72814 \cdot 10^1$	$0,01337$	$0,94240 \cdot 10^3$	$-0,00987$	$-0,90218 \cdot 10^{-2}$
IO	$0,16020 \cdot 10^3$	$0,79839 \cdot 10^1$	$0,05469$	$0,90918 \cdot 10^4$	$-0,00184$	$0,54665 \cdot 10^{-1}$

β	az	δz	$ h_z $	φ	Reh_z	Imh_z
$X = 10$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,44744 \cdot 10^0$	$0,44699 \cdot 10^0$	0,96864	$0,84535 \cdot 10^1$	0,95813	0,14240
$I \cdot 10^{-2}$	$0,14213 \cdot 10^1$	$0,14072 \cdot 10^1$	0,68443	$0,50875 \cdot 10^2$	0,43189	0,53096
$I \cdot 10^{-1}$	$0,47010 \cdot 10^1$	$0,42544 \cdot 10^1$	0,10013	$0,22753 \cdot 10^3$	-0,06761	-0,07386
I	$0,21974 \cdot 10^2$	$0,91018 \cdot 10^1$	0,00270	$0,11937 \cdot 10^4$	-0,00108	0,00247
10	$0,20025 \cdot 10^3$	$0,99799 \cdot 10^1$	0,00929	$0,11386 \cdot 10^5$	-0,00639	-0,00674
$X = 20$						
$I \cdot 10^{-3}$	$0,89487 \cdot 10^0$	$0,89398 \cdot 10^0$	$0,85680 \cdot 10^0$	$0,25982 \cdot 10^2$	$0,25982 \cdot 10^2$	0,37536
$I \cdot 10^{-2}$	$0,28428 \cdot 10^1$	$0,28143 \cdot 10^1$	0,28516	$0,12617 \cdot 10^3$	$0,12617 \cdot 10^3$	0,23019
$I \cdot 10^{-1}$	$0,94020 \cdot 10^1$	$0,85087 \cdot 10^1$	$0,26971 \cdot 10^{-2}$	$0,49402 \cdot 10^3$	$0,13402 \cdot 10^3$	$0,19394 \cdot 10^{-2}$
I	$0,43947 \cdot 10^2$	$0,18203 \cdot 10^2$	$0,59588 \cdot 10^{-6}$	$0,24516 \cdot 10^4$	$0,29160 \cdot 10^3$	$0,55402 \cdot 10^{-6}$

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ В СРЕДАХ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА (ПЛАСТЫ КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ)

Моделирование различных характеристик электромагнитного поля в неоднородных средах выполнено для трехэлементных изопараметрических зондов различной длины (Z_i). Частоты токов возбуждения (ω_i) в генераторных катушках выбраны так, чтобы величина $Z_i \sqrt{\omega_i}$ — изопараметр аппаратуры ВИКИЗ /1, 2, 3/ — сохранилась постоянной для всех зондов. Более высоким частотам соответствует лучшая радиальная детальность исследования. Однако выбор максимальной частоты необходимо ограничивать, исходя из двух условий. Первое связано с максимально допустимым влиянием диэлектрической проницаемости на ту или иную характеристику электромагнитного поля и определяется величиной $\beta = \omega \epsilon / c$ в соответствии с данными, приведенными в разделе "Однородная среда". Так, штриховая линия, пересекая графики, определяет уровень вклада токов смещения в ту или иную характеристику поля. Вторым ограничительным условием является минимальный уровень сигналов, индуцируемых в измерительных катушках зондов. Так, например, по графикам рис. I (раздела "Однородная среда") можно установить максимальную величину параметра $\rho = Z_i \sqrt{\omega_i} \sqrt{\mu/2} \approx 6$, если ограничить чувствительность аппаратуры электромагнитного каротажного зондирования на уровне $h_2 \approx 0,02$, а допустимый вклад за счет токов смещения положить не превышающим 10%. Следует отметить, что в низкоомном (параметр ρ велик) геоэлектрическом разрезе нефтяных скважин диэлектрической проницаемостью можно пренебречь. Таким образом, для установленной максимальной величины ρ в таблице приведены максимальные частоты (МГц), минимальные значения удельных сопротивлений (Ом·м) и размеры самого короткого зонда (м).

В полном соответствии с вышеописанными ограничениями рабочие частоты зондов ВИКИЗ определены следующим равенством:

$$Z_i \sqrt{f_i} = Z_i \sqrt{\omega_i / 2\pi} = 1,87 \cdot 10^3 [\Gamma_{\text{ц}}^{1/2} \cdot \text{м}].$$

Z_i	ρ				
	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0
0,5	10,9	14,6	18,2	21,9	36,5
0,6	7,59	10,1	12,6	15,2	25,3
0,7	5,58	7,44	9,30	11,2	18,6

Длины зондов и их рабочие частоты следующие:

Z_i (м) 0,5 0,7 1,0 1,4 2,0

f_i (МГц) 14 7,0 3,5 1,75 0,875.

Расстояния между измерительными катушками (ΔZ_i) каждого трехэлементного зонда различны и определены из условия геометрического подобия зондов $\Delta Z_i / Z_i = 0,3$. Величина $\Delta Z_i / Z_i$ является вторым изопараметром зондовой системы ВИКИЗ.

Измеряемой характеристикой электромагнитного поля в аппаратуре ВИКИЗ является разность фаз. Ее связь с обобщенным параметром описывается, в соответствии с (1) и (3), следующим выражением:

$$\Delta \varphi = \Delta \rho_i - \arctg[\Delta \rho_i / (1 + 2\rho_i)(1 - \Delta \rho_i) + 2\rho_i^2]$$

Здесь

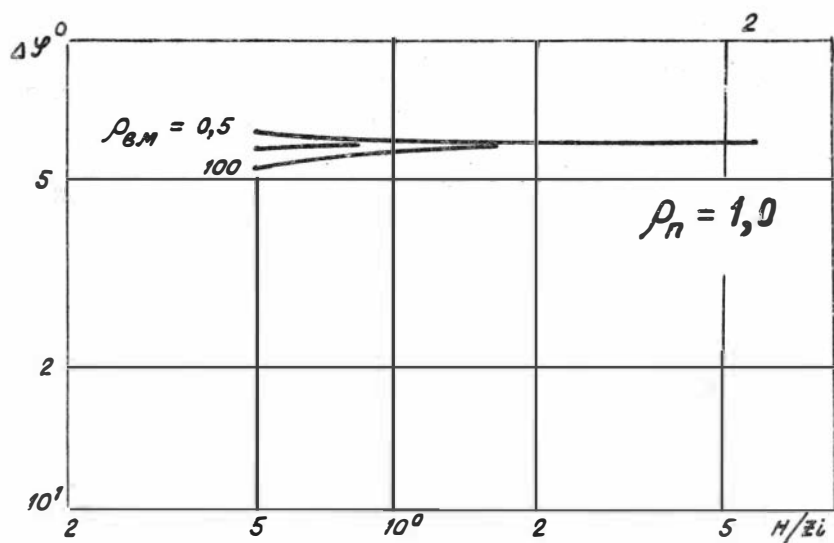
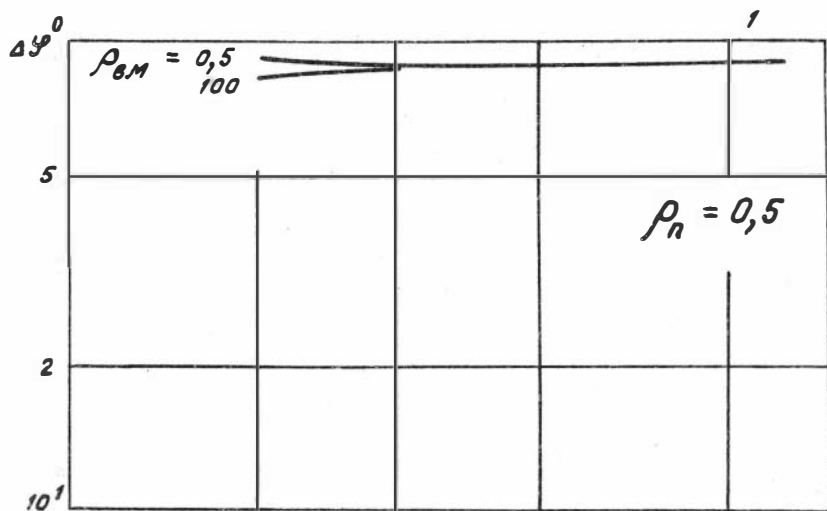
$$\Delta \rho_i = \rho_i \Delta Z_i / Z_i.$$

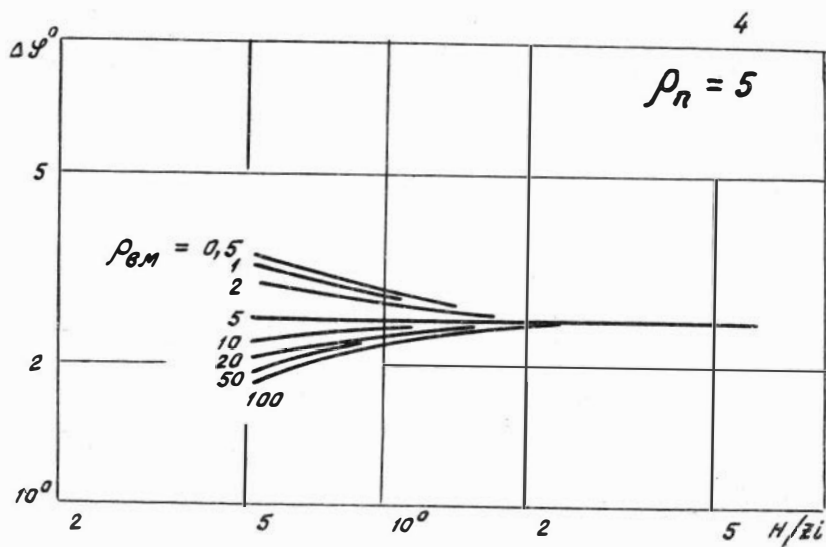
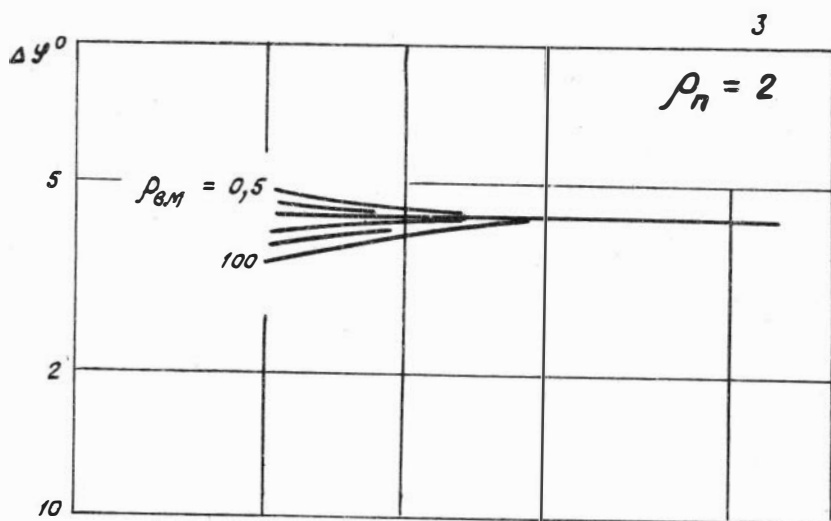
Для определенных выше величин изопараметров зондов ВИКИЗ разность фаз имеет следующую связь с удельным сопротивлением однородной среды.

ρ	0,25	0,35	0,5	0,7	1,0	1,5
$\Delta \varphi^\circ$	126,4	106,4	88,5	74,25	61,5	49,43
ρ	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	11
$\Delta \varphi^\circ$	42,2	33,56	28,40	22,25	18,60	15,24
ρ	16	23	32	45	64	90
$\Delta \varphi^\circ$	11,77	9,11	7,152	5,516	4,175	3,159
ρ	128	180	256			
$\Delta \varphi^\circ$	2,348	1,748	1,280			

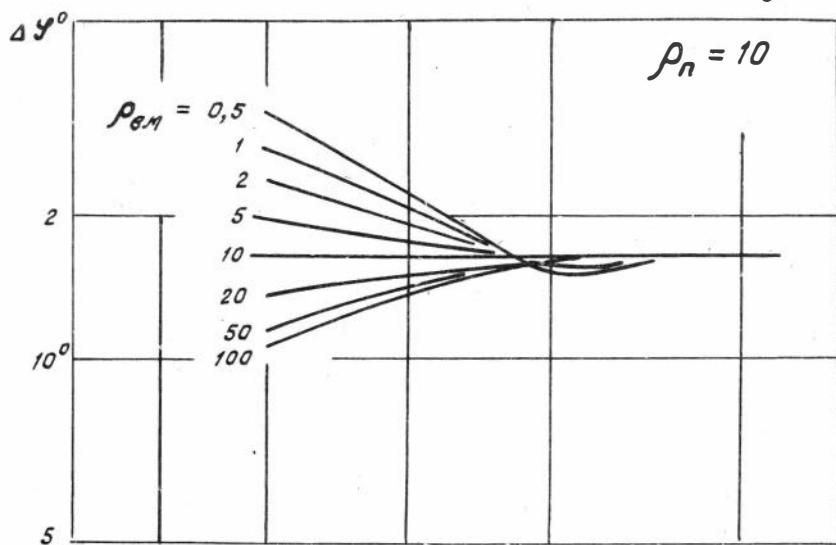
2.1. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОНДОВ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ РАЗМЕЩЕНИИ ТОЧКИ ЗАПИСИ ОТНОСИТЕЛЬНО ГРАНИЦ ПЛАСТОВ

На графиках рис. 1-32 представлены вертикальные характеристики изопараметрических зондов. Зонды расположены против пласта так, что центр между измерительными катушками зондов (центр базы) размещен равноудаленно от границ пласта, т.е. против центра пласта. На рисунках изображены данные моделирования различных относительных характеристик: $\Delta\varphi$, $|\Delta h/h_1|$, $|\Delta h/h_2|$ и $|h_1/h_2|$. Ось абсцисс всех графиков соответствует значениям отношения мощности пласта H к длине изопараметрического зонда Z_L . Шифром кривых является удельное сопротивление вмещающей среды ($\rho_{\text{вм}}$) при равных значениях выше и ниже границ пласта. Модуль графиков на всех рисунках - удельное сопротивление пласта ($\rho_{\text{п}}$). Численные значения правых асимптот кривых для разности фаз приведены в таблице, помещенной во вводной части этого раздела (2) - неоднородные среды.

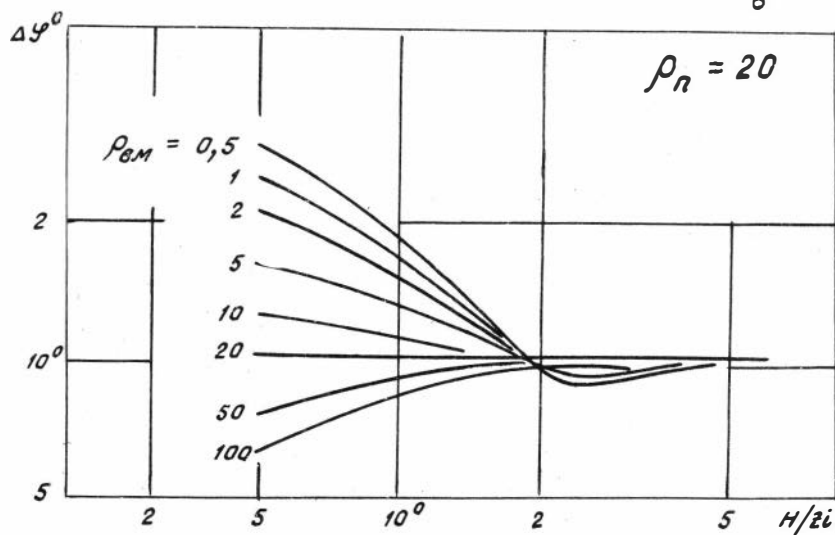


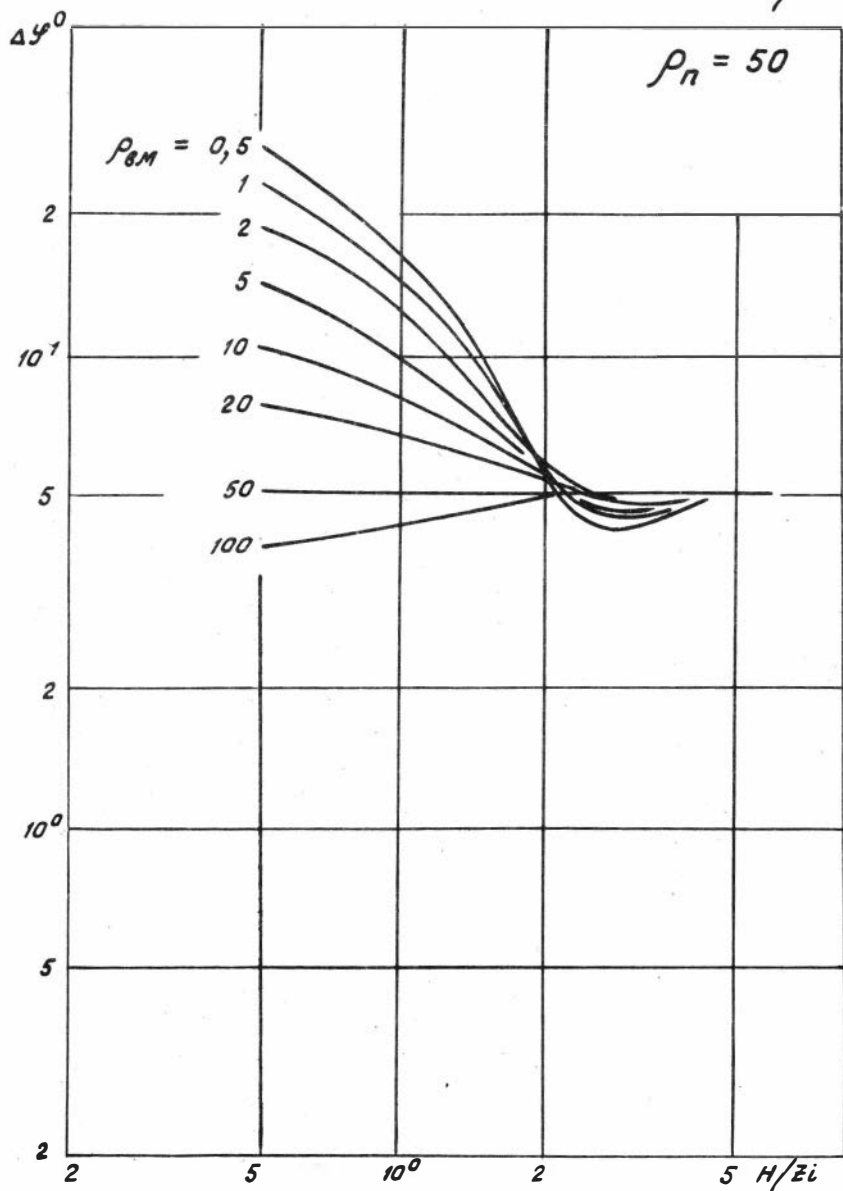


5

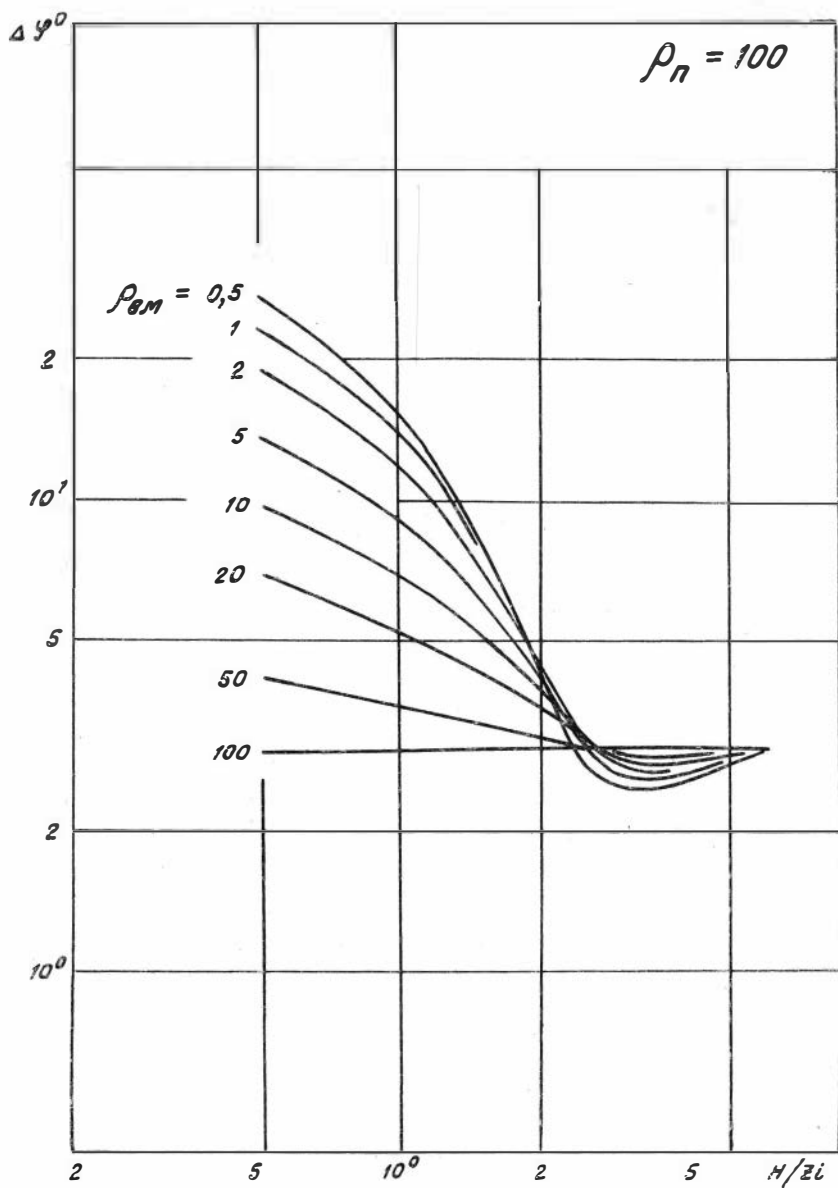


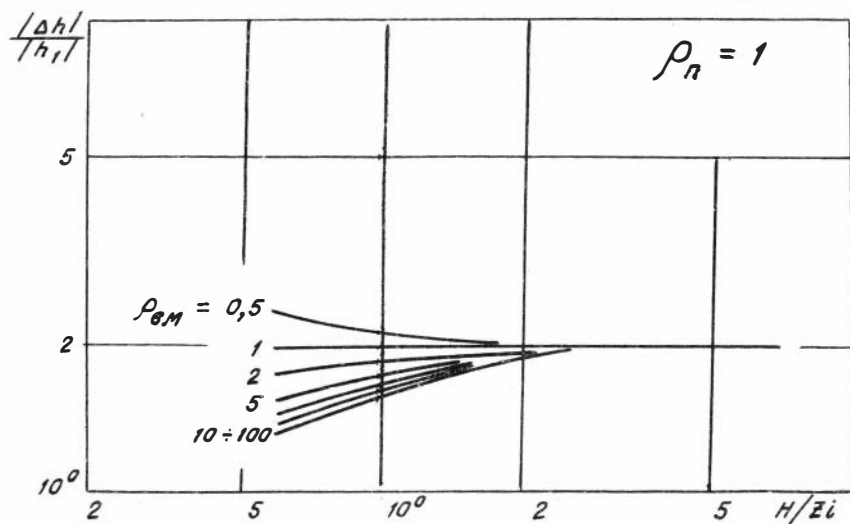
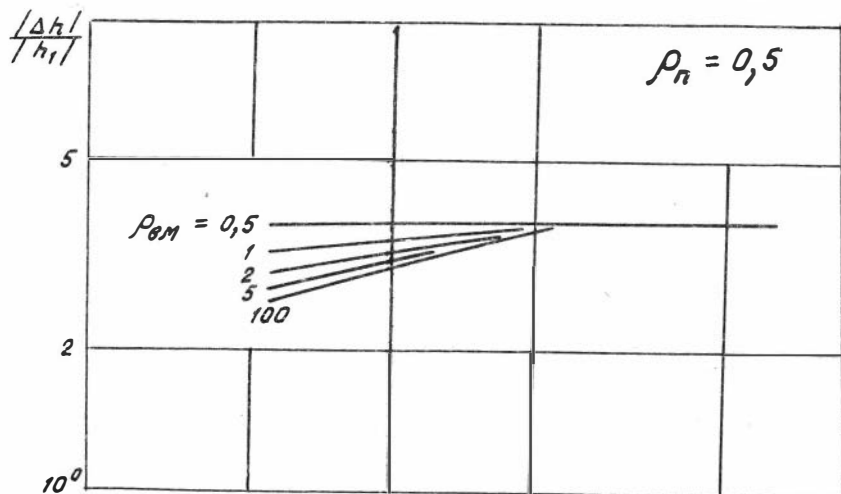
6

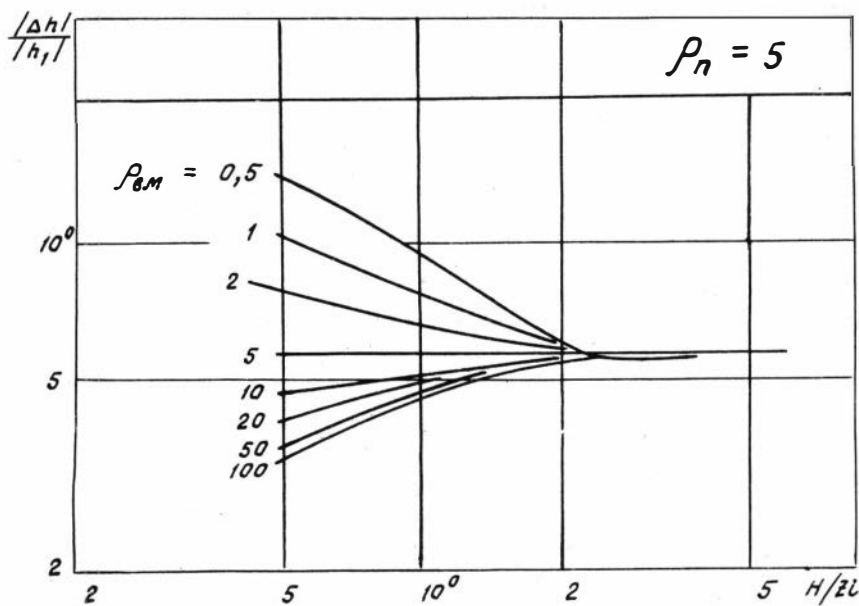
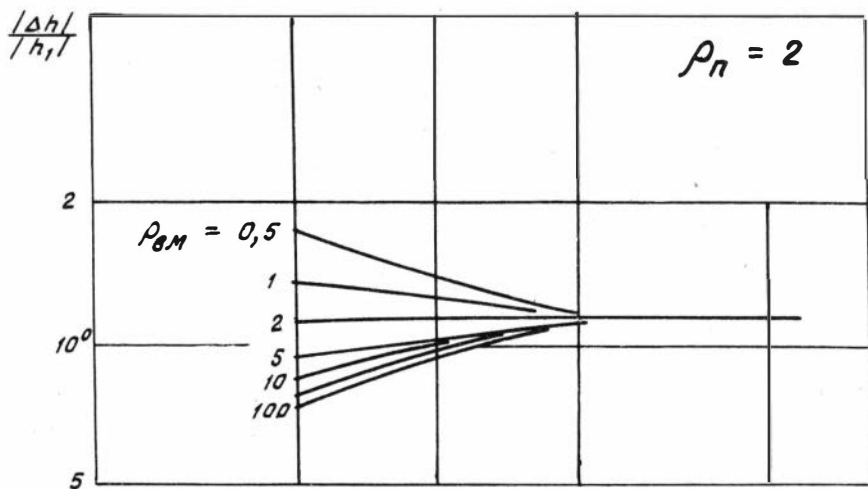


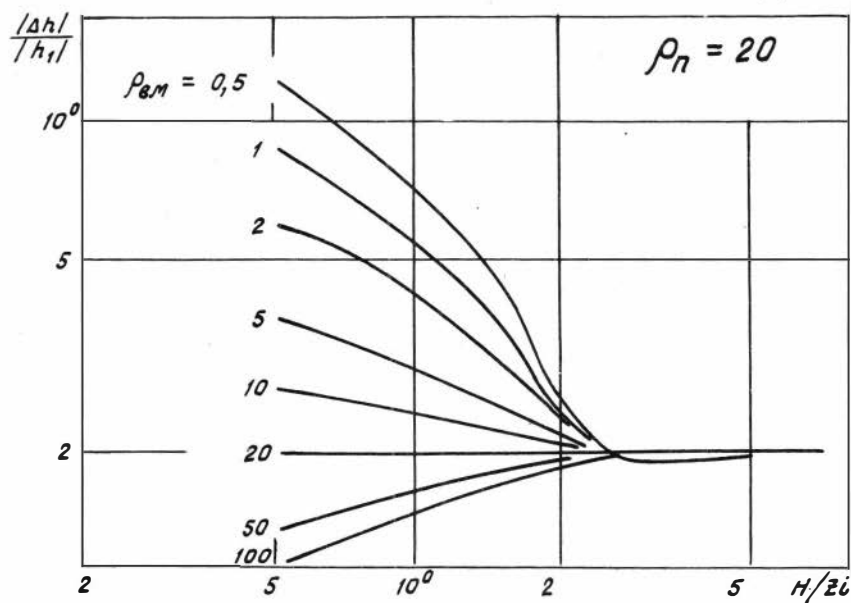
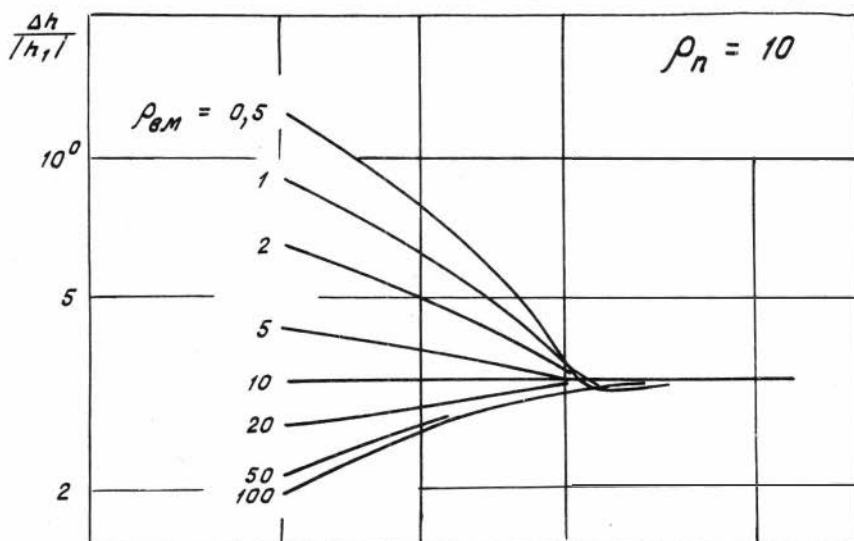


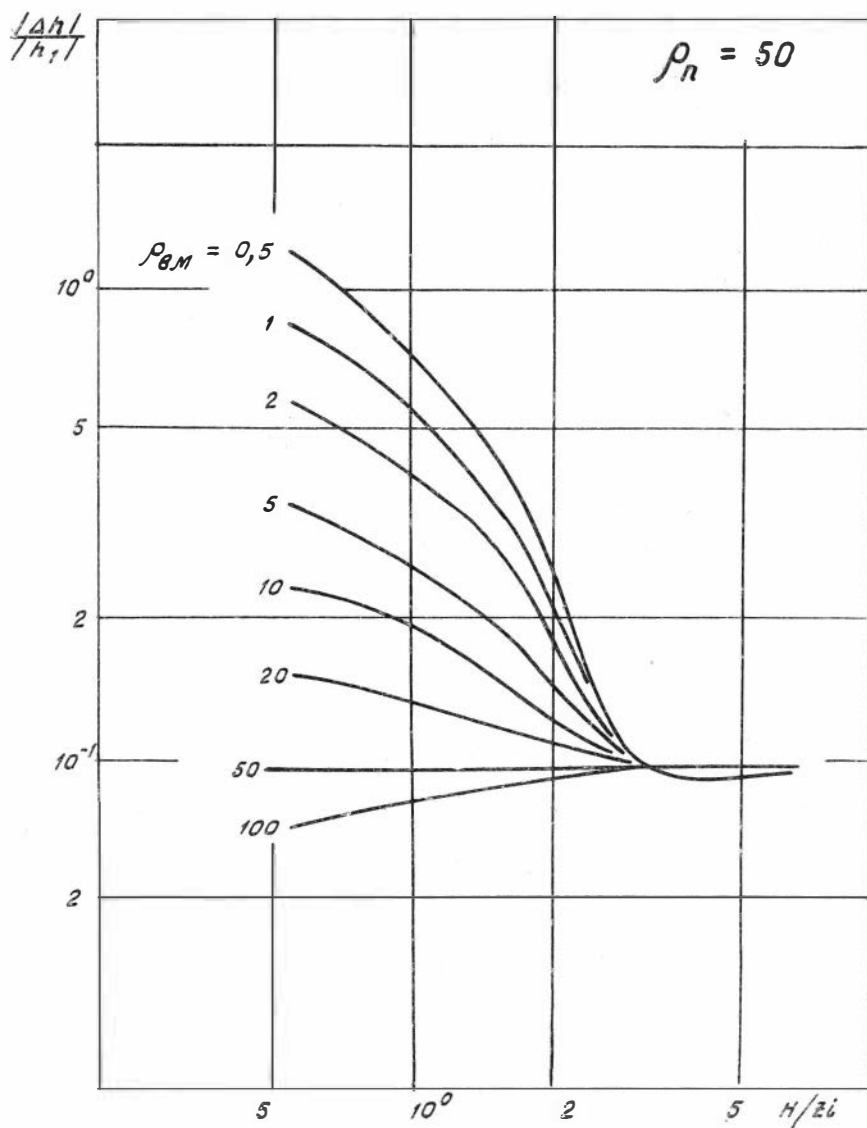
$$\rho_n = 100$$

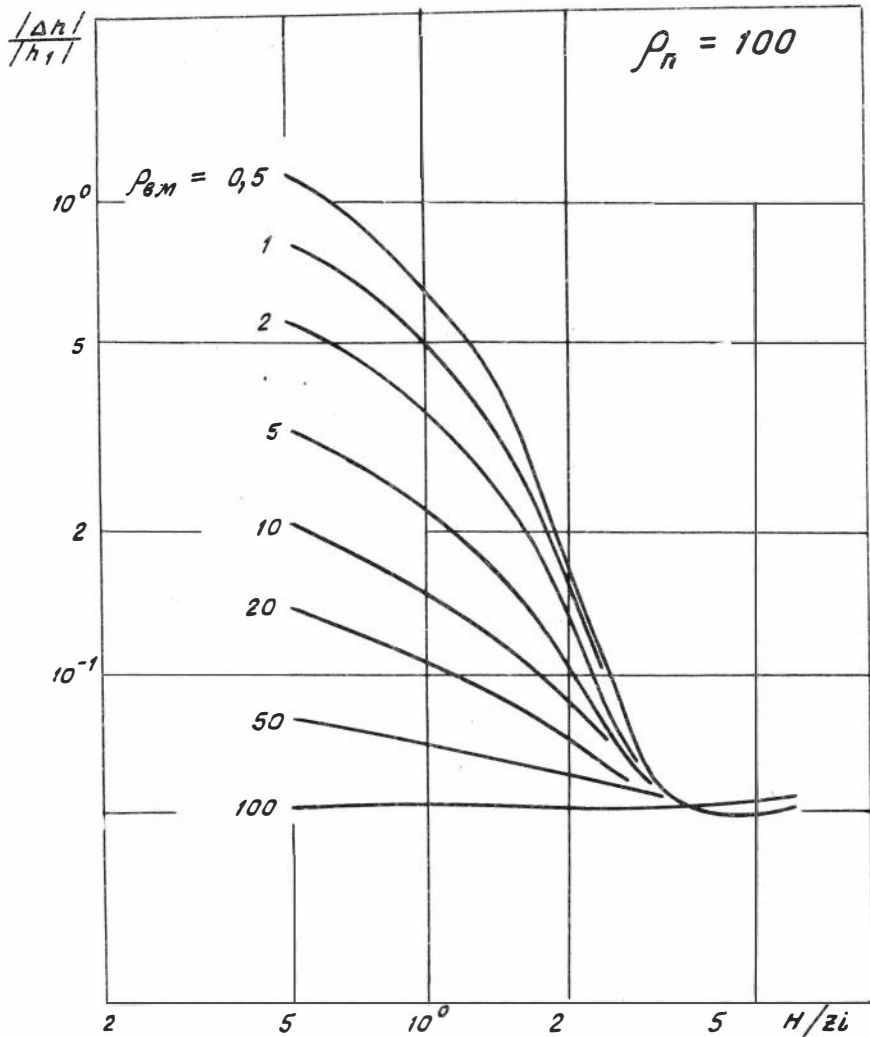




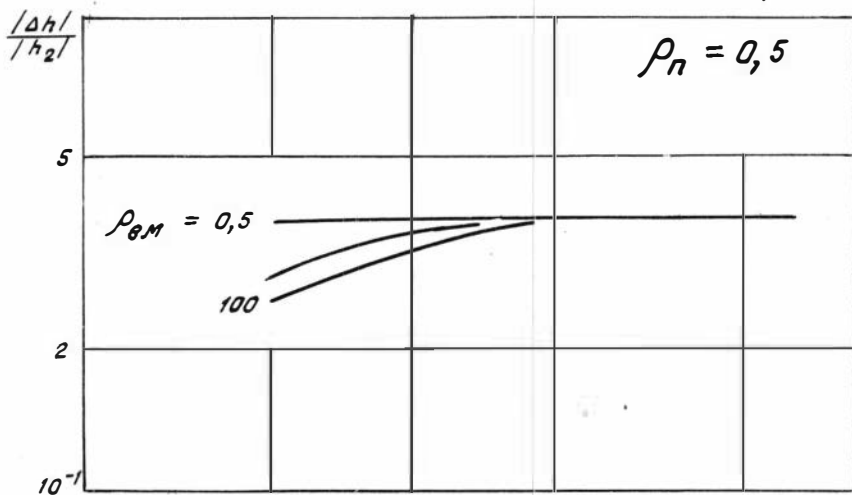




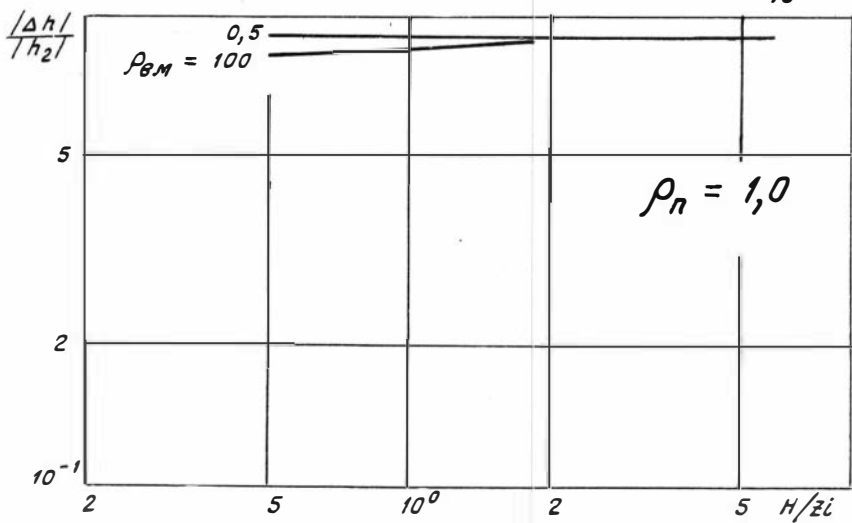


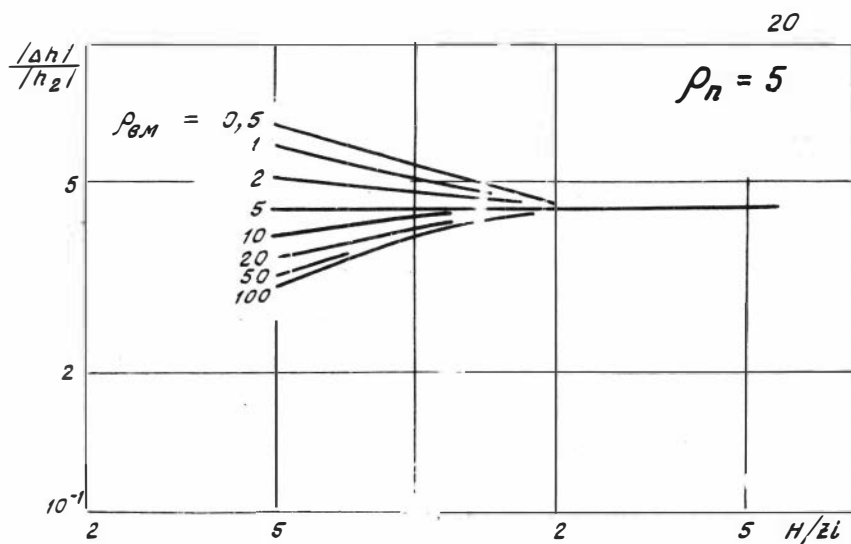
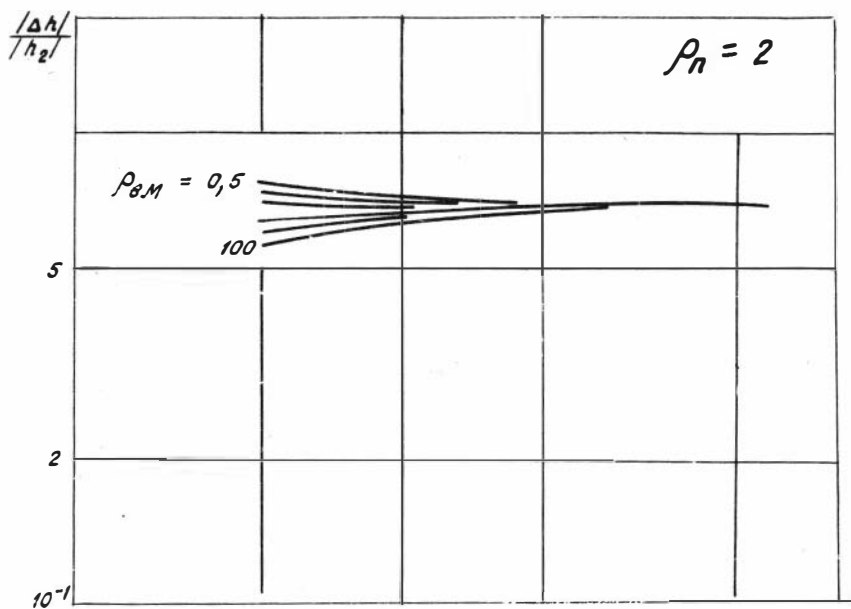


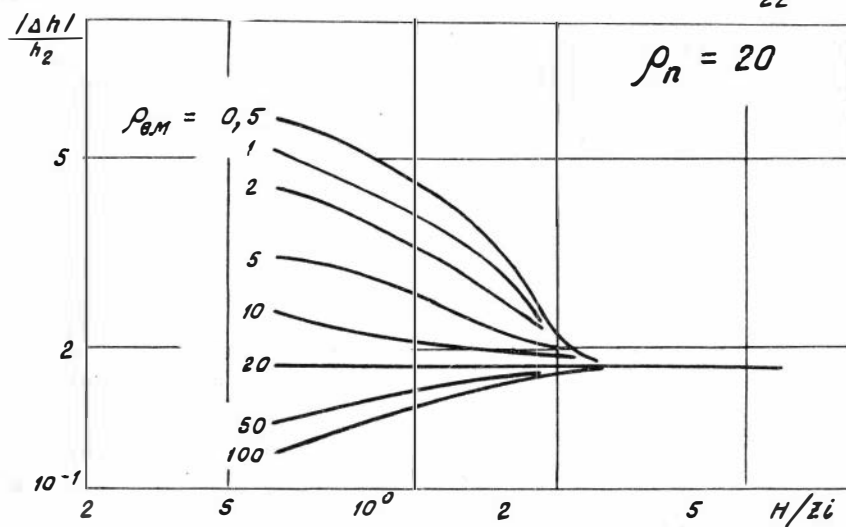
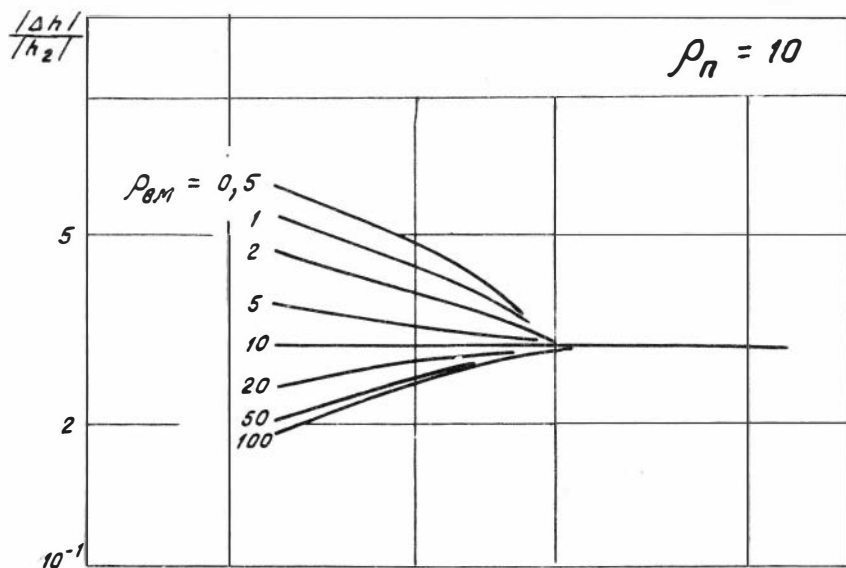
17

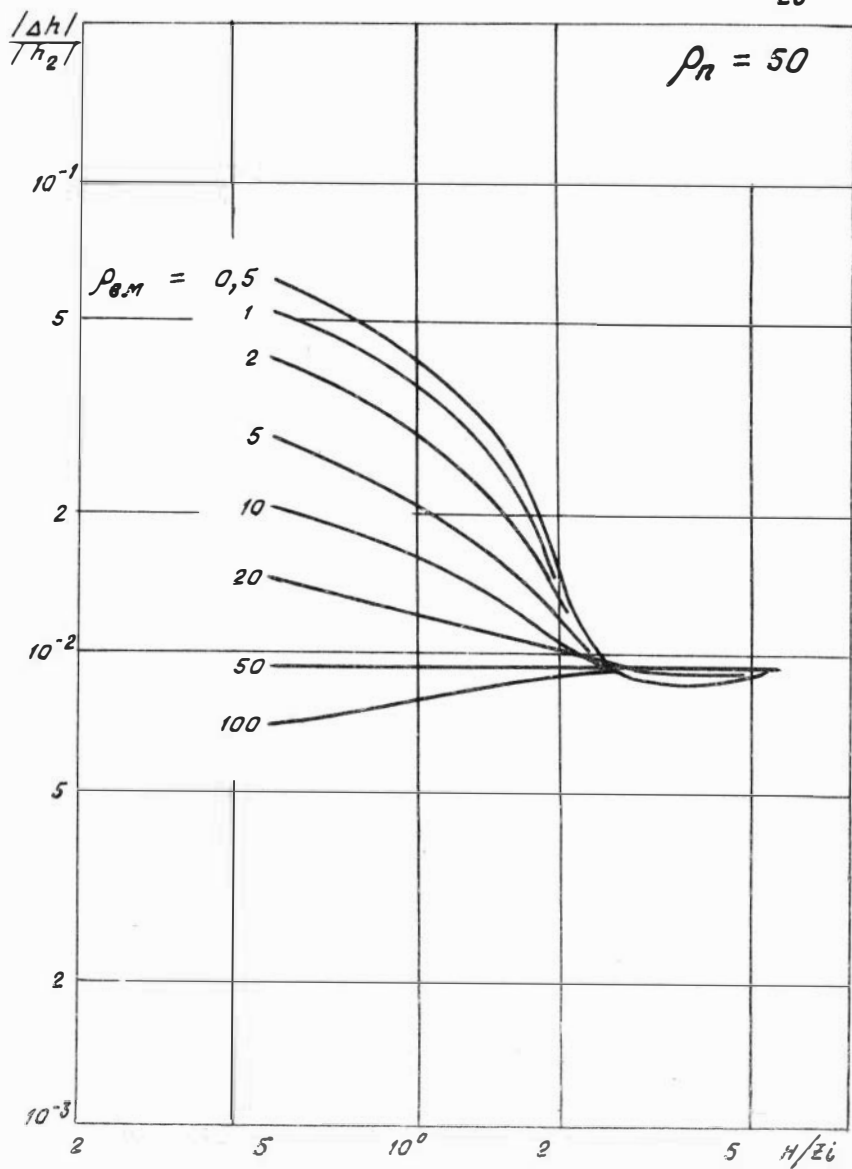


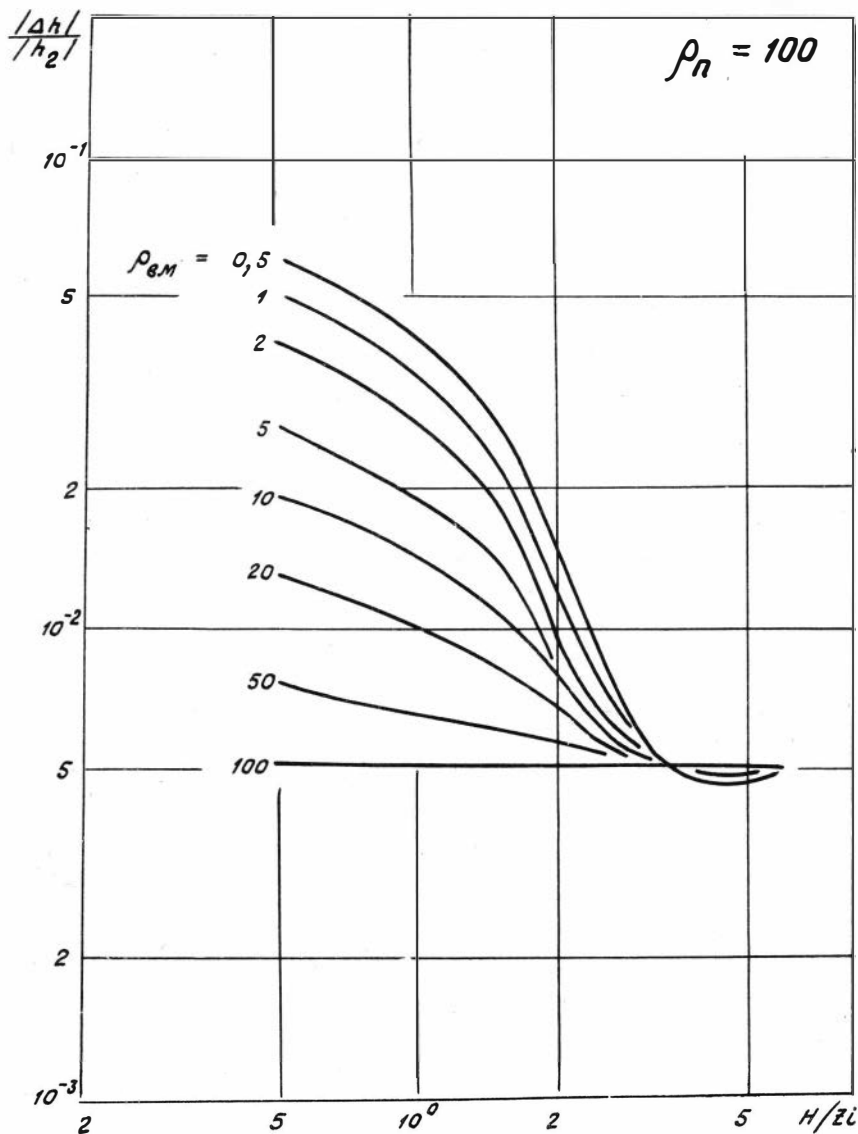
18



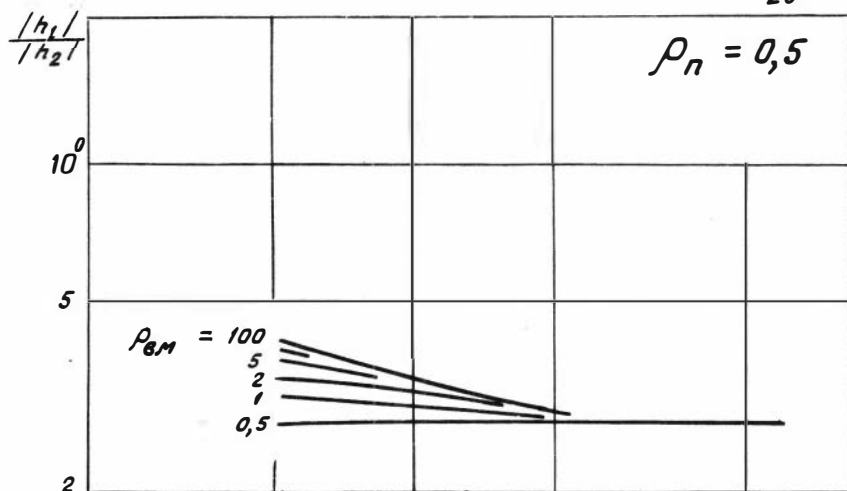




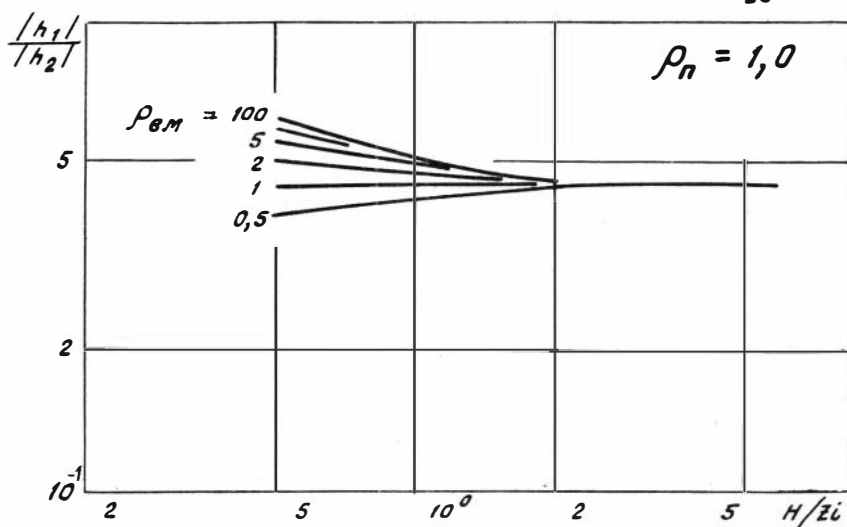


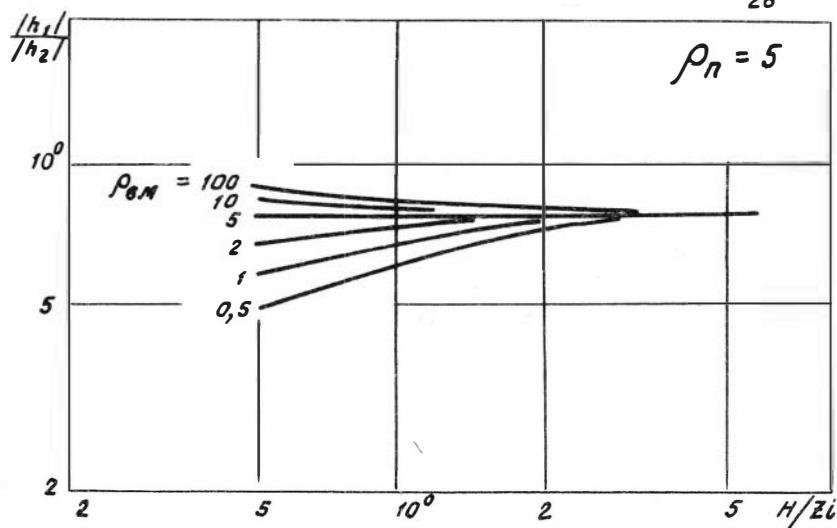
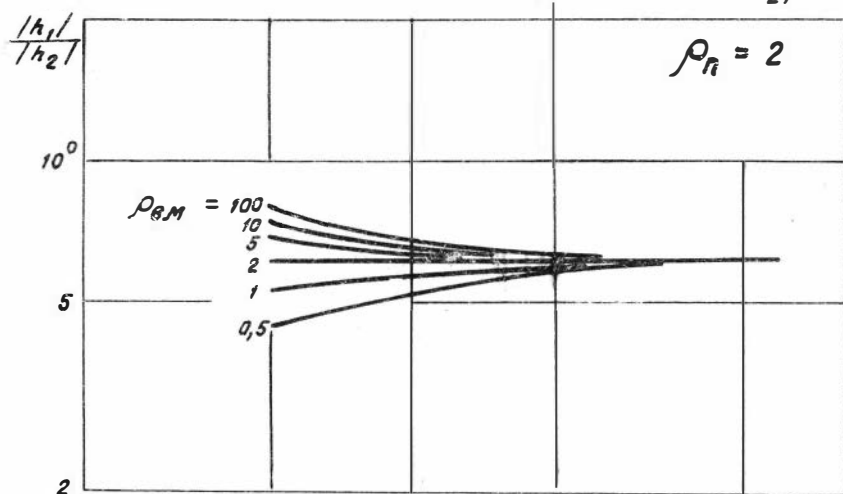


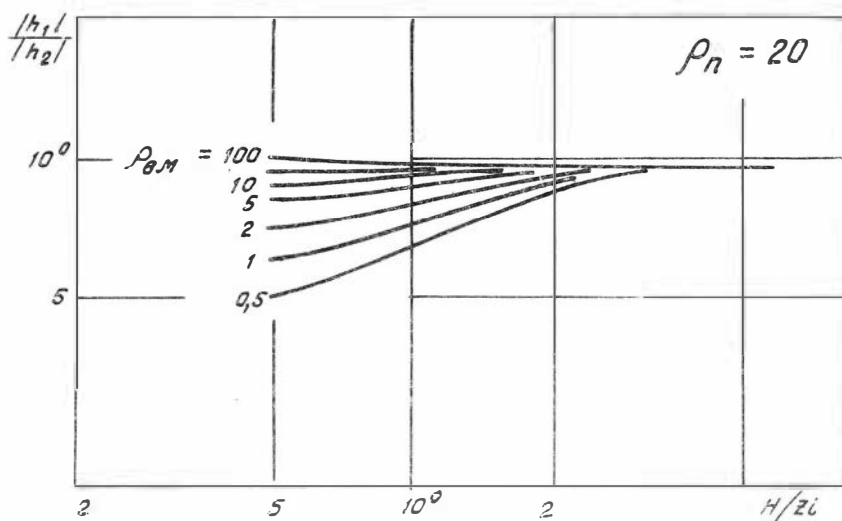
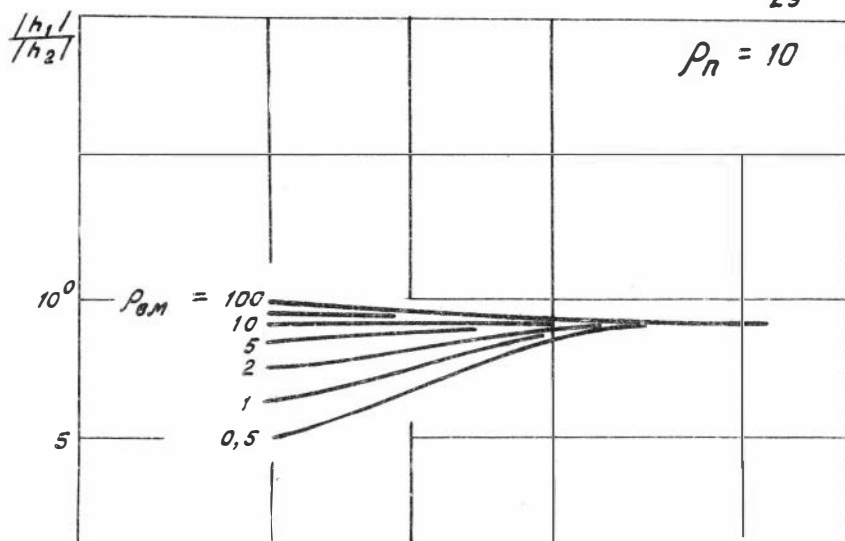
25



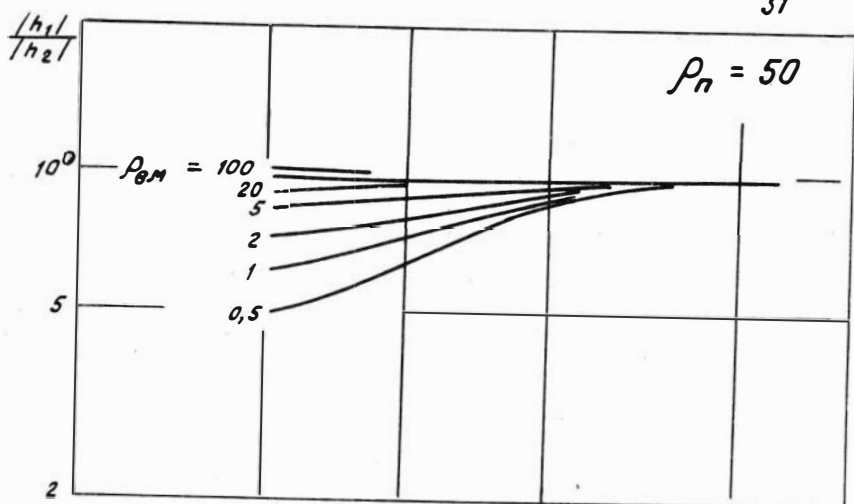
26



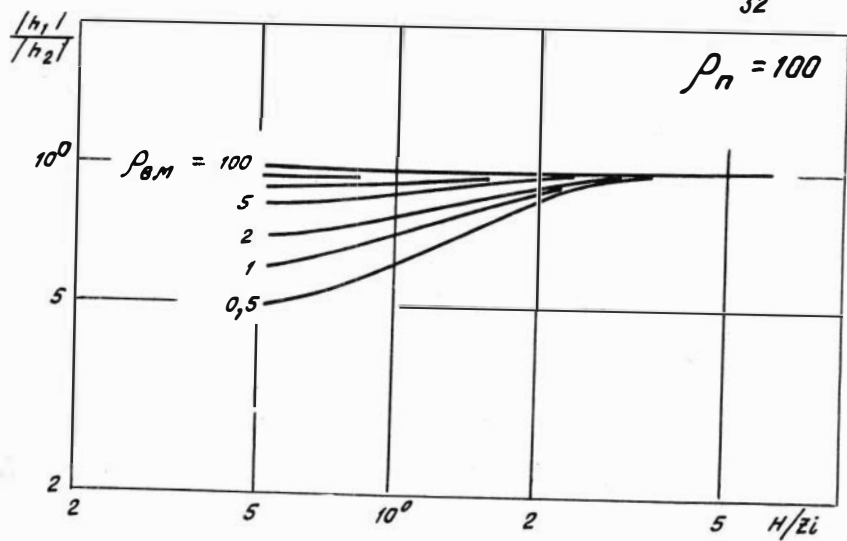




31



32



2.2. КРИВЫЕ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПЛАСТОВ ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ

На рис. 33, а, б приведены кривые профилирования для модели пласта четырехметровой мощности. Смоделирован высокоомный (а) и низкоомный (б) пласты относительно вмещающих сред. Данные зондов следующие: $Z_1 = 0,5$ м, $Z_2 = 1,0$ м, и $Z_3 = 1,8$ м и соответственно $f_1 = 10$ МГц, $f_2 = 2,5$ МГц и $f_3 = 0,77$ МГц. Все кривые "привязаны" к точке записи (центр базы).

Анализ кривых профилирования показывает, что каротажная кривая против пласта достигает асимптотики при следующих условиях в соотношении расстояний между крайними элементами зондов и границами пласта. Влияние вмещающей среды, расположенной ниже пласта, прекращается в момент перехода генераторной катушкой зонда "подошвы" пласта и перемещения ее выше от границы раздела на расстояние, равное длине измерительной базы. При этом расстояние между "кровлей" пласта и крайней измерительной катушкой зонда должно быть не менее половины длины зонда. Отсюда видно, что при $H/Z_i = 1,75$ показания зонда совпадают с истинным удельным сопротивлением пласта.

Такие характерные количественные соотношения между длинами зондов и расстояниями от границ пласта до экстремальных асимптотических показаний кривых профилирования распространяются на все зонды ВИКИЗ. Асимметрия экстремумов кривых профилирования относительно центра пласта одинакова для всех зондов ($\sim 15-20\%$), если равны относительные значения мощности пластов к длине зонда. Таким образом, вмещающие низкоомные породы не оказывают влияния на измерение электропроводности высокоомного пласта, если его мощность, по меньшей мере, в два раза больше длины зонда. Аналогичный вывод справедлив и для низкоомных пластов (рис. 33, б).

Отличительной особенностью кривых профилирования, полученных зондами ВИКИЗ против однородного пласта ($H/Z_i = 2$), является то, что совмещенные кривые проходят через границы пласта в одной точке (см. рис. 33).

На рис. 34, а, б, в, г, д приведены кривые профилирования пластов различной мощности и различного удельного сопротивления. Моделирование выполнено строгим математическим расчетом для всех

изопараметрических зондов ВИКИЗ. Прямоугольные графики (штриховые линии) отображают истинные электрические параметры пластов. Так, зона перехода от низкого удельного сопротивления к относительно высокому приведена в нижней части рисунков ($H = 3,5 \text{ м}$, $2 < \rho < 32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). На этом интервале можно отметить плавный выход всех кривых относительно шкалы удельных сопротивлений. В высокоомном пласте ($H = 6 \text{ м}$, $\rho = 32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) все зонды выходят на номинальные значения близко от "подожвы" пласта, при этом в середине пласта "отбивается" высокоомный тонкий пропласток ($H = 0,5 \text{ м}$, $\rho = 64 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Не останавливаясь на всех деталях кривых профилирования, отметим два момента.

1. При пересечении подошвы пласта высокого удельного сопротивления кривая профилирования искажена низкоомным подстилающим пластом. Размер искажения совпадает по вертикали с длиной зонда, а искажение кривой тем больше, чем выше контрастность удельных сопротивлений соприкасающихся пластов.

2. Пачка тонких пластов с чередующимся изменением удельного сопротивления отбивается всеми зондами, если их мощность соизмерима с размером базы. При этом кривая профилирования дает среднее значение удельного сопротивления пачки, выделяя все низкоомные и высокоомные пропластки - эффект экранирования отсутствует.

На рис. 34,е сопоставляются кривые профилирования двух зондов: самого короткого и самого длинного. Совмещенные кривые отчетливо иллюстрируют влияние ограниченной мощности пластов, которое в наибольшей мере отражается на кривой профилирования, соответствующей длинному зонду (2 м).

В заключение отметим, что центральные кривые (рис. I-32) не могут быть оптимальными для составления палеток для внесения поправок в результаты измерений в пластах ограниченной мощности. Это обусловлено тем, что экстремумы кривых против пластов смещены от центров пластов к его кровле (рис. 33-34). Следовательно, палетки, составленные по данным рис. I-34, несколько отличаются от действительных данных (на 5-10%), когда $H \leq Z_i$.

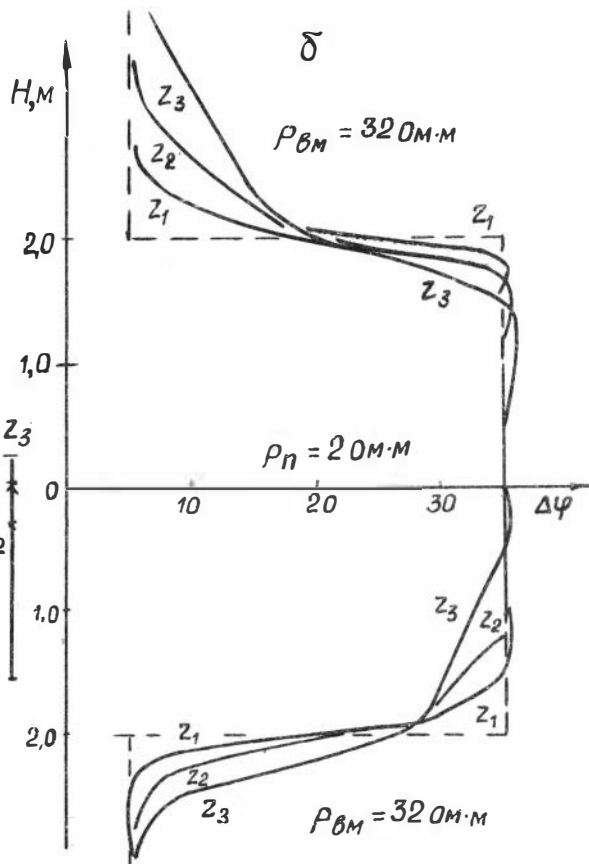
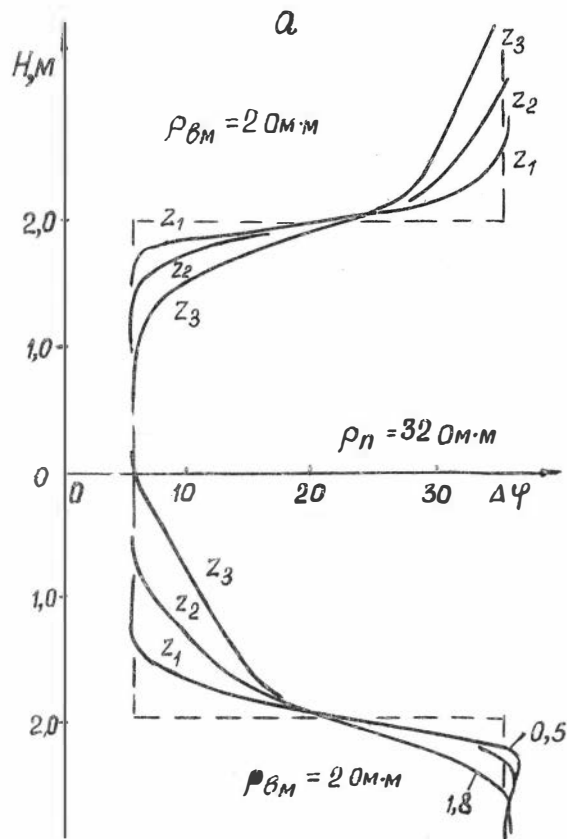


Рис. 33.

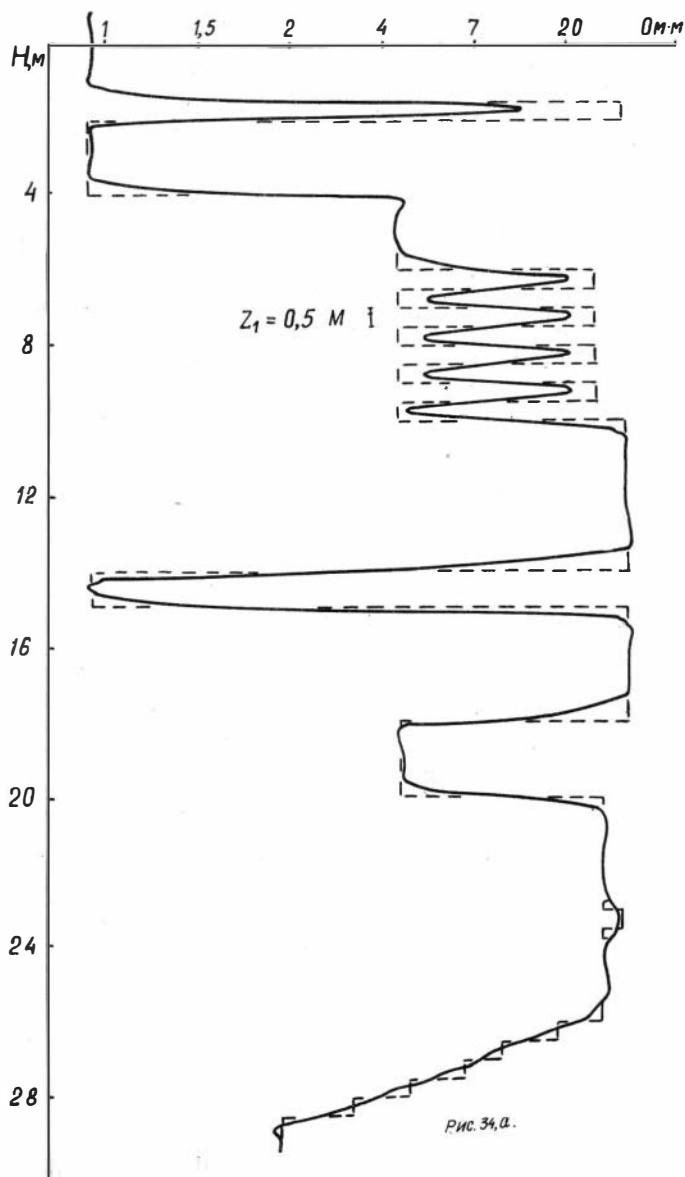
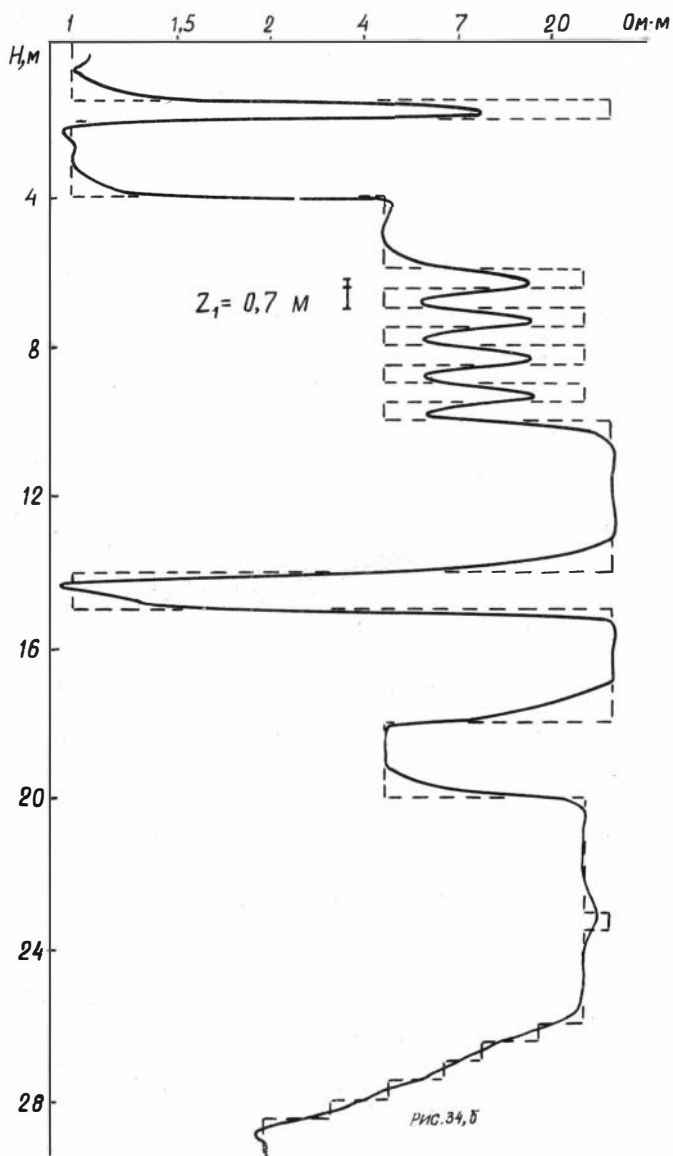
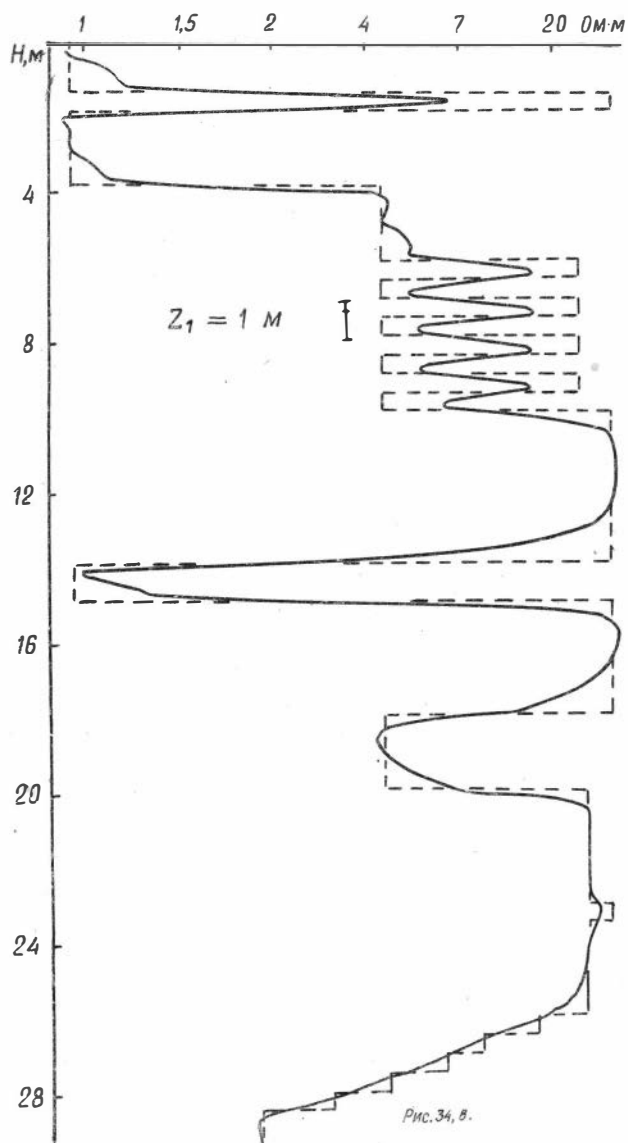
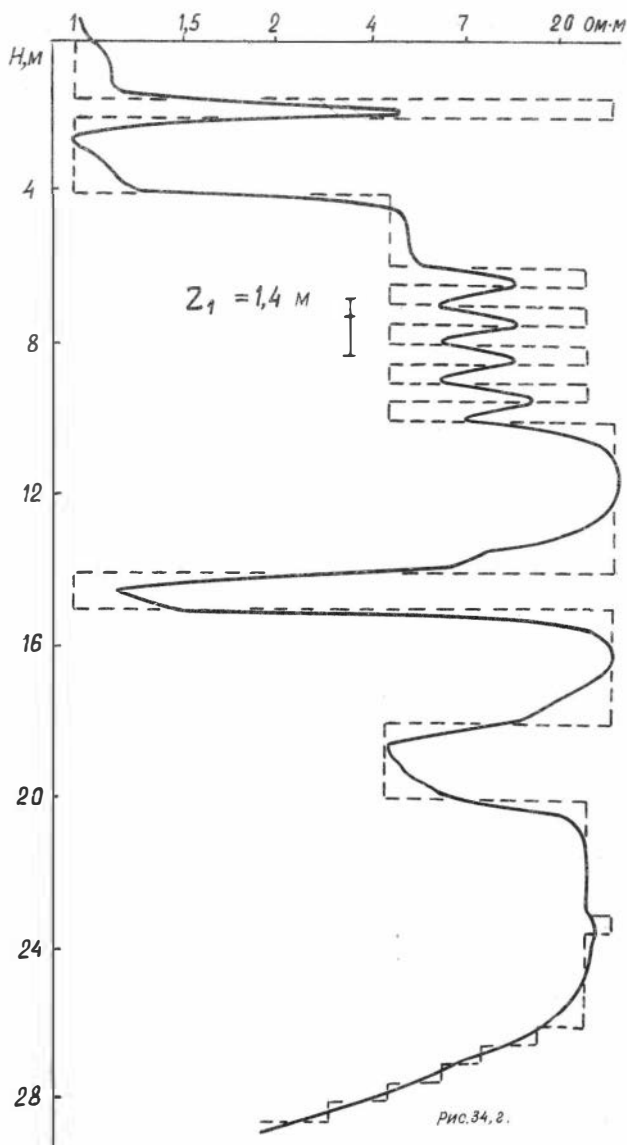
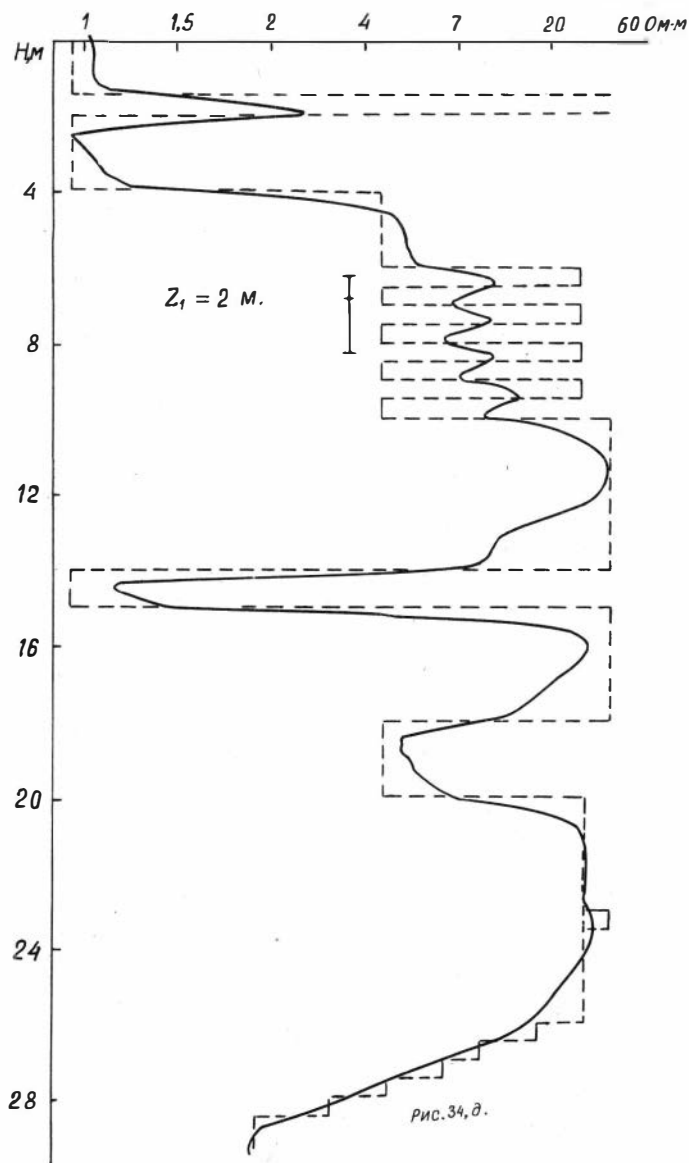


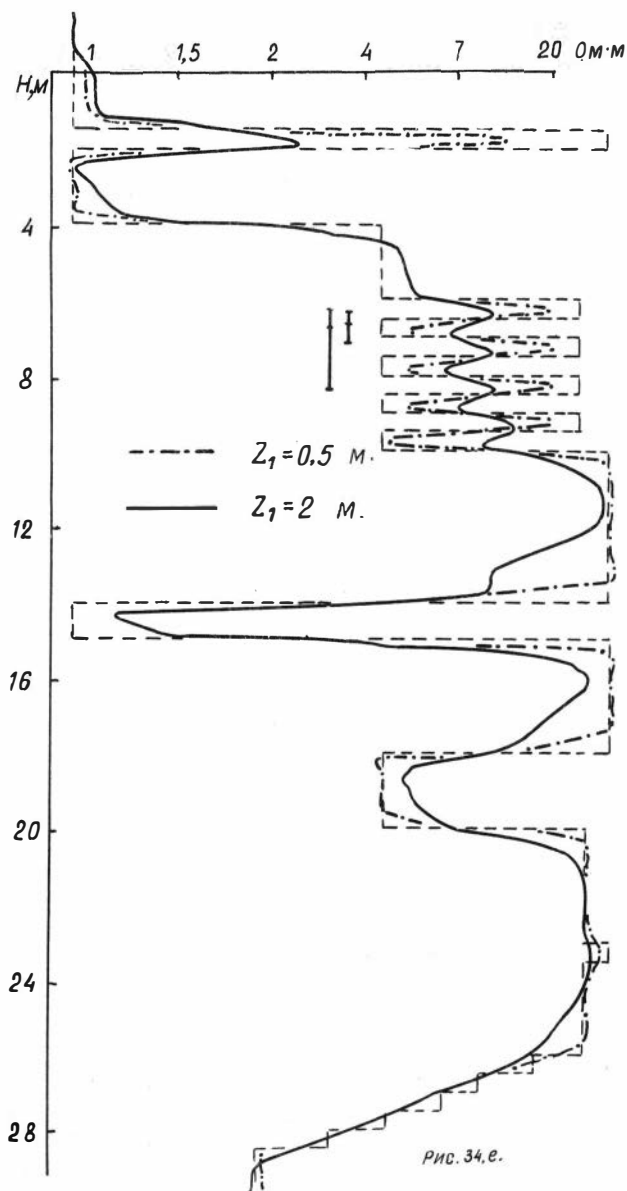
Рис. 34, а.











3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ НА ОСИ КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА

В этом разделе представлены материалы, отражающие зависимость различных характеристик электромагнитного поля от радиальных неоднородностей электропроводности, осесимметричных относительно оси зондов. В частности, исследованы параметры скважин как помехи при изучении радиальных неоднородностей в пласте, зоны проникновения, зоны пониженных удельных сопротивлений на границе между зоной проникновения и незатронутой проникновением частью пласта и т.п. Таким образом, материалы данного раздела целиком посвящены анализу радиальных характеристик изопараметрических зондов ВИКИЗ.

3.1. ДВУХСЛОЙНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ-СЛОИСТАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Для исследования влияния параметров скважины было выполнено математическое моделирование двухслойной среды с одной цилиндрической границей раздела (модель скважины и пласта неограниченной мощности).

На рис. I-35 представлены результаты моделирования, а в нижеследующей таблице приведены изучавшиеся характеристики электромагнитного поля и номера рисунков, на которых представлены соответствующие графики.

$\Delta \varphi^\circ$	I	2	3	4	5	6	7	Номера рисунков
φ°	8	9	10	11	12	13	14	
$ \Delta h_1 / h_1 $	15	16	17	18	19	20	21	
$ h_1 - h_2 $	22	23	24	25	26	27	28	
$ h_1 $	29	30	31	32	33	34	35	
ρ	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	

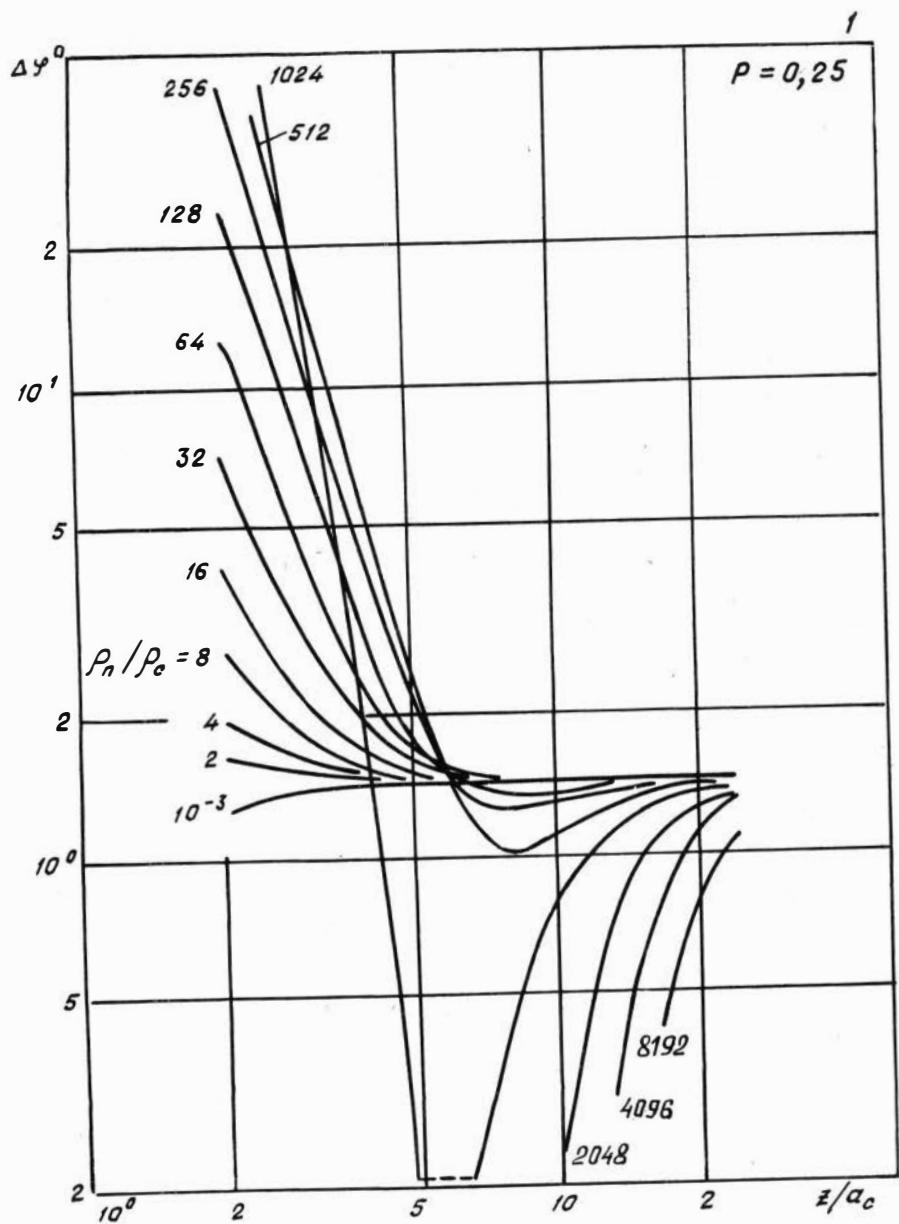
Все характеристики поля представлены в зависимости от отношения длины изопараметрических зондов (Z_i) к радиусу скважины- a_c . Шифр кривых - отношение удельного сопротивления пласта (ρ_n) к удельному сопротивлению скважины (ρ_c), численные значения которого изменяются от 10^3 до 10^{-3} . Входным шифром бланков является безразмерный параметр $\rho = Z_i \sqrt{\frac{\pi \mu \omega i}{2}}$, численные значения которого даны в таблице под номерами соответствующих рисунков.

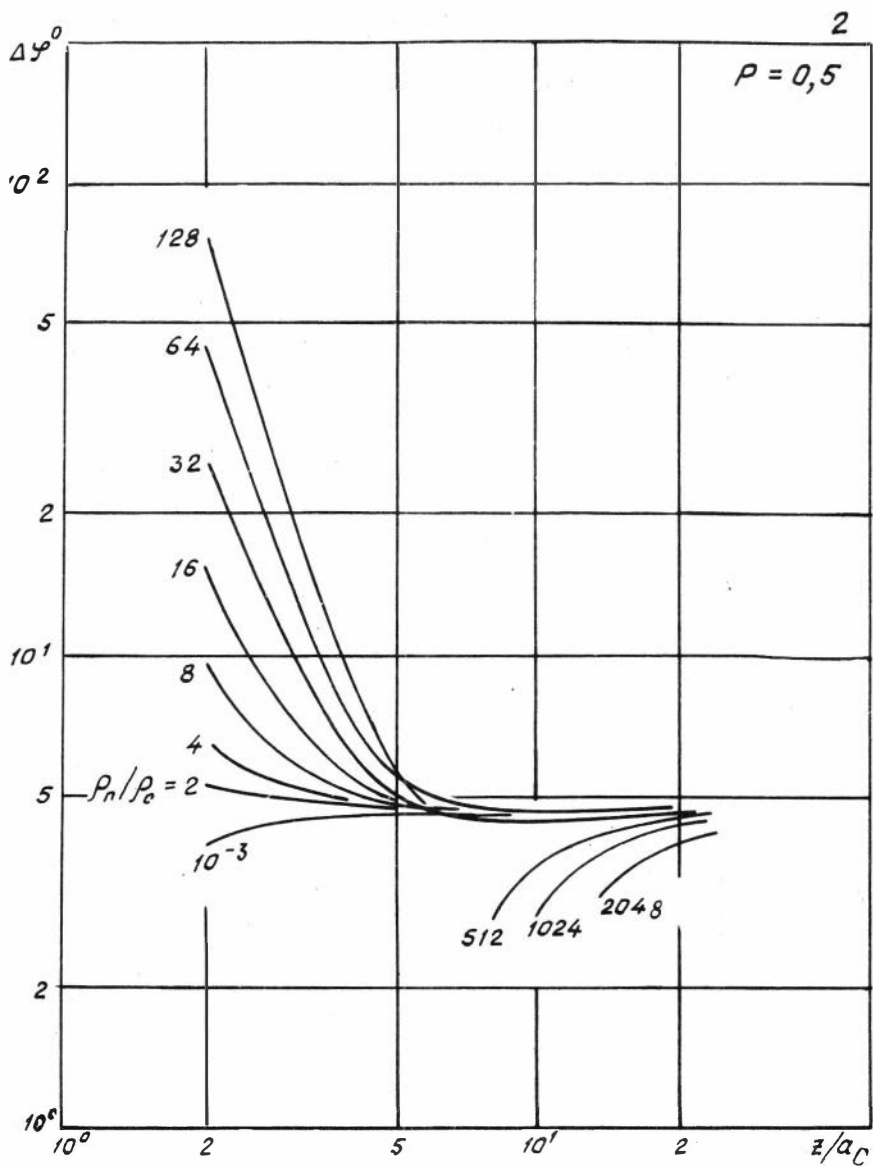
Расчет компонент поля вертикального магнитного диполя на его оси выполнялся по следующему выражению:

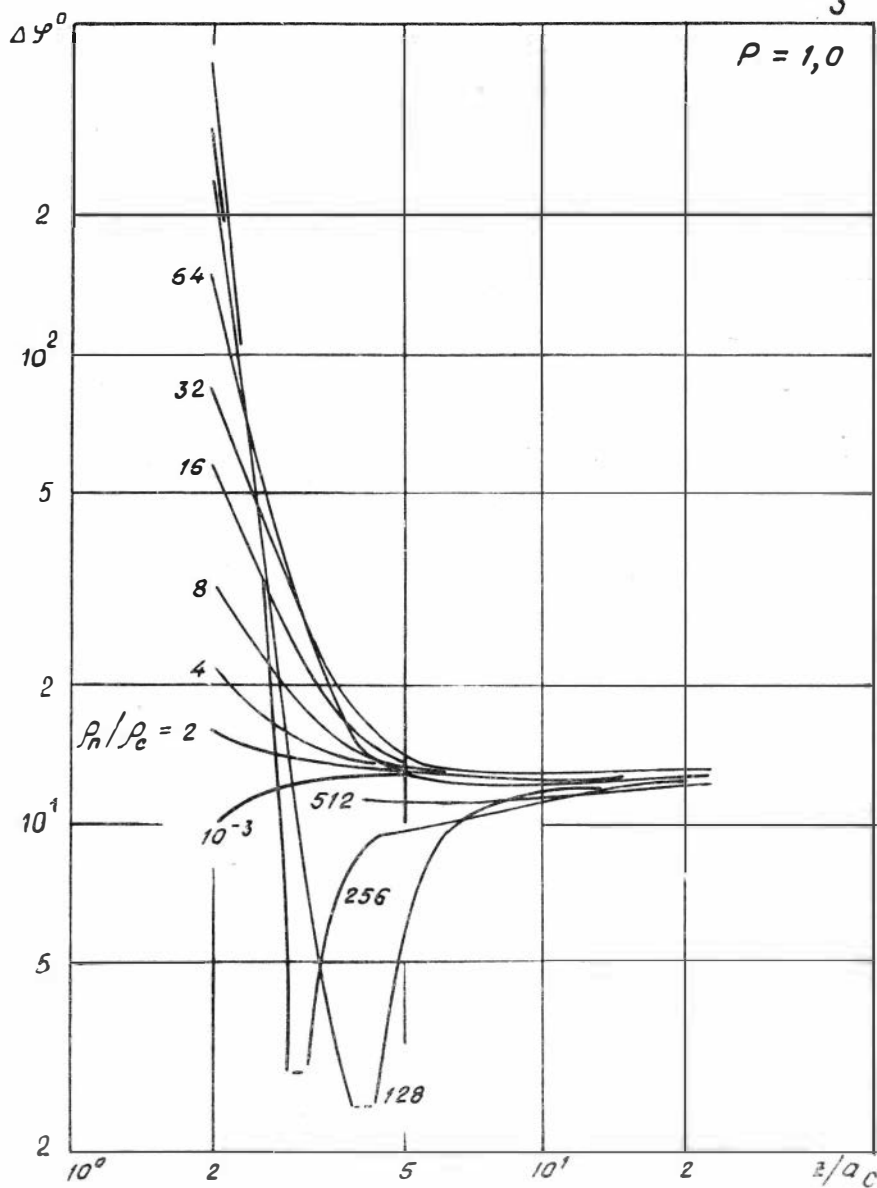
$$h_z = h_z(k, Z) - \frac{Z^3}{\pi} \int_0^{\infty} C_1 \cos \lambda Z d\lambda,$$

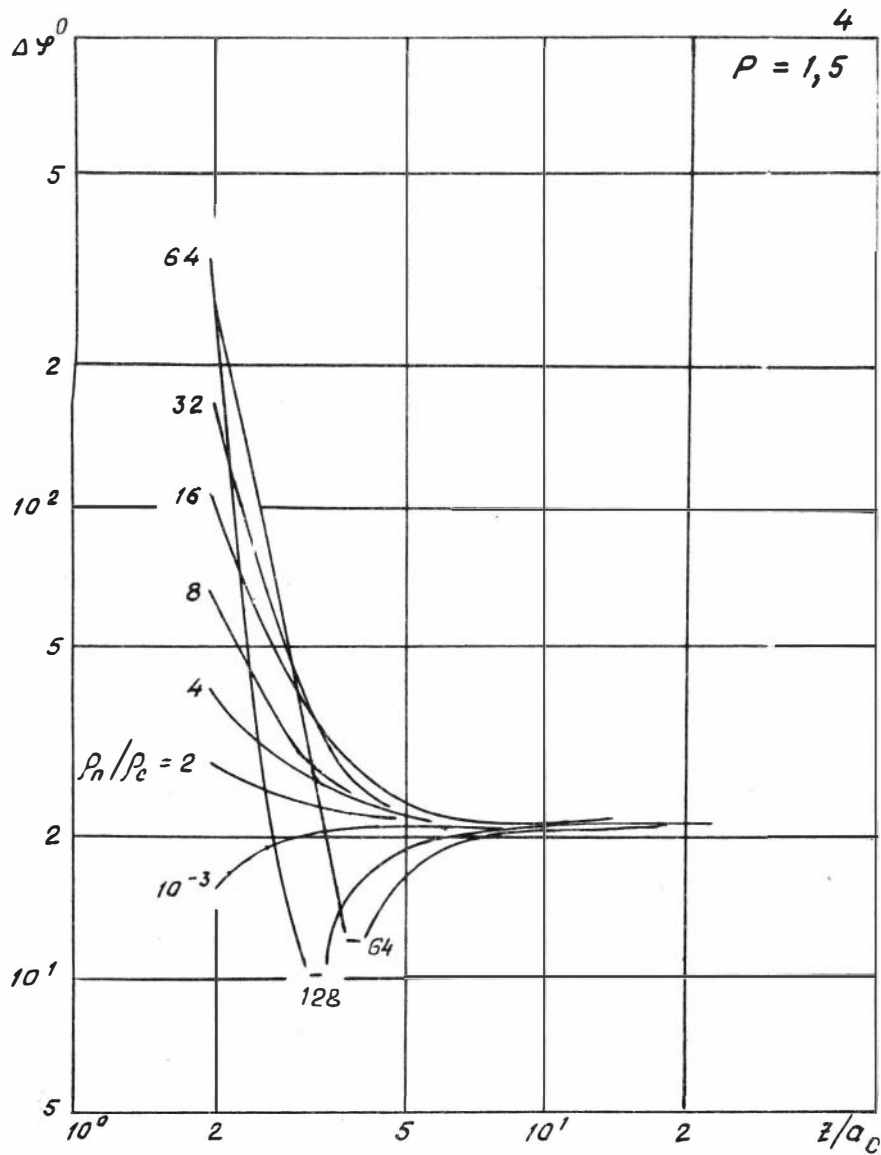
C_1 - комплексная функция параметров среды.

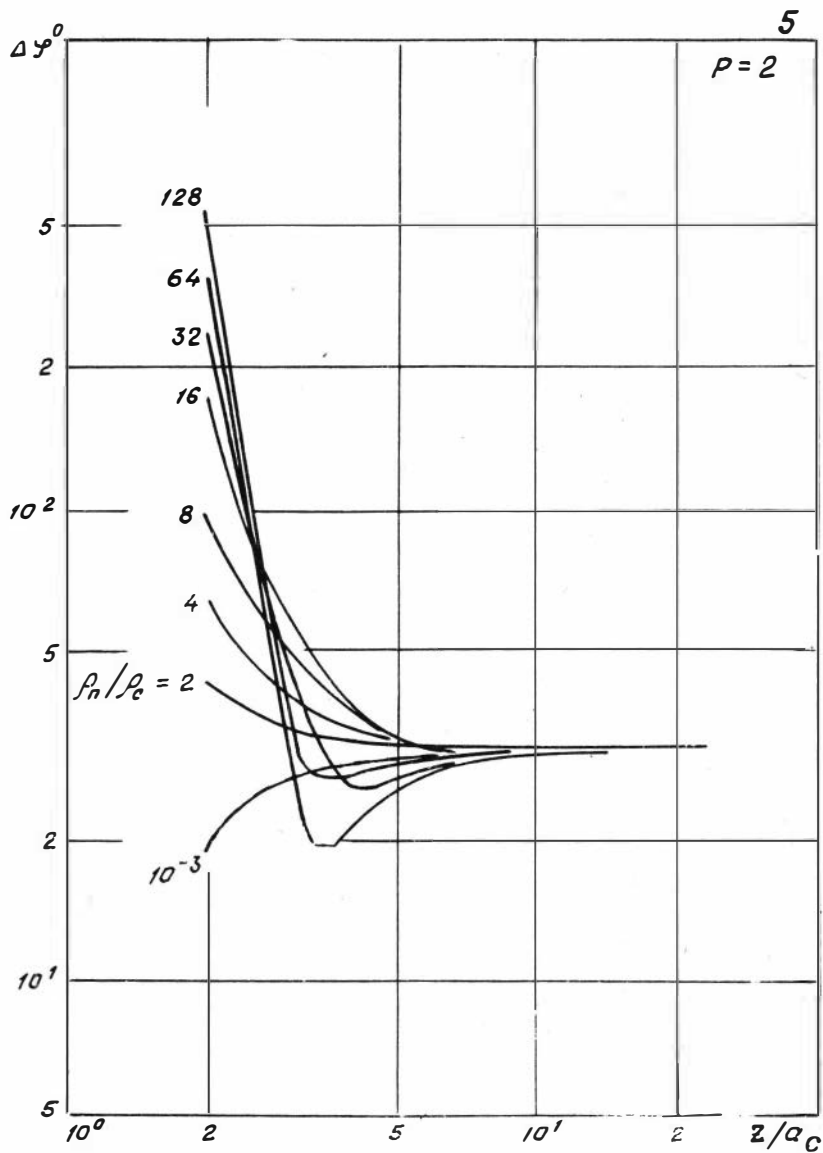
В таблицах приведены расчетные величины соответствующих характеристик поля в функции Z_i/a_c и ρ_n/ρ_c . Численные данные представлены группами. Каждая группа чисел обозначена номером соответствующего рисунка. В таблицах оцифрованы расчетными числами три точки на каждой кривой. Эти точки - координаты на оси длин зондов со значениями $Z_i/a_c = 4, 10, 18$.

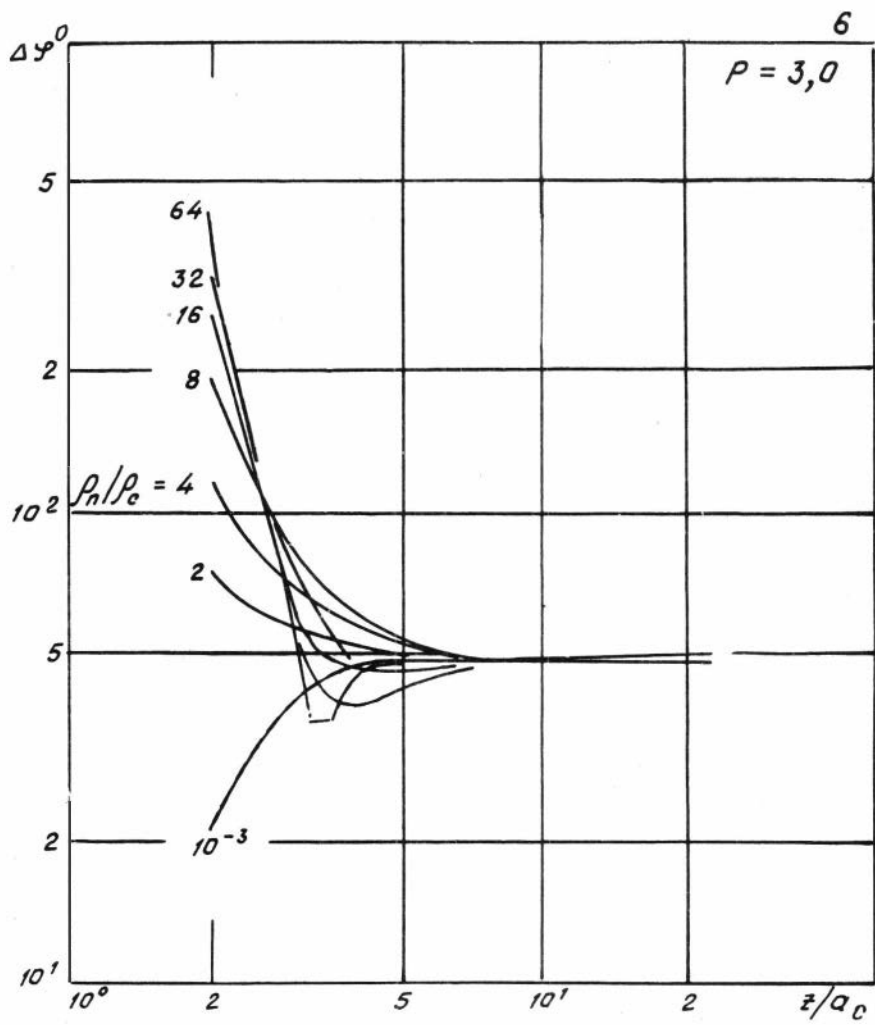












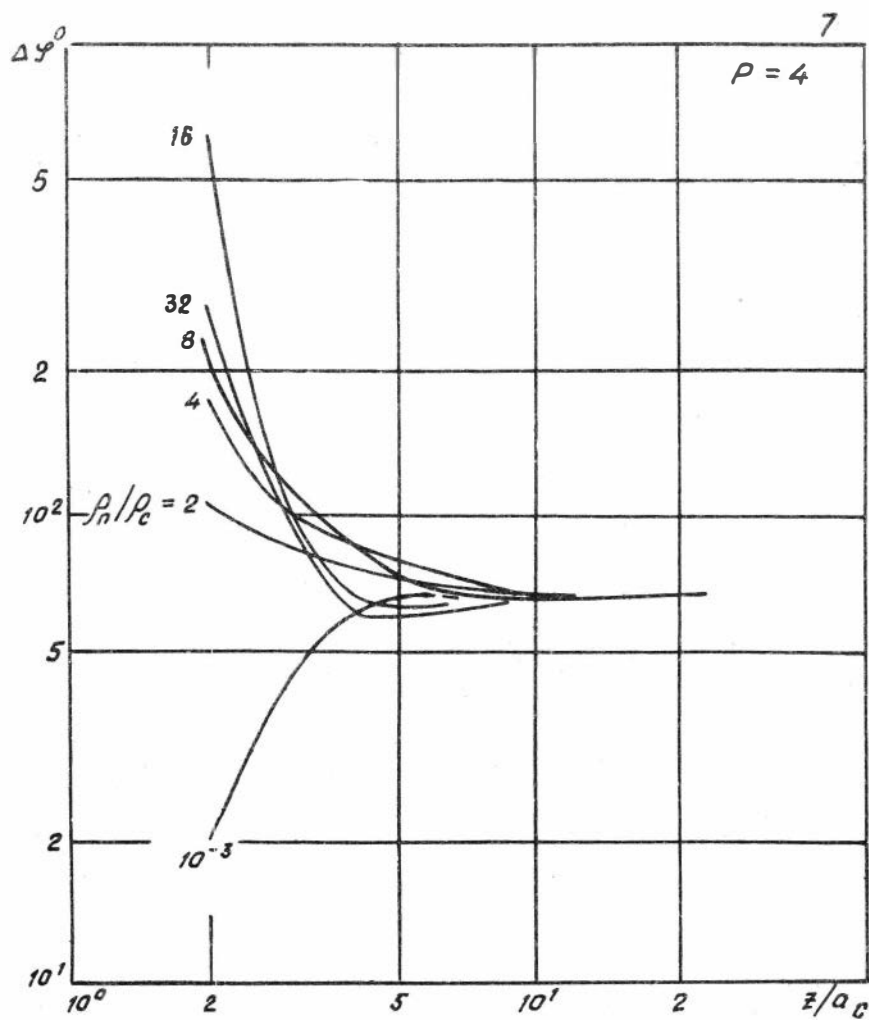
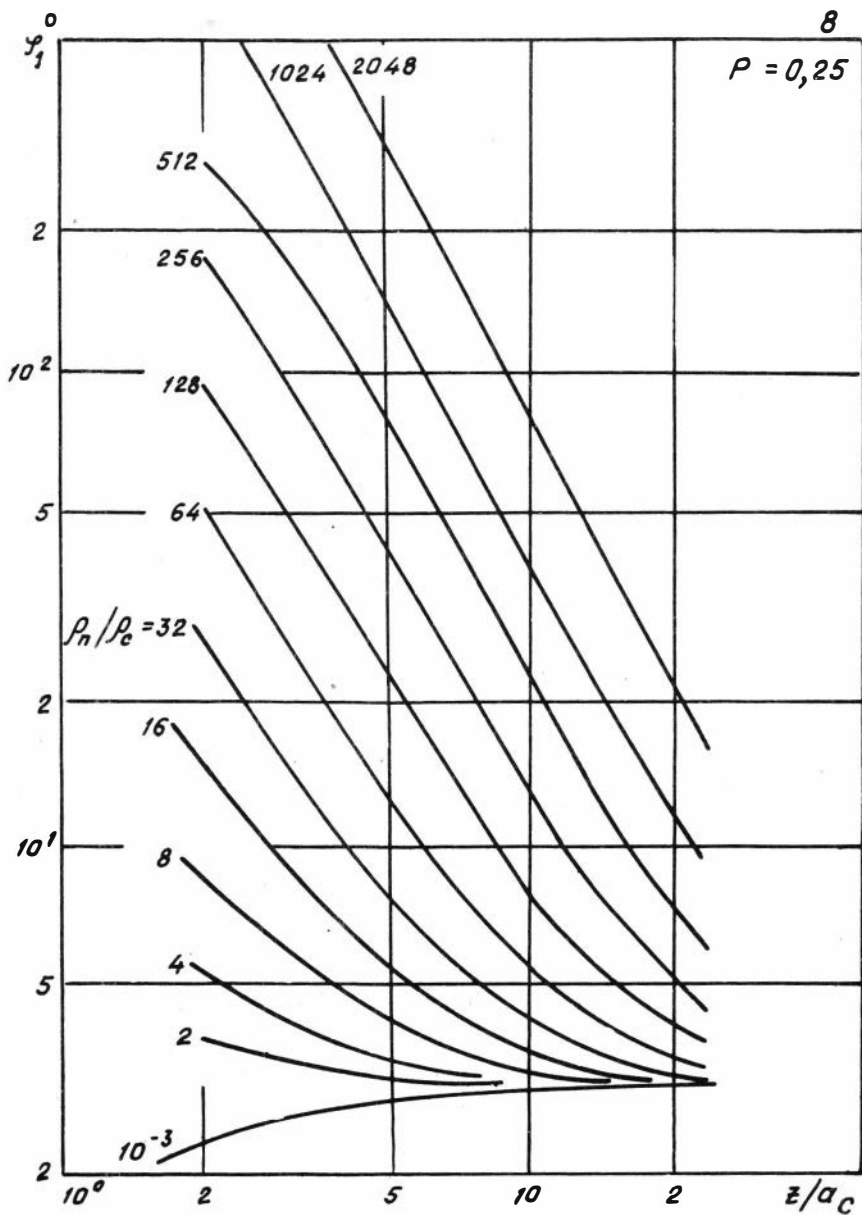
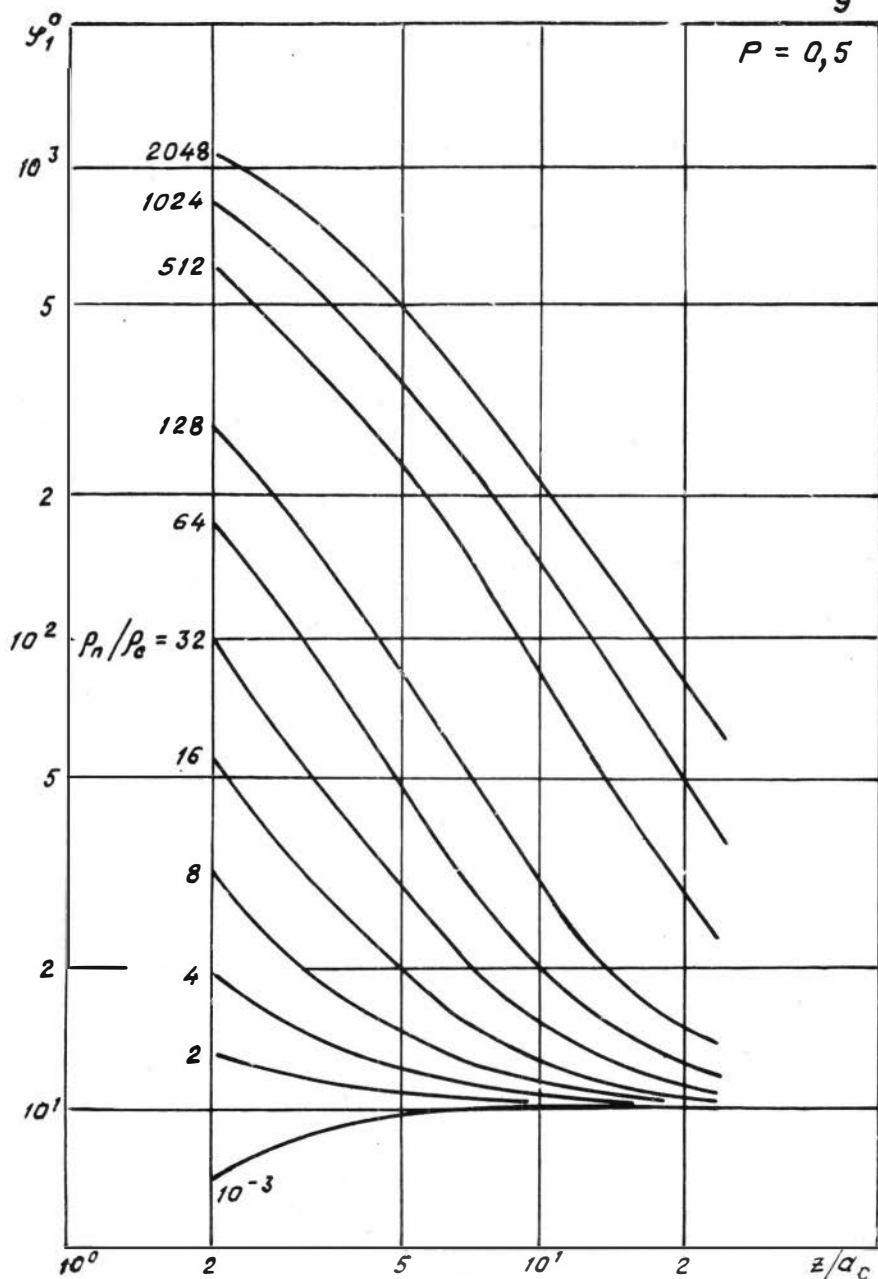
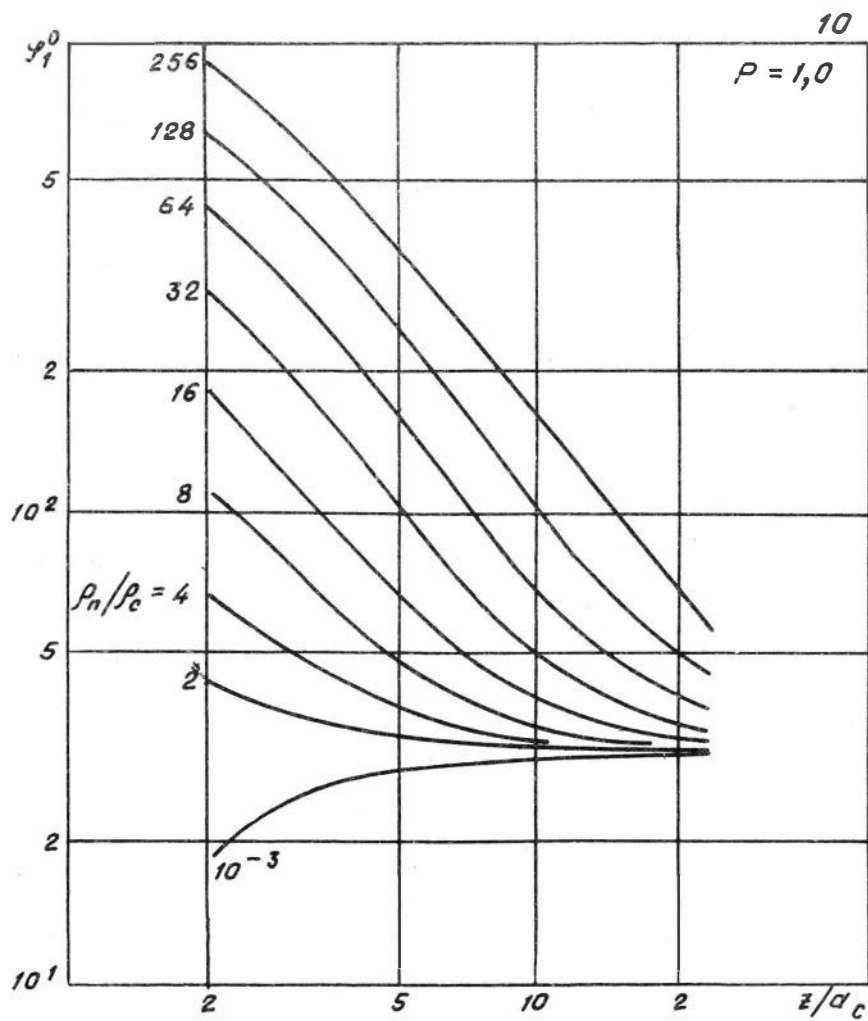


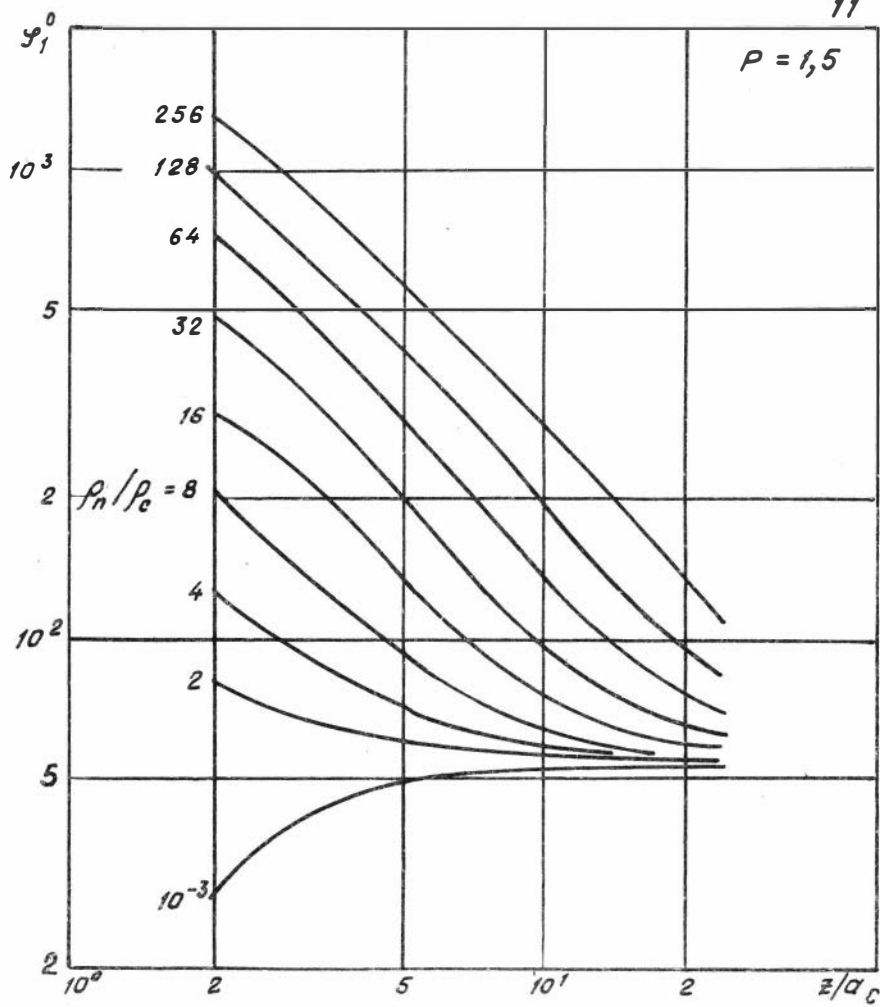
Таблица $\Delta \varphi^0$

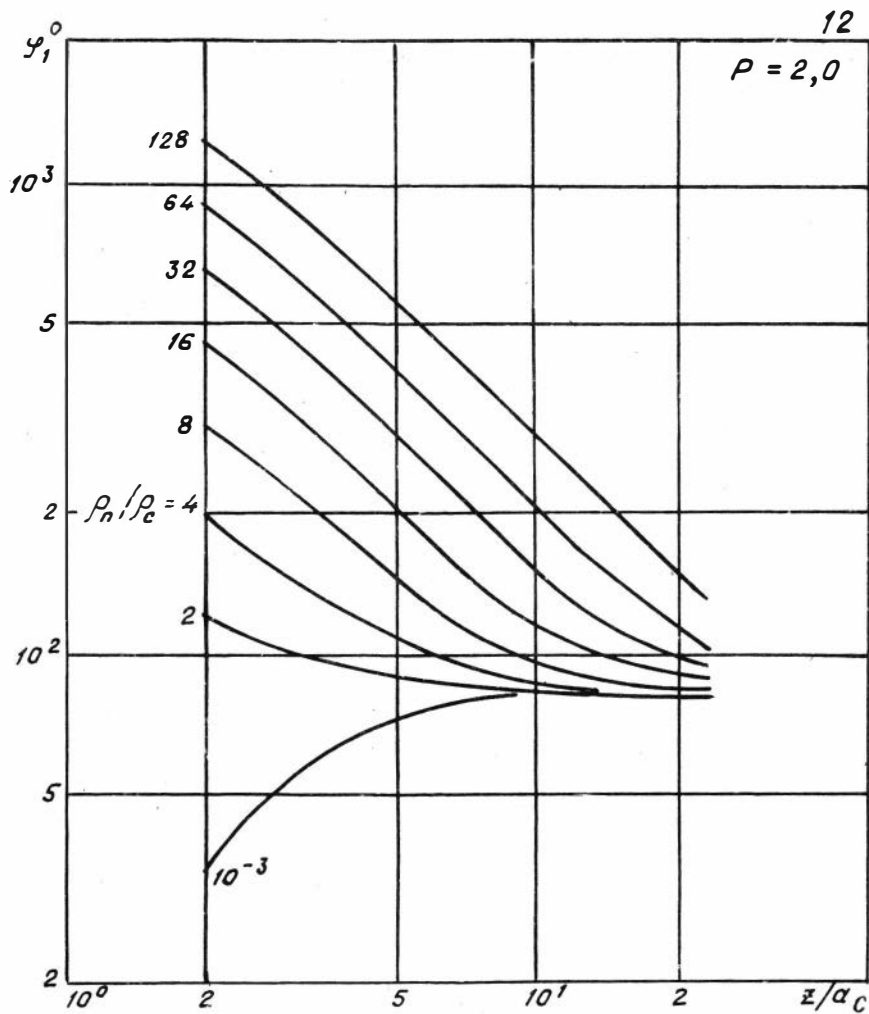
N	ρ_n/ρ_c	z_i/a_c			N	ρ_n/ρ_c	z_i/a_c		
		4	10	18			4	10	18
1	2	1,470	1,458	1,458	2	2	4,741	4,691	4,693
	4	1,493	1,457	1,458		4	4,836	4,686	4,692
	8	1,539	1,454	1,457		8	5,026	4,677	4,690
	16	1,632	1,449	1,456		16	5,404	4,657	4,686
	32	1,816	1,439	1,454		32	6,137	4,618	4,678
	64	2,181	1,419	1,450		64	7,406	4,539	4,661
	128	2,885	1,379	1,442		128	8,537	4,383	4,629
3	2	13,21	12,99	13,00	4	2	22,47	21,92	21,94
	4	13,63	12,98	13,00		4	23,52	21,88	21,93
	8	14,46	12,94	12,99		8	25,46	21,80	21,91
	16	15,96	12,86	12,97		16	27,82	21,65	21,87
	32	17,72	12,72	12,94		32	25,01	21,35	21,80
	64	14,94	12,44	12,88		64	11,73	20,81	21,66
	128	23,59	11,91	12,75		128	15,50	20,20	21,41
5	2	32,00	30,91	30,94	6	2	51,70	48,74	48,79
	4	34,04	30,84	30,92		4	56,50	48,60	48,75
	8	37,20	30,71	30,89		8	59,45	48,36	48,68
	16	37,76	30,46	30,82		16	47,23	47,90	48,53
	32	25,51	30,00	30,69		32	38,77	47,18	48,30
	64	21,51	29,32	30,46		64	46,78	47,08	47,87
	128	29,16	29,24	30,11					
7	2	72,30	66,40	66,40					
	4	79,64	66,20	66,40					
	8	76,22	65,83	66,20					
	16	57,04	65,12	66,00					
	32	62,02	64,67	65,57					

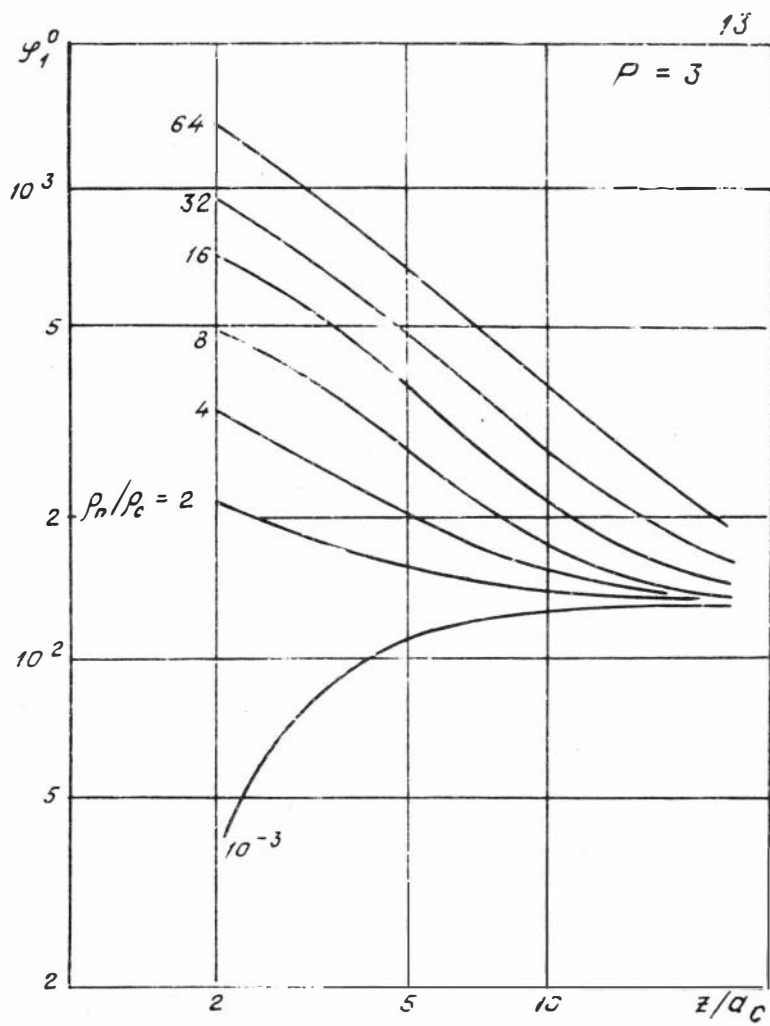












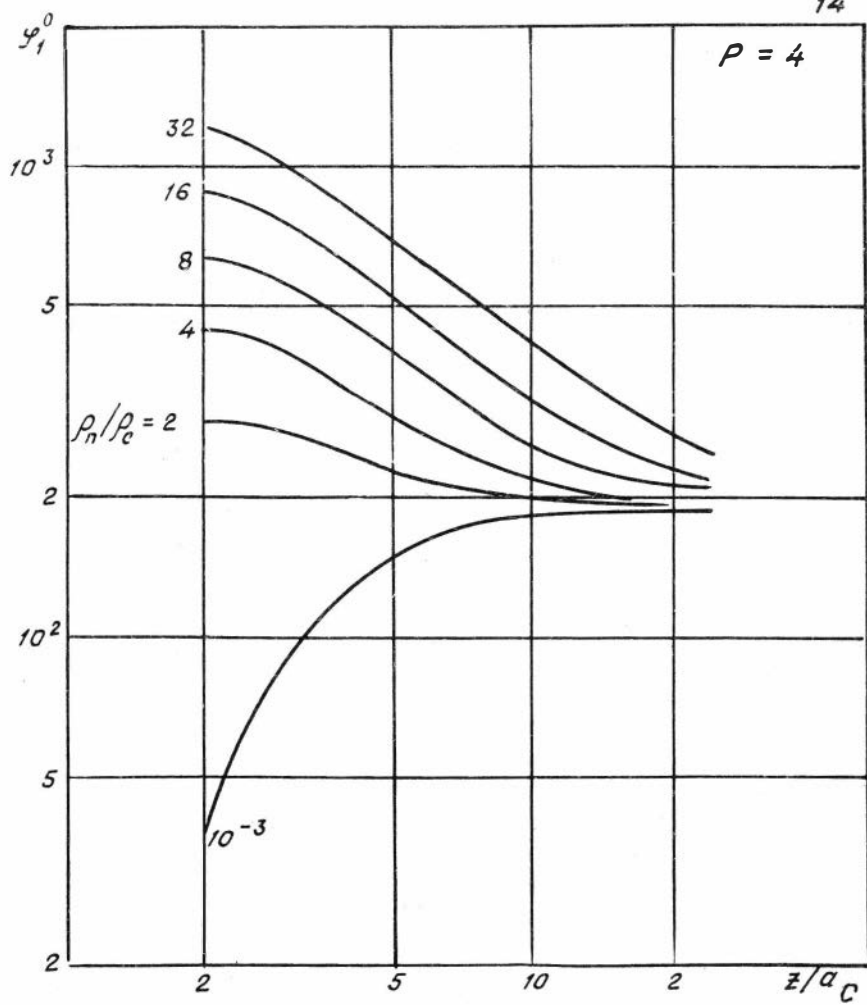
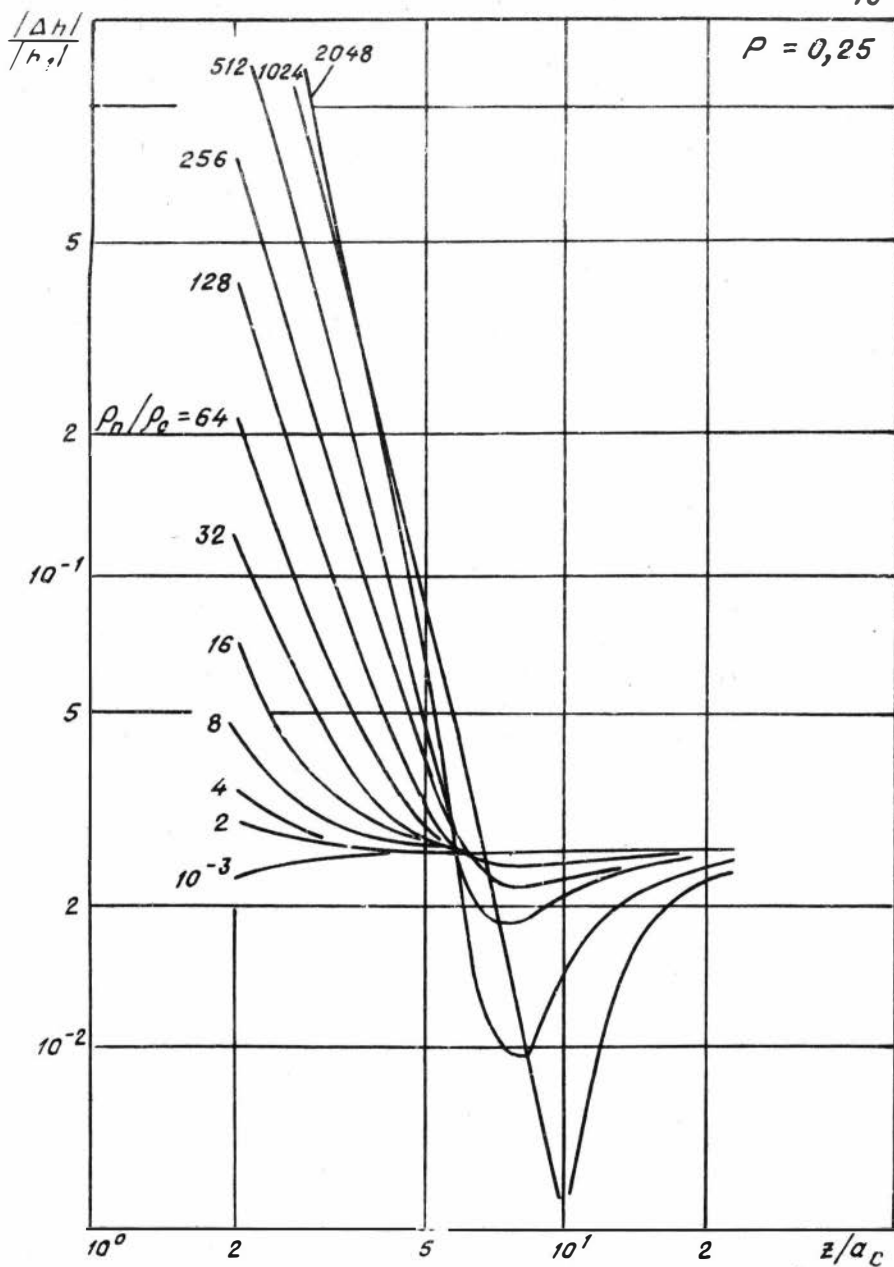
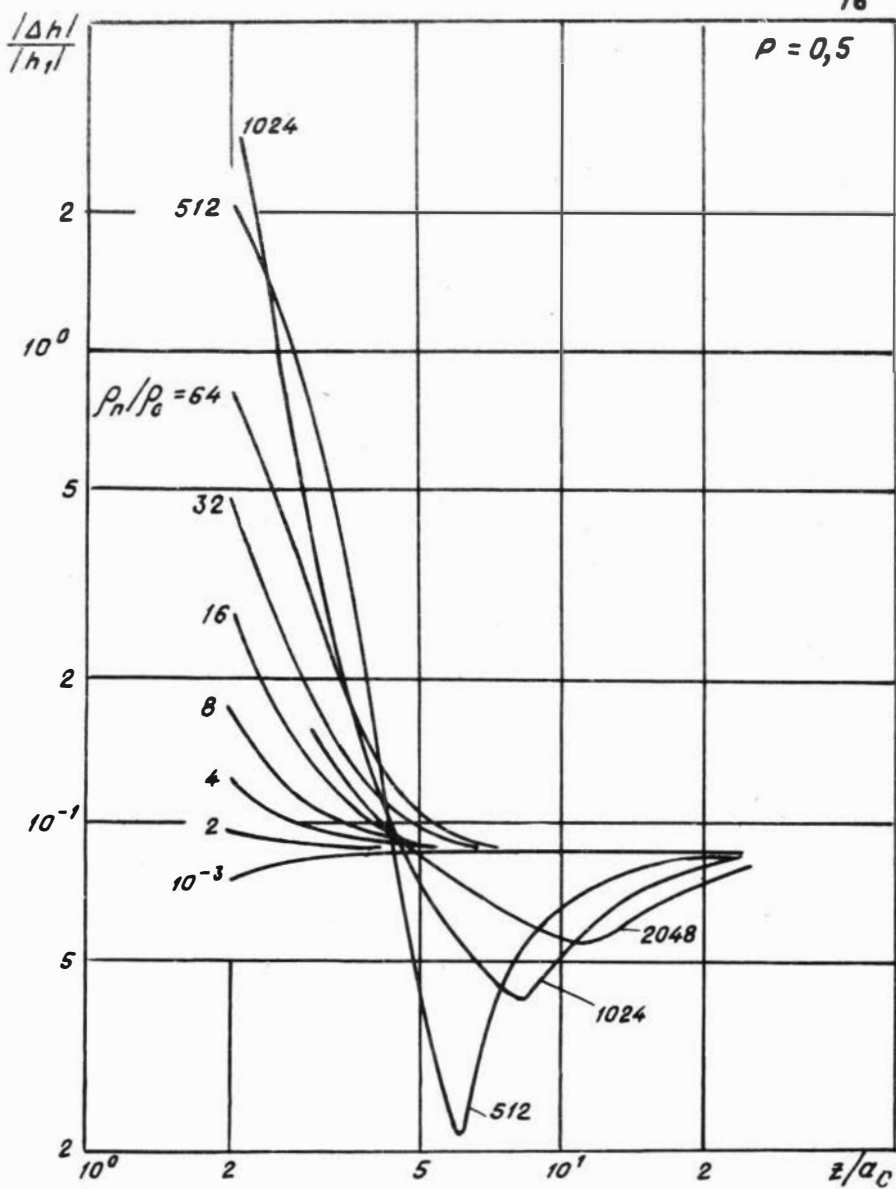
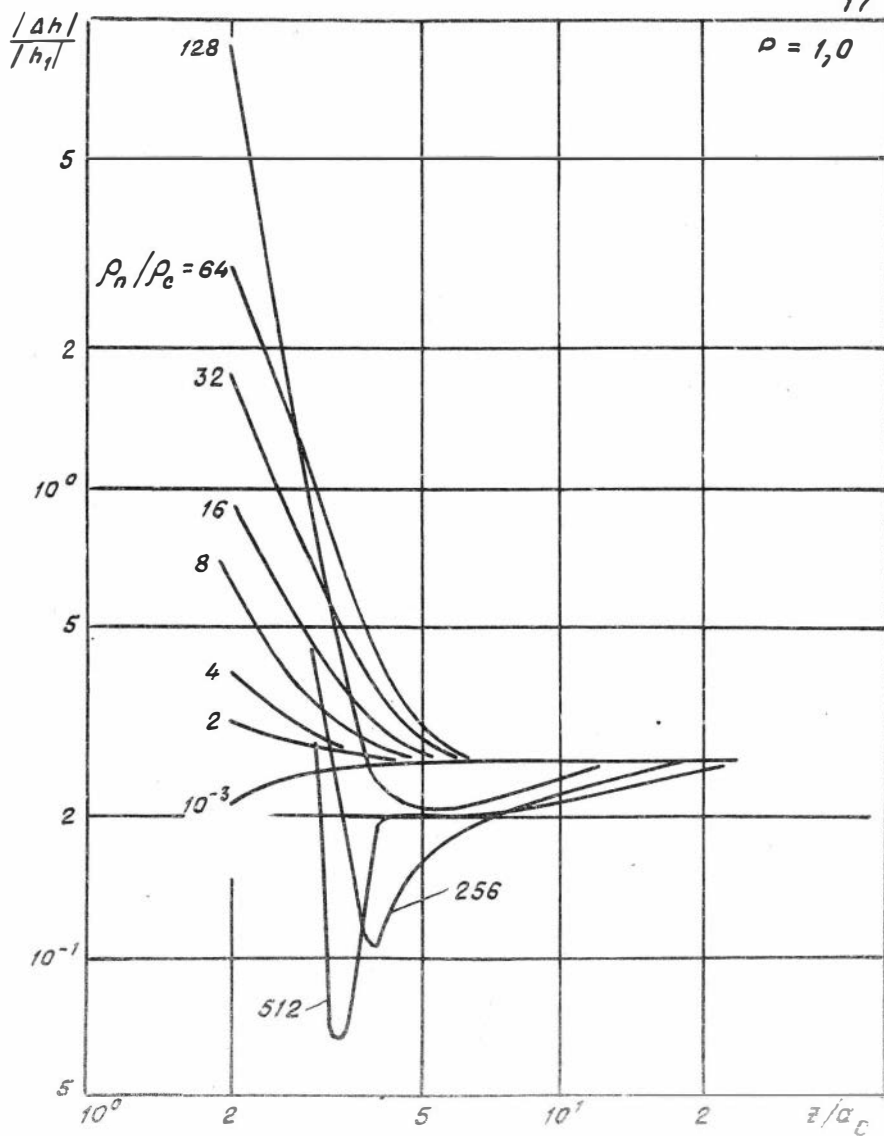


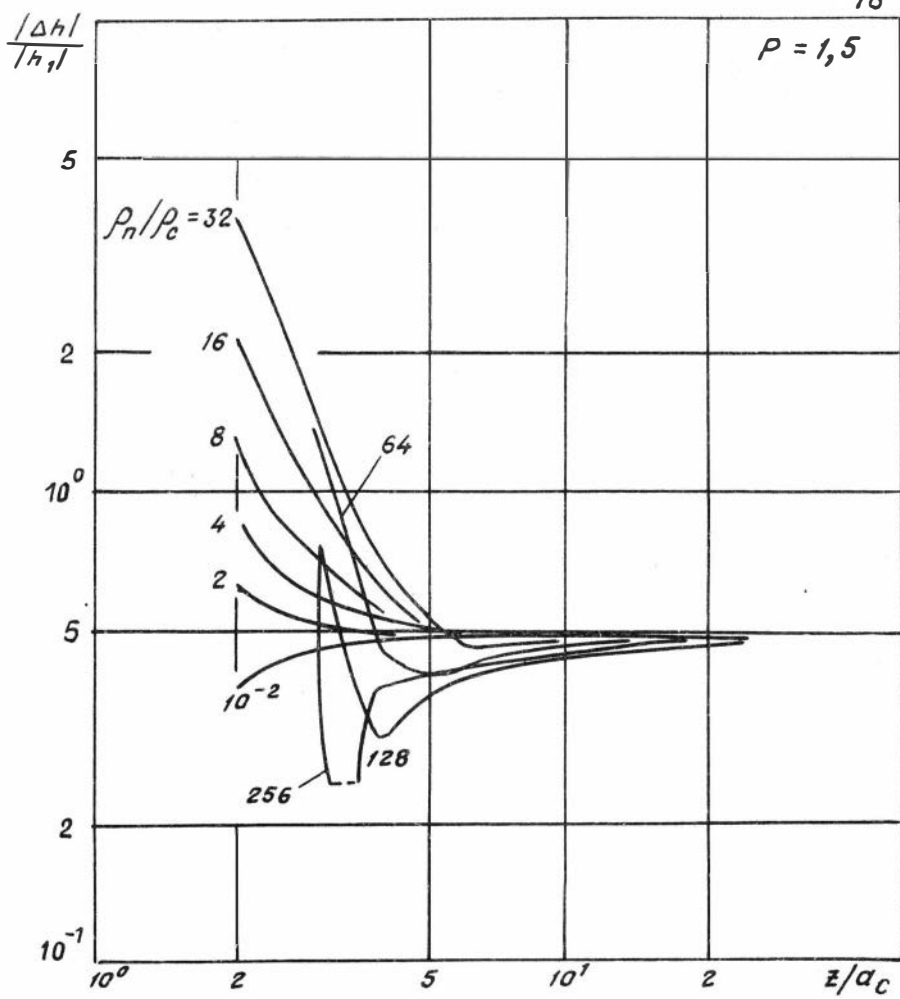
Таблица φ_1^0

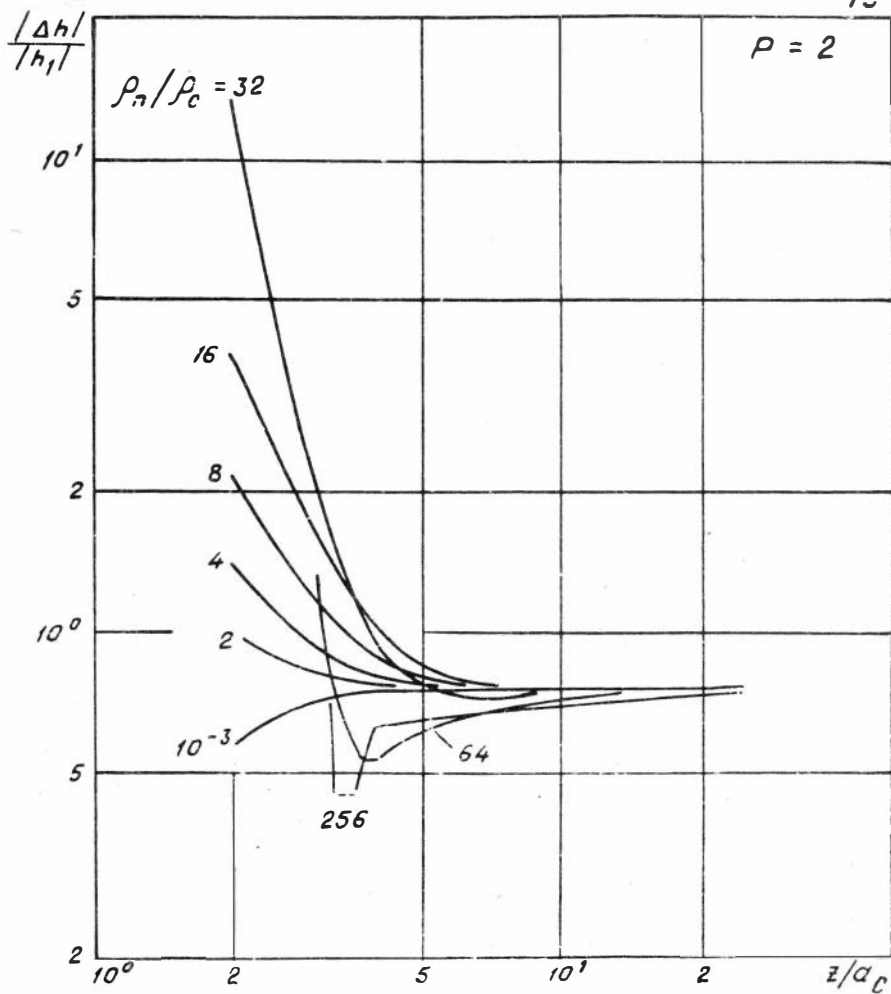
N	R_h/R_c	z_i/a_c			N	R_h/R_c	z_i/a_c		
		4	10	18			4	10	18
8	2	3,252	3,051	3,025	9	2	11,17	10,36	10,26
	4	3,729	3,126	3,048		4	13,08	10,66	10,35
	8	4,682	3,275	3,093		8	16,89	11,26	10,53
	16	6,589	3,573	3,183		16	24,51	12,45	10,89
	32	10,40	4,169	3,363		32	39,62	14,84	11,61
	64	18,01	5,361	3,723		64	68,95	19,61	13,05
	128	33,10	7,745	4,443		128	121,8	29,10	15,93
10	2	34,56	31,33	30,91	11	2	63,60	56,33	55,39
	4	42,20	32,53	31,27		4	80,68	59,04	56,20
	8	57,37	34,92	31,99		8	113,6	64,45	57,83
	16	86,82	39,71	33,44		16	172,3	75,22	61,08
	32	140,0	49,25	36,32		32	258,4	96,39	67,58
	64	220,2	68,05	42,09		64	362,0	135,9	80,49
	128	318,0	103,5	53,56		128	504,0	199,7	105,6
12	2	96,18	83,32	81,63	13	2	168,6	140,5	136,7
	4	125,9	88,15	83,08		4	229,6	151,4	139,9
	8	180,2	97,79	85,98		8	323,9	173,0	146,5
	16	264,6	116,8	91,77		16	438,0	213,4	159,5
	32	367,9	152,8	103,3		32	581,8	279,0	184,9
	64	501,9	213,0	125,9		64	785,0	366,7	230,9
	128	692,3	296,12	167,5					
14	2	247,7	200,3	193,4					
	4	341,6	219,8	199,3					
	8	464,1	257,0	211,0					
	16	604,2	319,6	233,8					
	32	798,0	405,1	276,2					











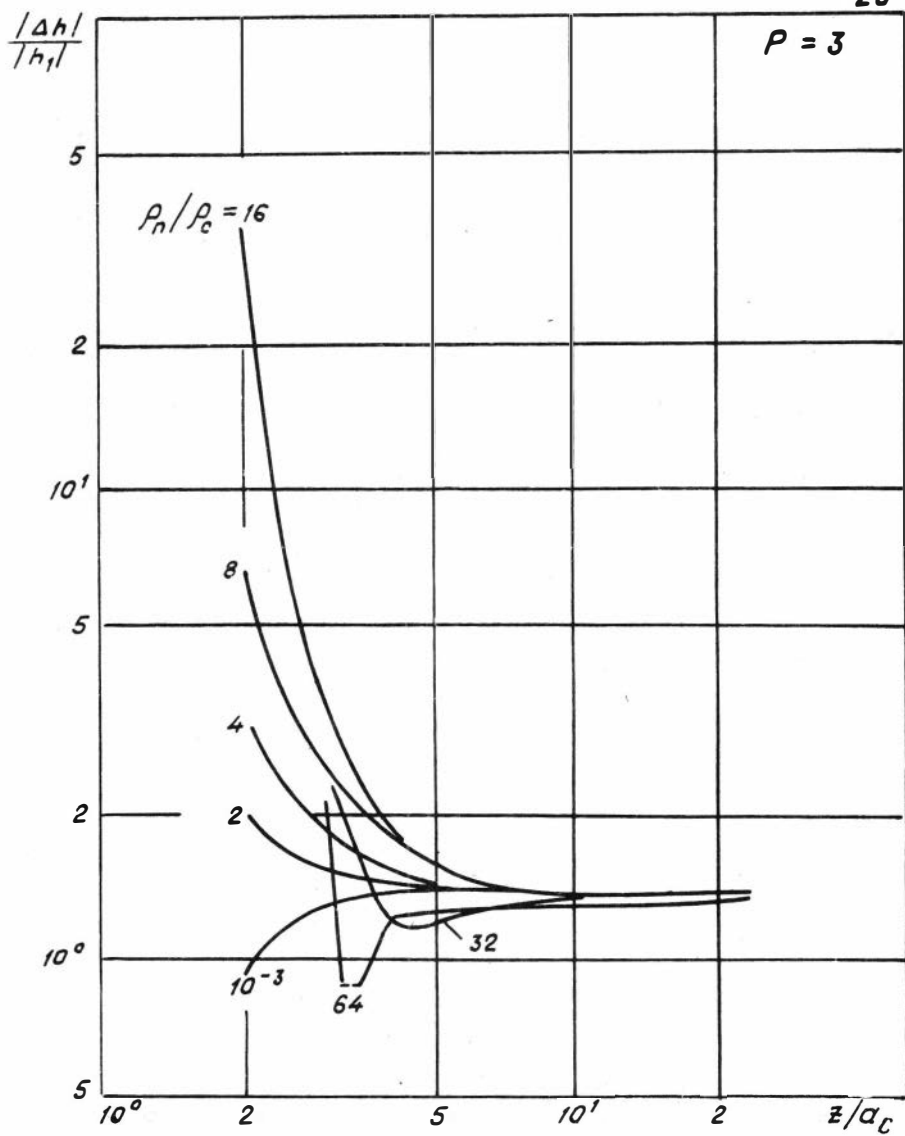
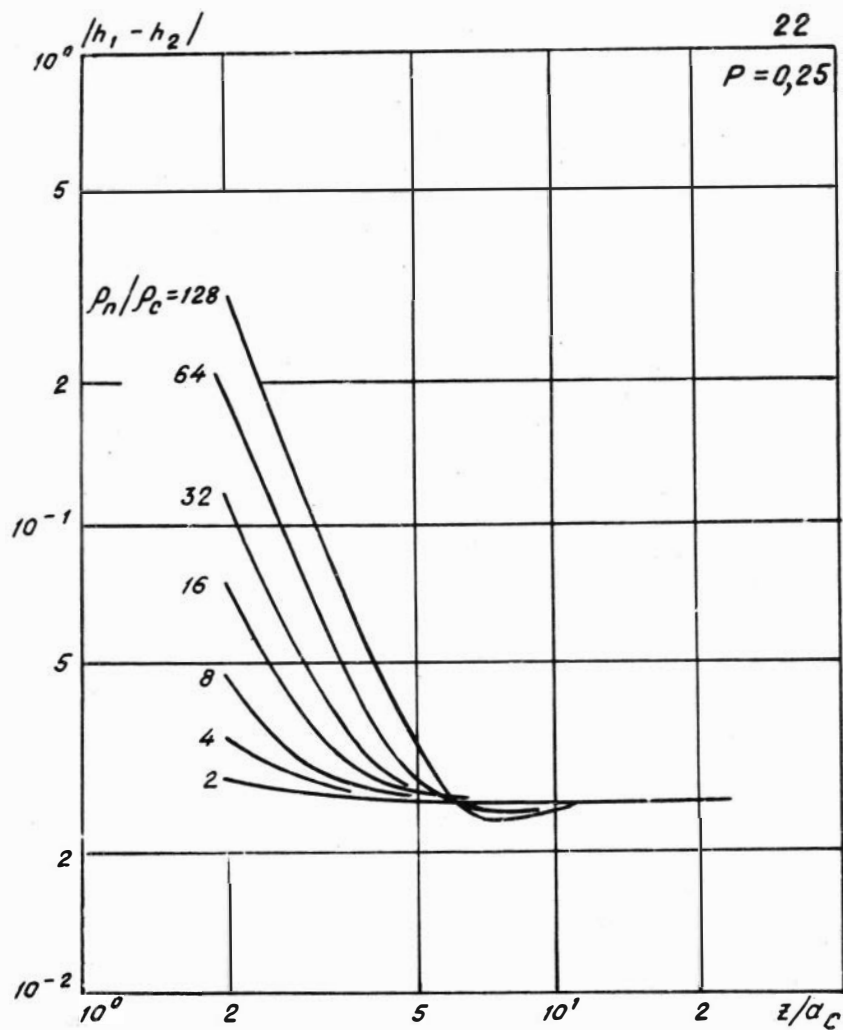
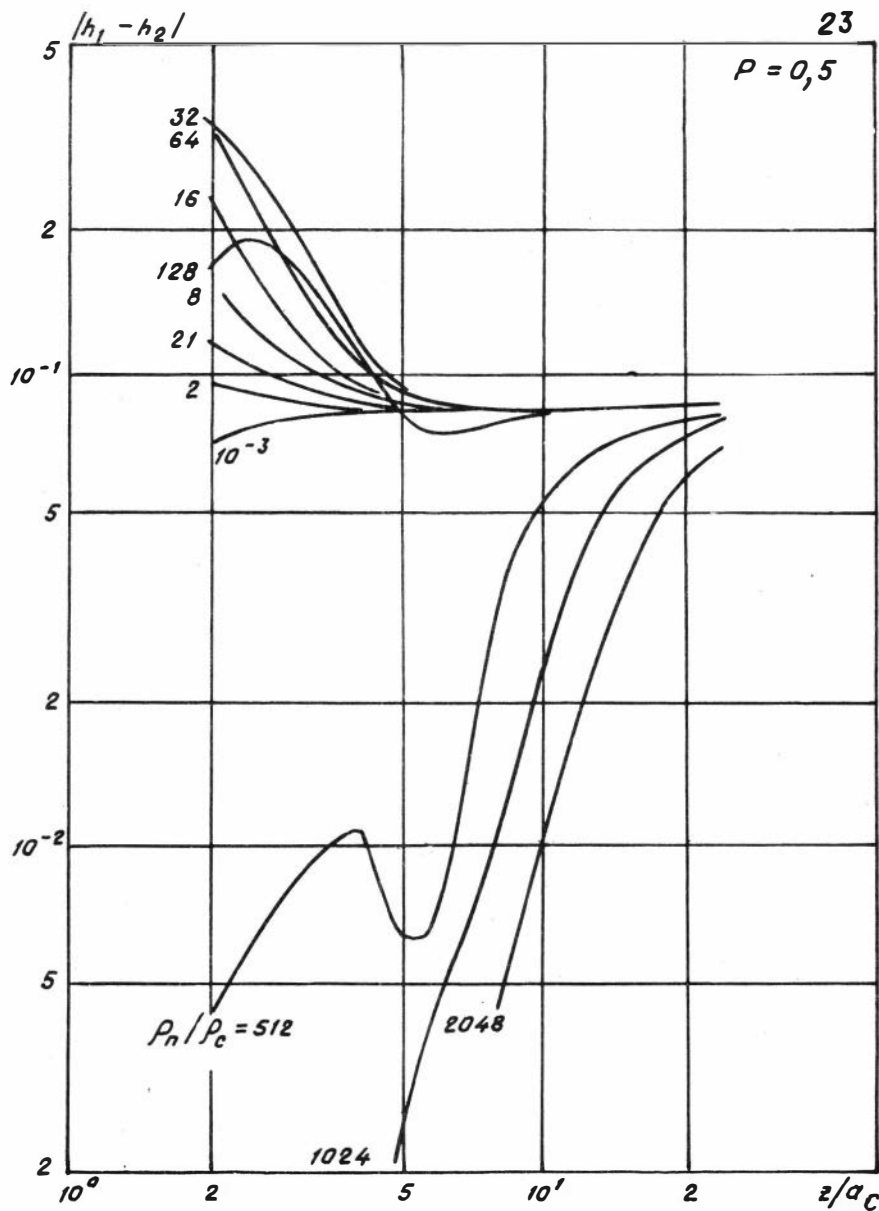
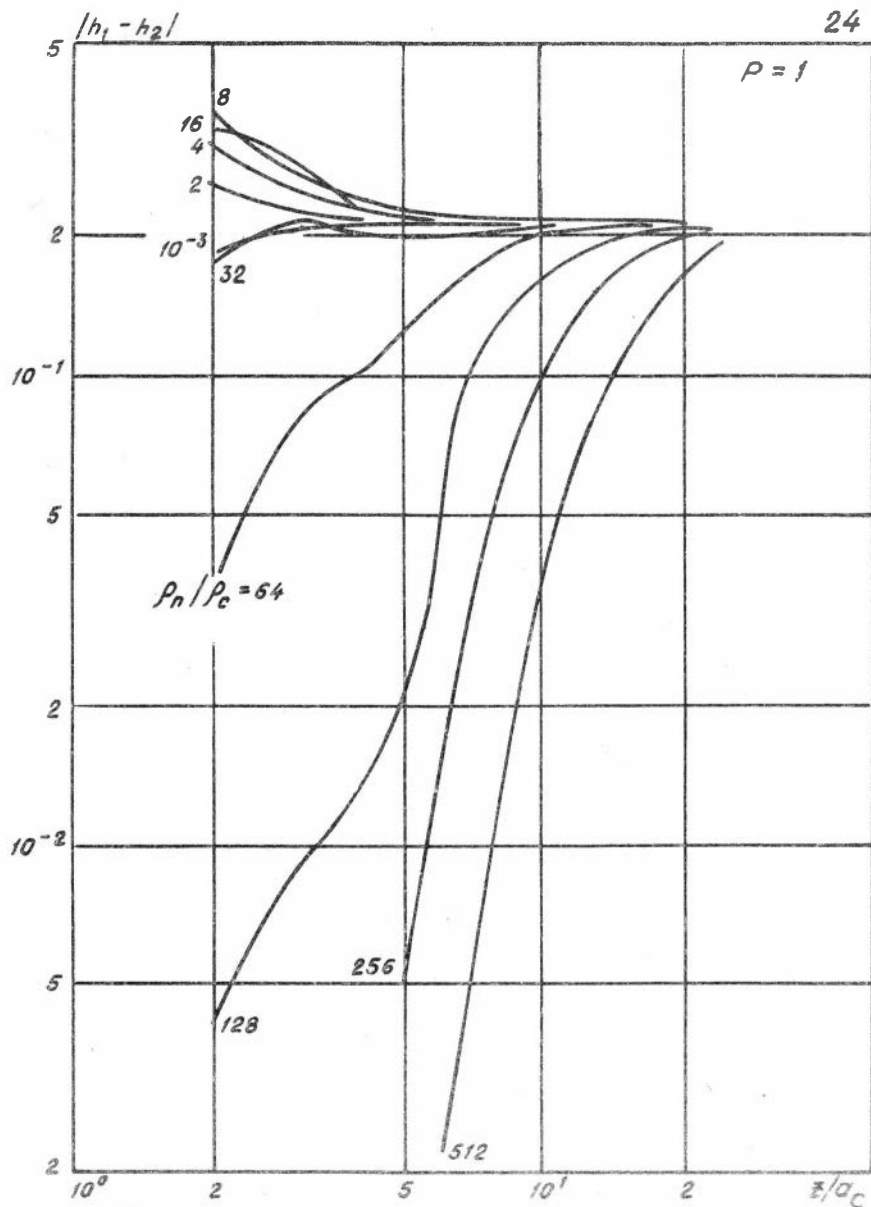


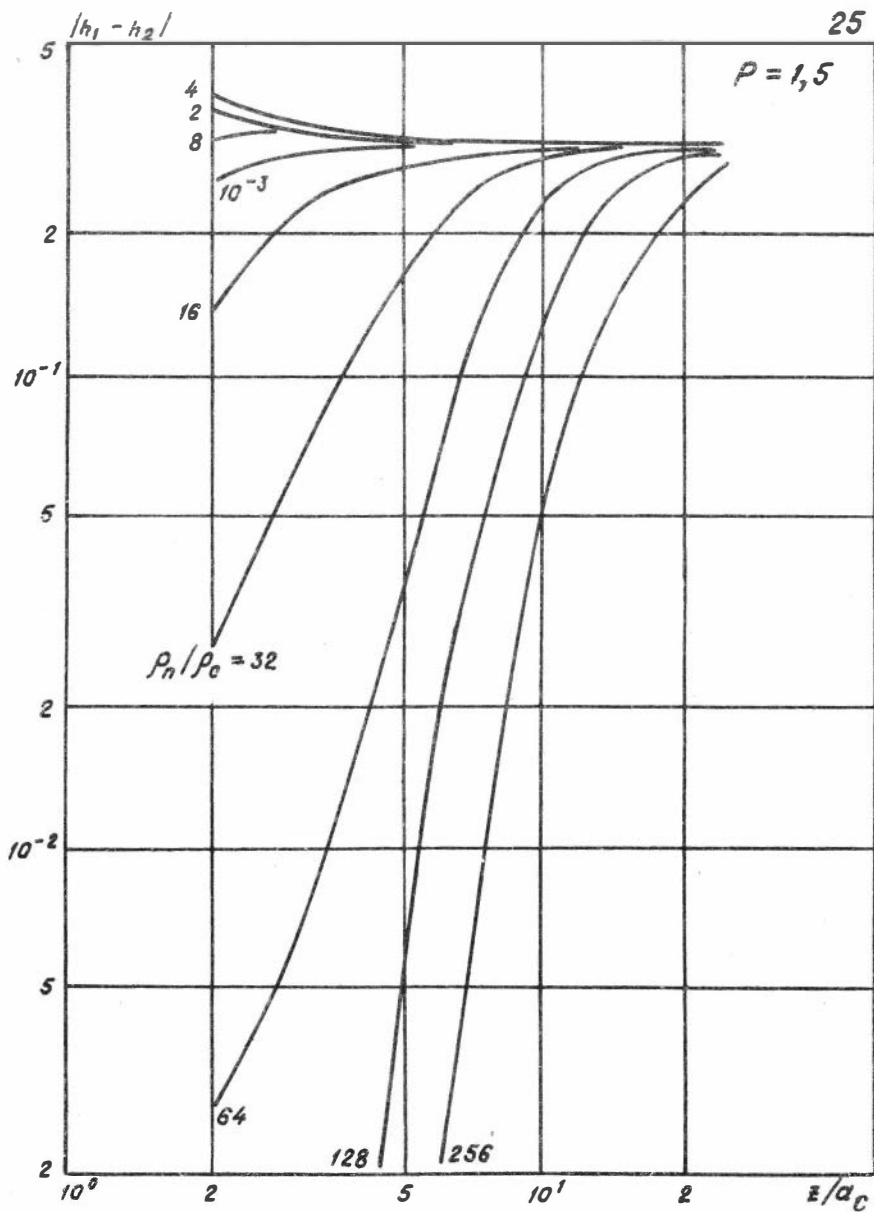
Таблица $\Delta h/h_i$

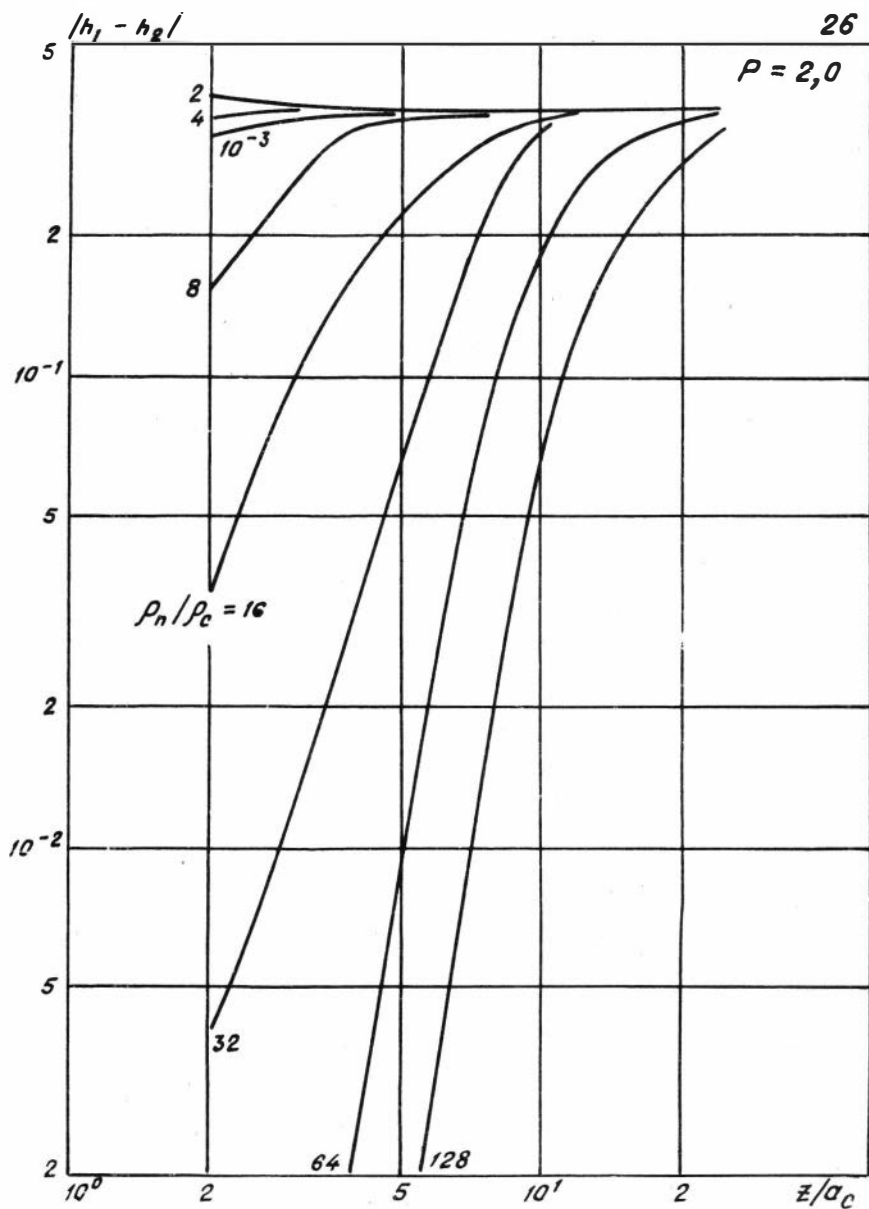
N	ρ_n/ρ_c	z_i/a_c			N	ρ_n/ρ_c	z_i/a_c		
		4	10	18			4	10	18
15	2	0,026	0,026	0,026	16	2	0,087	0,086	0,086
	4	0,026	0,026	0,026		4	0,089	0,086	0,086
	8	0,027	0,026	0,026		8	0,092	0,086	0,086
	16	0,029	0,026	0,026		16	0,099	0,086	0,086
	32	0,032	0,025	0,026		32	0,112	0,085	0,086
	64	0,038	0,025	0,026		64	0,138	0,084	0,086
	128	0,052	0,024	0,026		128	0,184	0,081	0,085
17	2	0,266	0,262	0,263	18	2	0,493	0,486	0,486
	4	0,272	0,262	0,262		4	0,510	0,485	0,486
	8	0,286	0,261	0,262		8	0,549	0,484	0,486
	16	0,318	0,260	0,262		16	0,630	0,480	0,486
	32	0,375	0,258	0,261		32	0,708	0,475	0,484
	64	0,425	0,252	0,260		64	0,455	0,462	0,481
	128	0,238	0,241	0,258		128	0,480	0,487	0,486
19	2	0,762	0,750	0,750	20	2	1,431	1,401	1,402
	4	0,798	0,748	0,750		4	1,544	1,397	1,401
	8	0,883	0,746	0,749		8	1,812	1,390	1,400
	16	1,028	0,740	0,748		16	1,850	1,377	1,397
	32	0,917	0,729	0,746		32	1,205	1,346	1,390
	64	0,528	0,705	0,740		64	1,229	1,312	1,375
	128	0,625	0,683	0,730					
21	2	2,299	2,240	2,244					
	4	2,590	2,232	2,243					
	8	3,122	2,220	2,240					
	16	2,481	2,192	2,233					
	32	1,982	2,138	2,216					

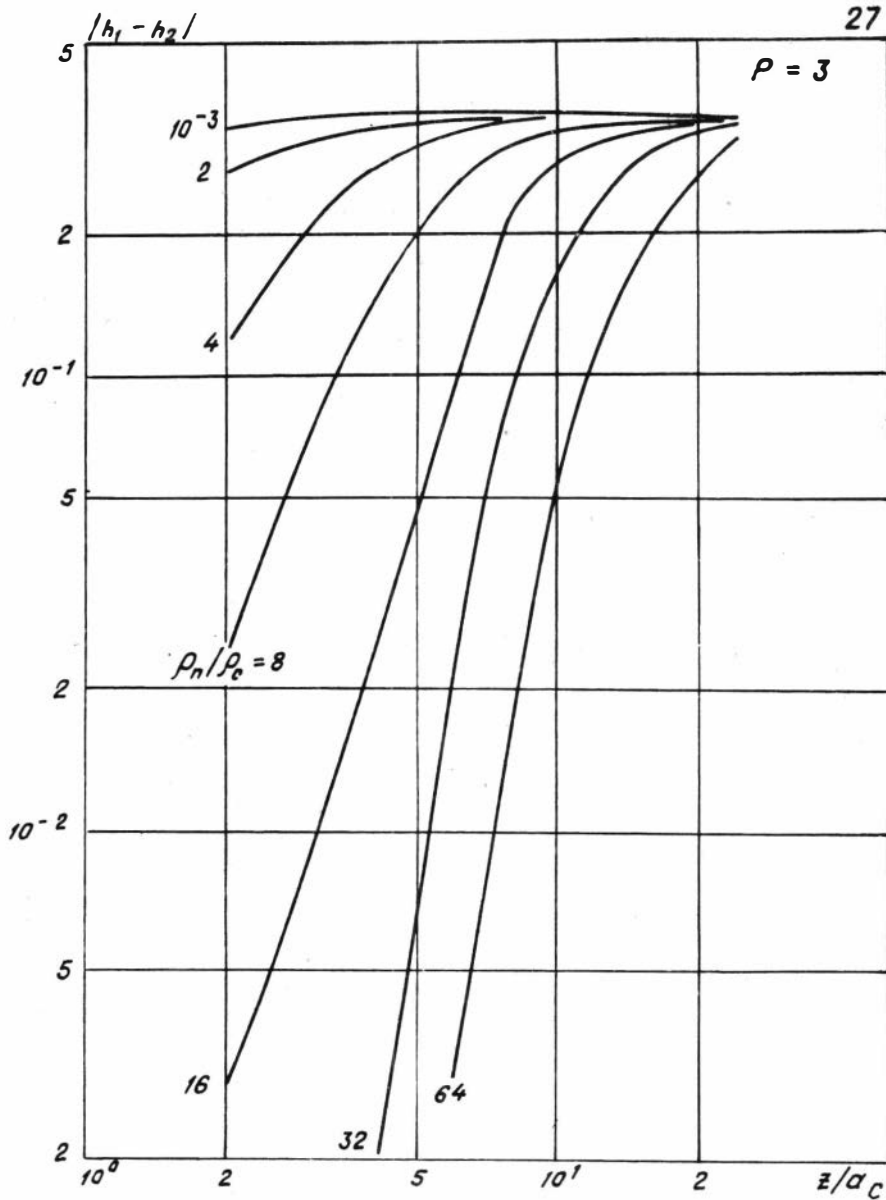












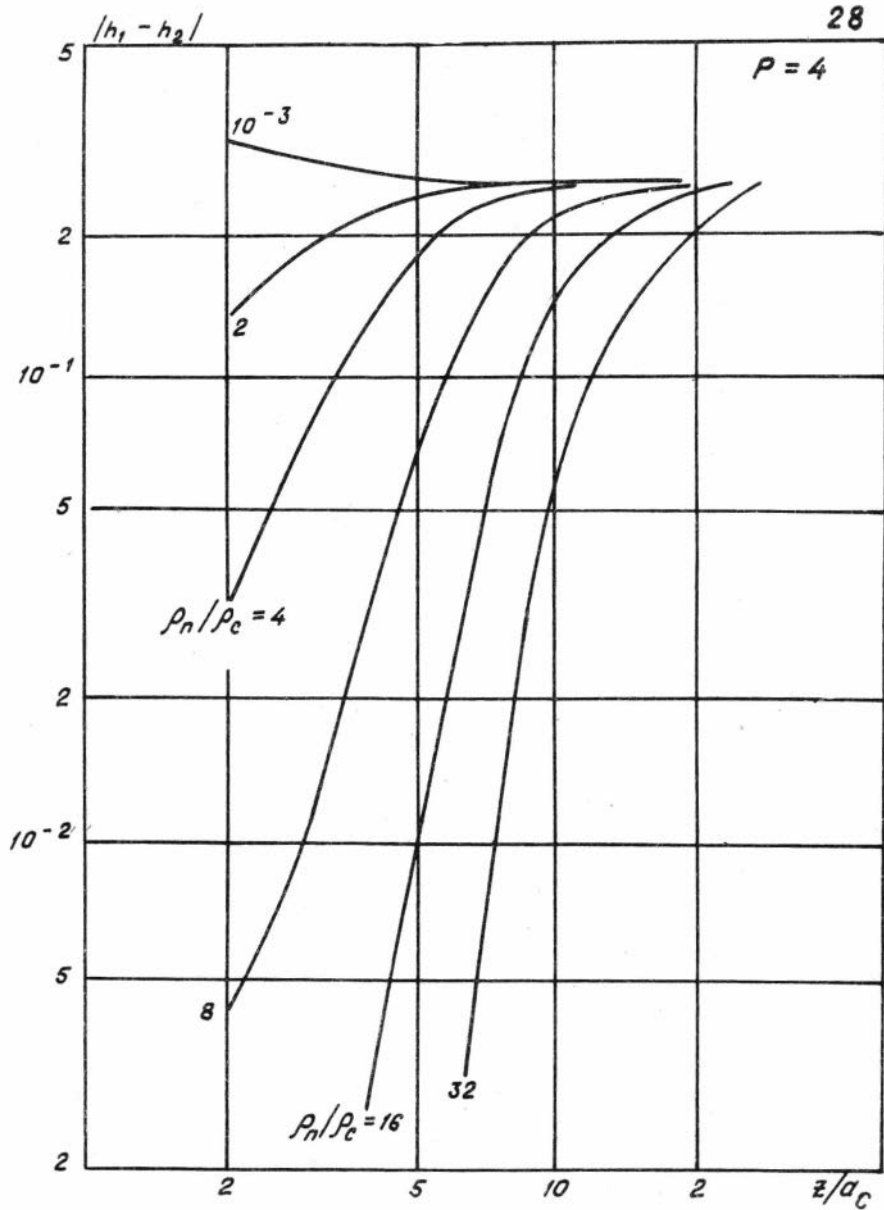
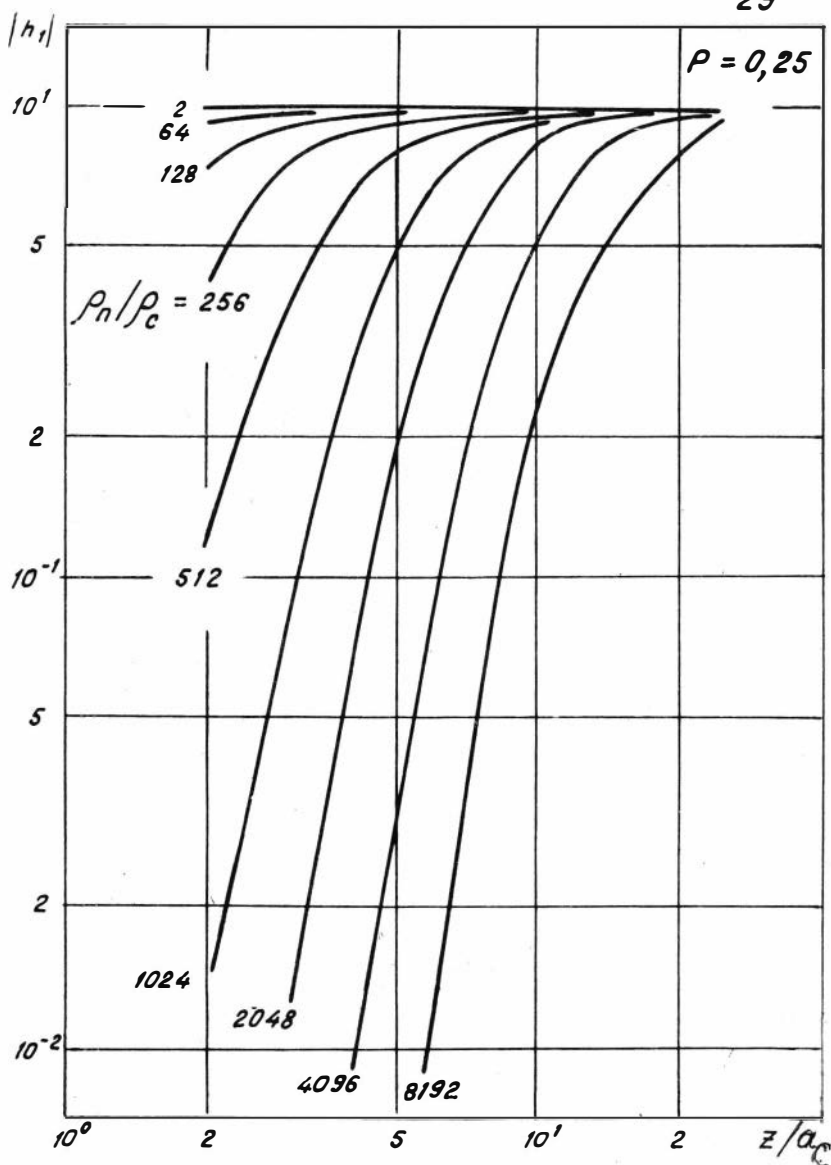
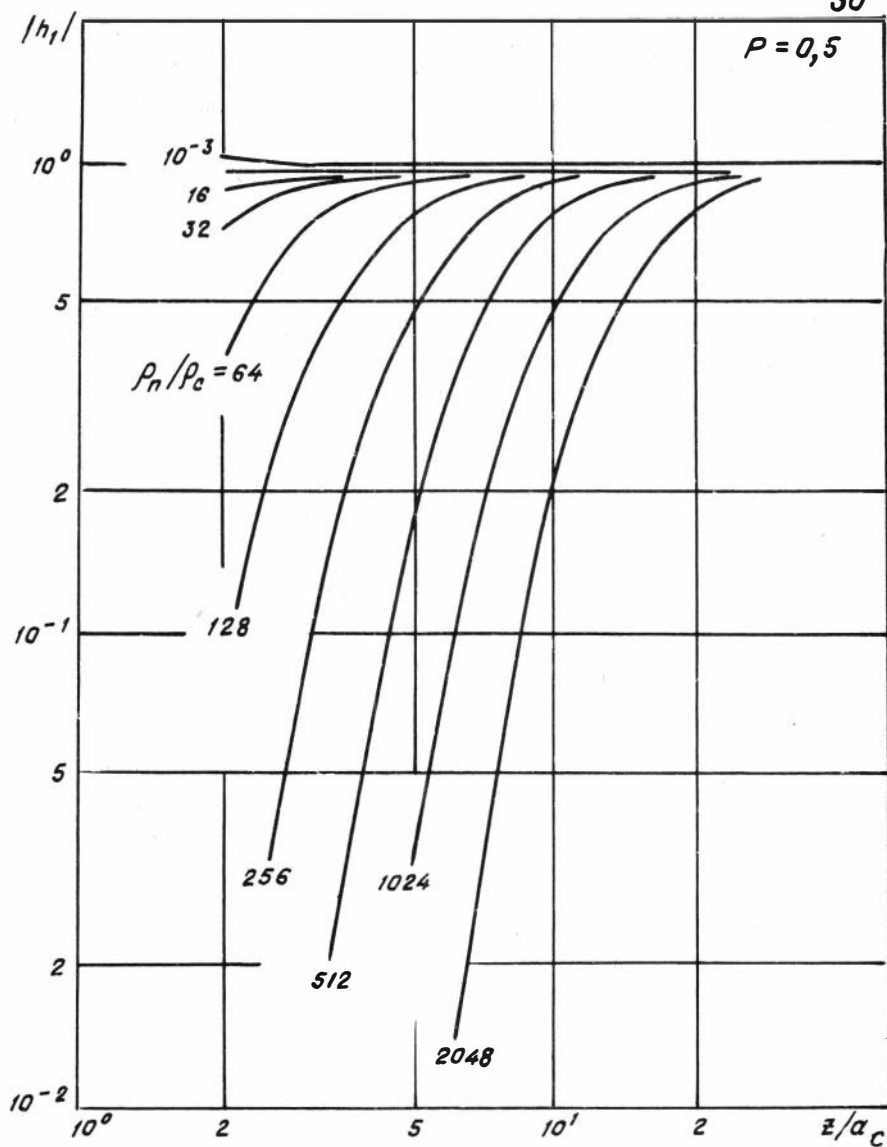
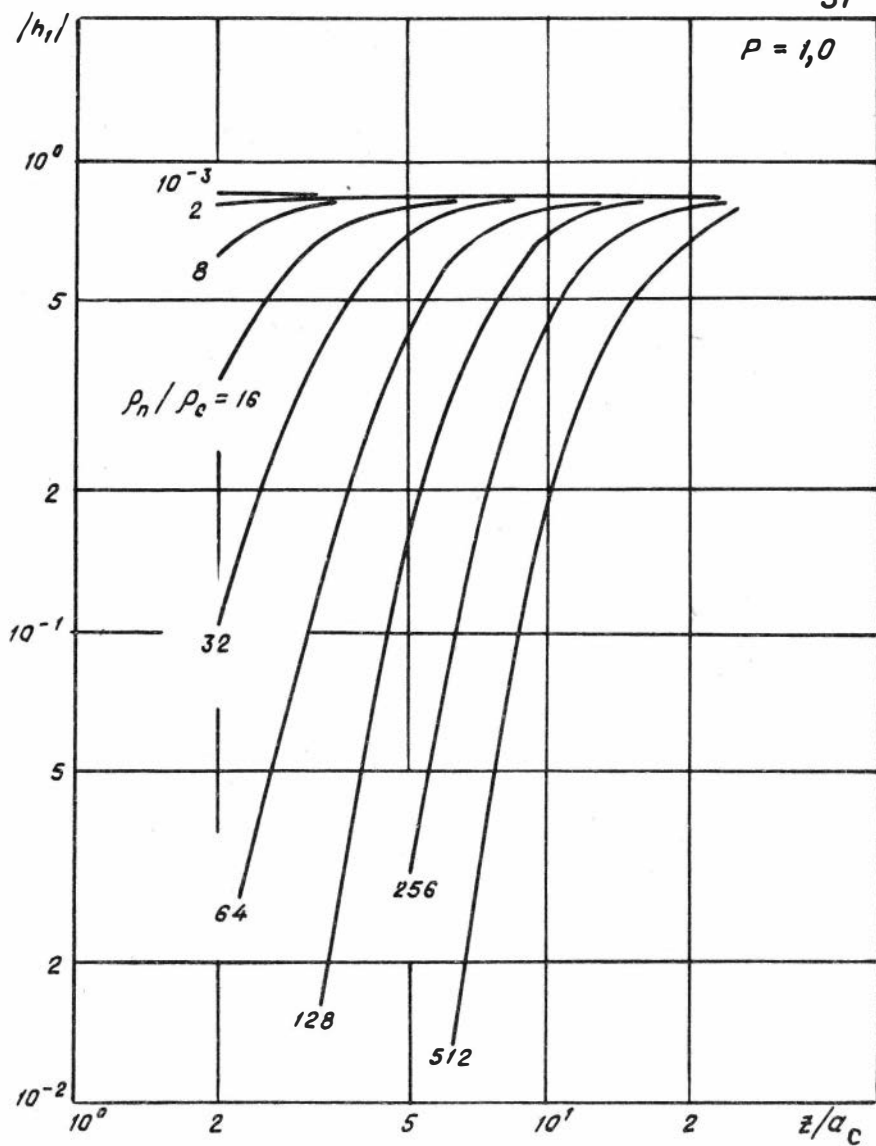


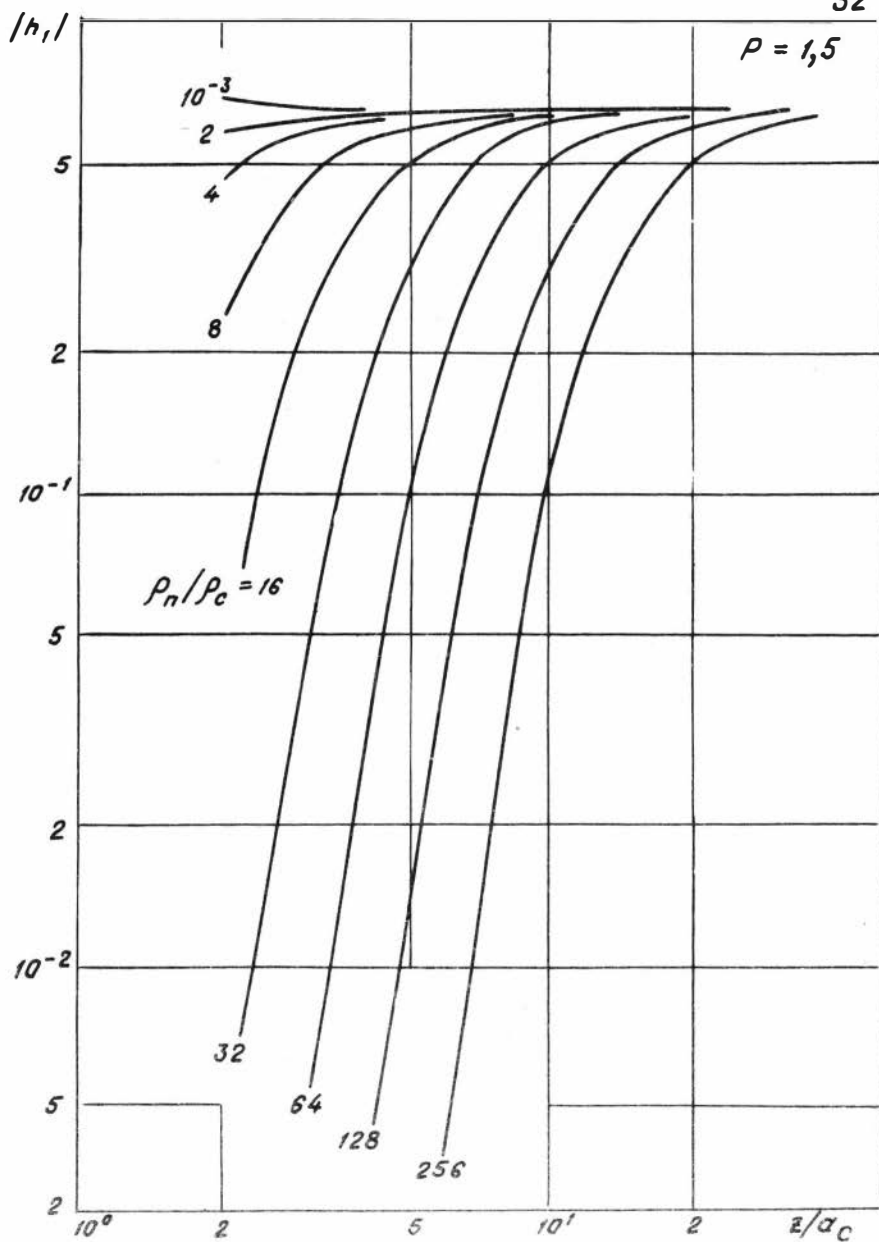
Таблица Δh

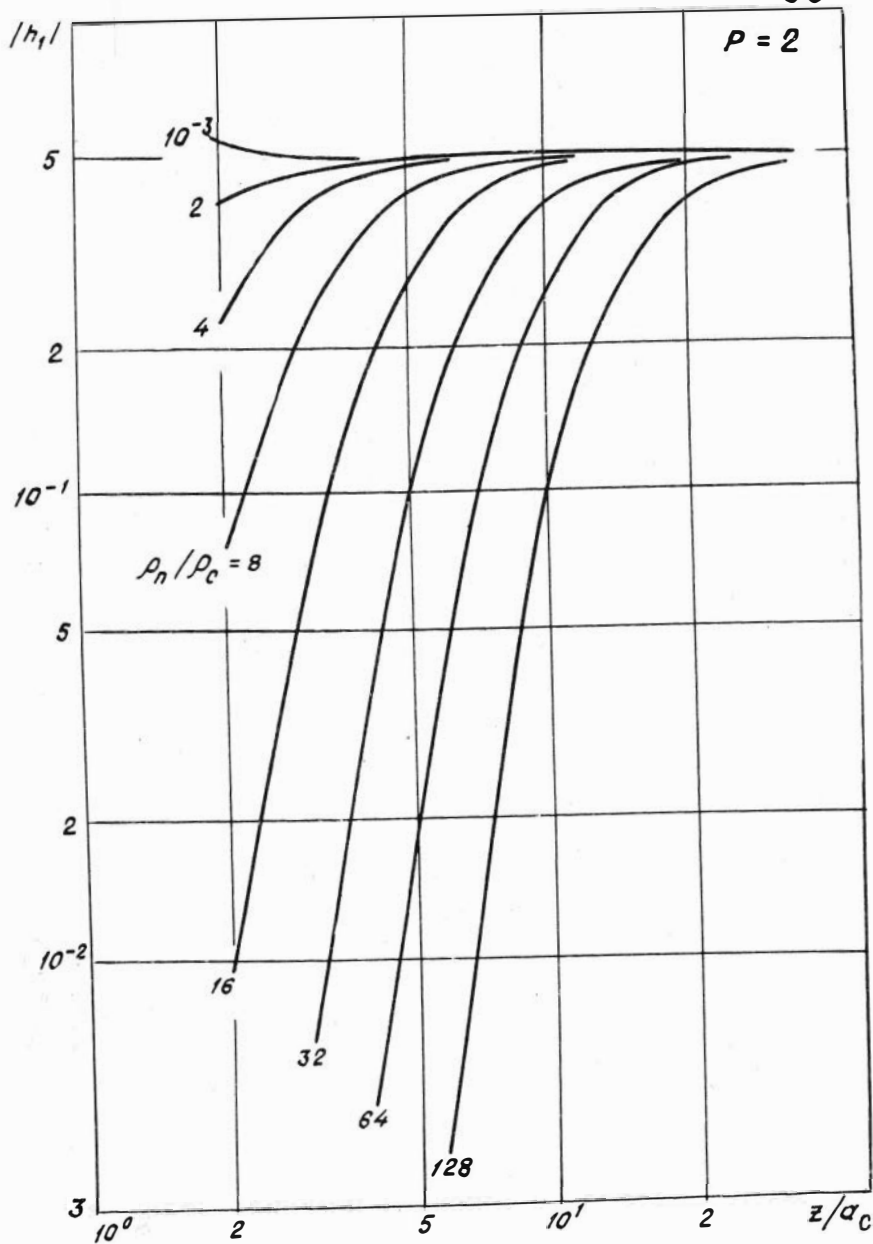
N	ρ_h/ρ_c	z_i/a_c			N	ρ_h/ρ_c	z_i/a_c		
		4	10	18			4	10	18
22	2	0,026	0,026	0,026	23	2	0,084	0,083	0,083
	4	0,026	0,026	0,026		4	0,085	0,083	0,083
	8	0,027	0,026	0,031		8	0,088	0,083	0,083
	16	0,029	0,026	0,026		16	0,094	0,082	0,083
	32	0,032	0,025	0,026		32	0,104	0,082	0,083
	64	0,038	0,025	0,026		64	0,118	0,080	0,082
	128	0,050	0,024	0,025		128	0,114	0,077	0,081
24	2	0,218	0,216	0,216	25	2	0,319	0,316	0,316
	4	0,223	0,216	0,216		4	0,323	0,316	0,316
	8	0,230	0,215	0,216		8	0,315	0,314	0,316
	16	0,234	0,214	0,216		16	0,255	0,309	0,315
	32	0,204	0,210	0,215		32	0,112	0,291	0,313
	64	0,100	0,197	0,213		64	0,146	0,237	0,306
	128	0,128	0,163	0,208		128	0,001	0,132	0,282
26	2	0,367	0,366	0,366	27	2	0,335	0,349	0,349
	4	0,358	0,365	0,366		4	0,272	0,346	0,349
	8	0,303	0,361	0,366		8	0,135	0,330	0,348
	16	0,159	0,346	0,364		16	0,008	0,276	0,341
	32	0,031	0,296	0,358		32	0,002	0,158	0,317
	64	0,002	0,181	0,336		64	0,000	0,051	0,245
	128	0,000	0,065	0,270					
28	2	0,227	0,263	0,263					
	4	0,134	0,256	0,263					
	8	0,034	0,224	0,260					
	16	0,003	0,141	0,246					
	32	0,000	0,050	0,200					

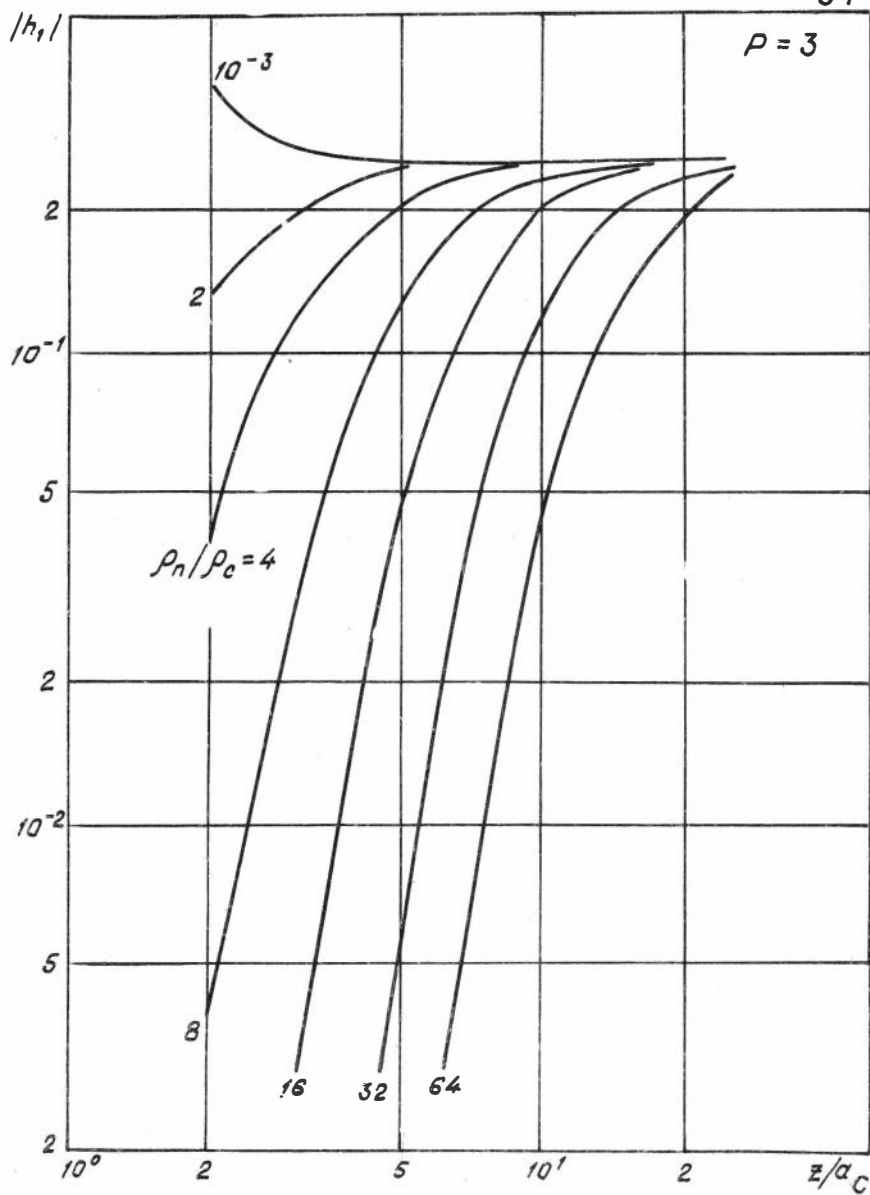












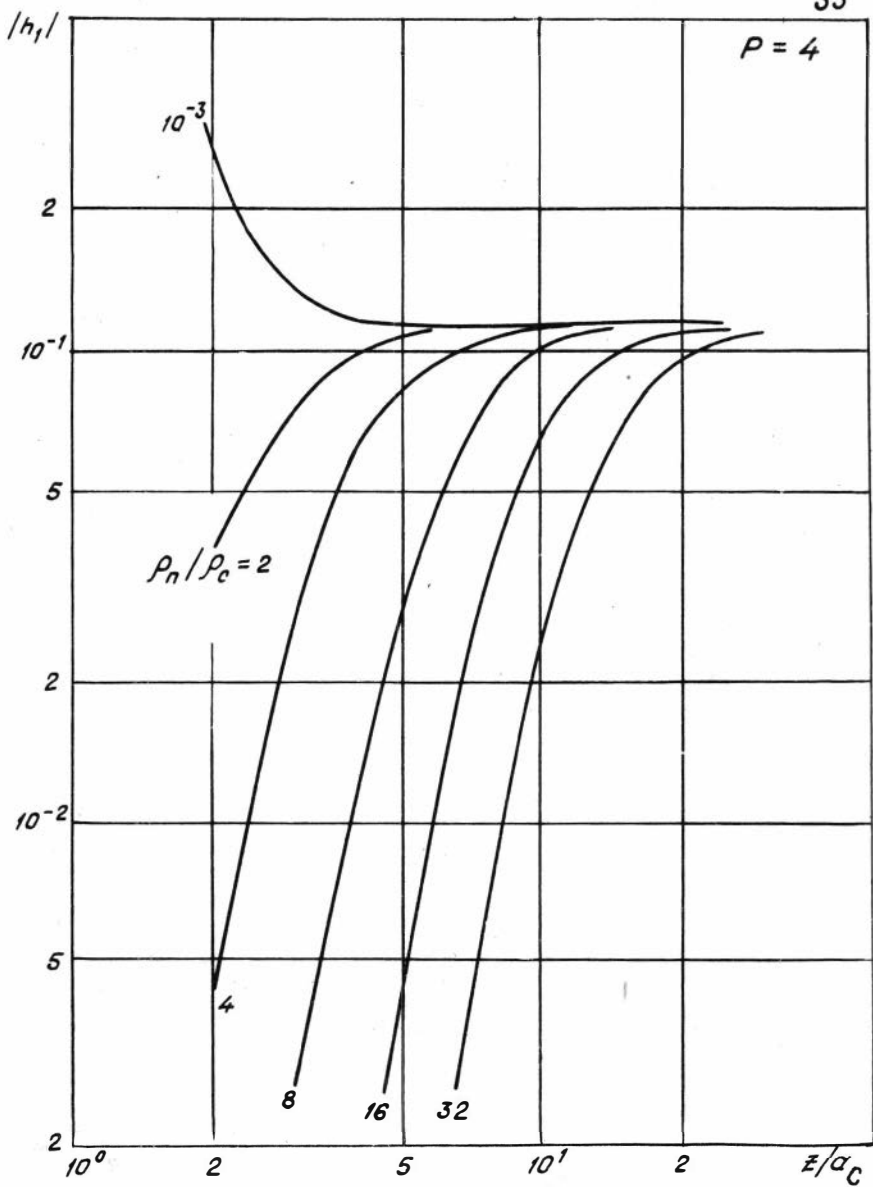


Таблица h_1

N	ρ_n/ρ_c	z_i/a_c			N	ρ_{n_i}/ρ_c	z_i/a_c		
		4	10	18			4	10	18
29	2	0,993	0,993	0,993	30	2	0,959	0,959	0,959
	64	0,985	0,993	0,993		16	0,952	0,959	0,959
	128	0,962	0,992	0,993		32	0,931	0,958	0,959
						64	0,851	0,956	0,959
						128	0,620	0,947	0,958
31	2	0,822	0,822	0,822	32	2	0,648	0,650	0,650
	8	0,802	0,822	0,823		4	0,634	0,650	0,650
	16	0,737	0,803	0,823		8	0,575	0,649	0,651
	32	0,544	0,814	0,822		16	0,404	0,643	0,650
	64	0,236	0,783	0,819		32	0,158	0,613	0,647
	128	0,054	0,675	0,807		64	0,032	0,512	0,636
33	2	0,488	0,488	0,488	34	2	0,234	0,249	0,249
	4	0,450	0,488	0,488		4	0,176	0,216	0,249
	8	0,344	0,492	0,488		8	0,075	0,238	0,248
	16	0,155	0,468	0,486		16	0,014	0,200	0,246
	32	0,034	0,405	0,480		32	0,001	0,117	0,228
	64	0,004	0,257	0,454		64	0,000	0,039	0,178
	128		0,095	0,370					
35	2	0,100	0,117	0,117					
	4	0,052	0,114	0,117					
	8	0,011	0,101	0,116					
	16	0,001	0,064	0,110					
	32		0,023	0,090					

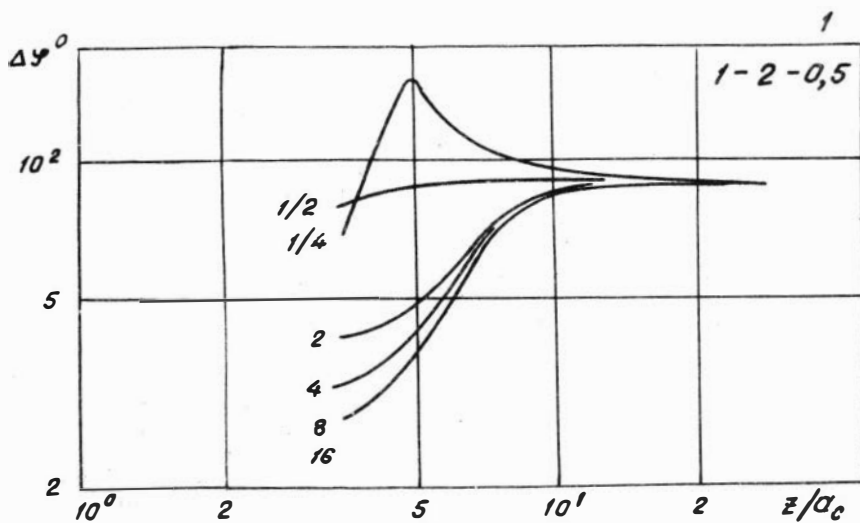
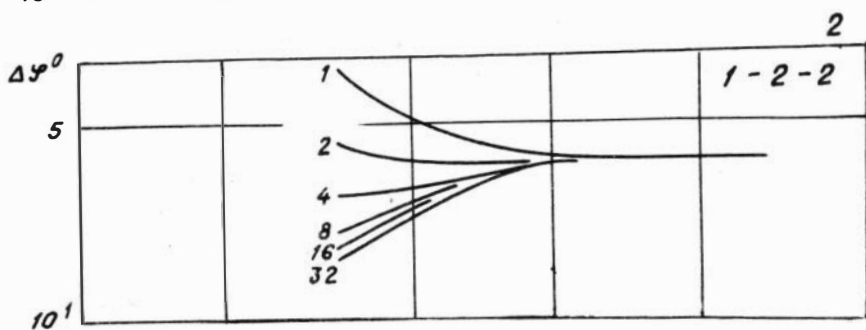
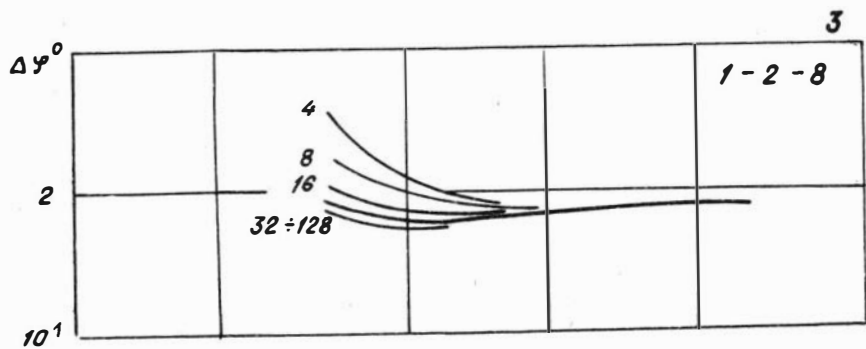
3.2. ТРЕХСЛОЙНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИ-СЛОИСТАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

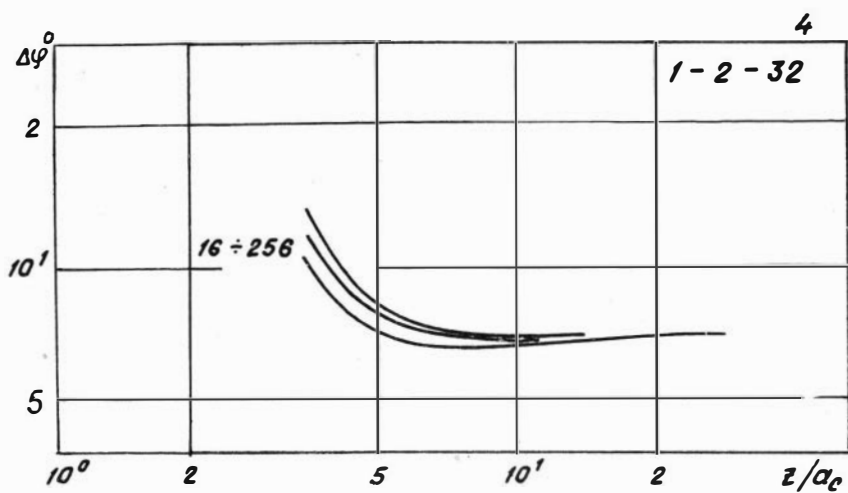
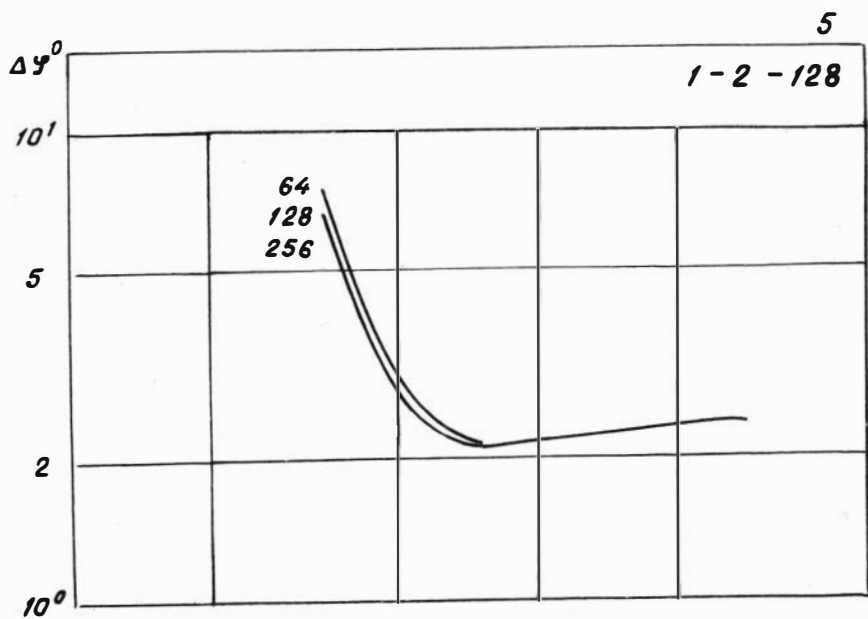
На рис. I - 36 и 37 - 72 приведены графики для разности фаз ($\Delta\varphi^\circ$) и модуля отношения разностной амплитуды зондов с равными прямыми полями к амплитуде поля наибольшего двухэлементного зонда $|dh|/|h_1|$ в зависимости от длины изопараметрических зондов в долях радиуса скважины (z_i/a_c). Значения ρ_n/ρ_c являются шифром кривых. Правила шифрования палеток и их нумерация даны в таблице. Последовательность цифр в шифре палетки, например, I-2-8 соответствует ρ_c , a_{3n}/a_c и ρ_n/ρ_c . В правой колонке таблицы с индексом n приведены номера рисунков. Номера рисунков в числителе присвоены циклу палеток для разности фаз, а в знаменателе - отношению амплитуд. Например, код рисунка № 3 - (I-2-8) - означает, что на этой палетке представлена зависимость $\Delta\varphi(z_i/a_c)$ для следующей модели: $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $a_{3n}/a_c = 2$, $\rho_n/\rho_c = 8$. Для номера 39 тот же код модели (I-2-8) соответствует другой характеристике поля: dh/h_1 . Таким образом, каждому из пяти значений ρ_n/ρ_c в строке в правой колонке той же строки приведены десять номеров палеток по два номера для каждого значения ρ_n . Следовательно, таблица может служить не только для расшифровки кода палеток, но и для поиска палетки с заданными параметрами модели. Например, если нужно найти кривые dh/h_1 для модели: $\rho_c = 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $a_{3n}/a_c = 4$ и $\rho_n/\rho_c = 2$, то с помощью таблицы, двигаясь слева направо по соответствующим строкам, устанавливаем, что искомые кривые помещены на бланке № 6I.

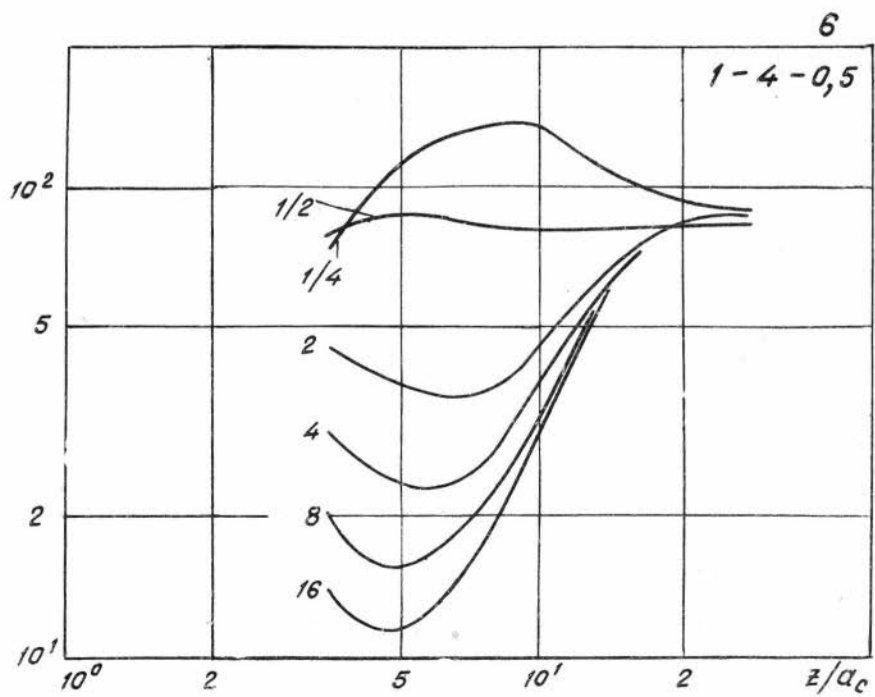
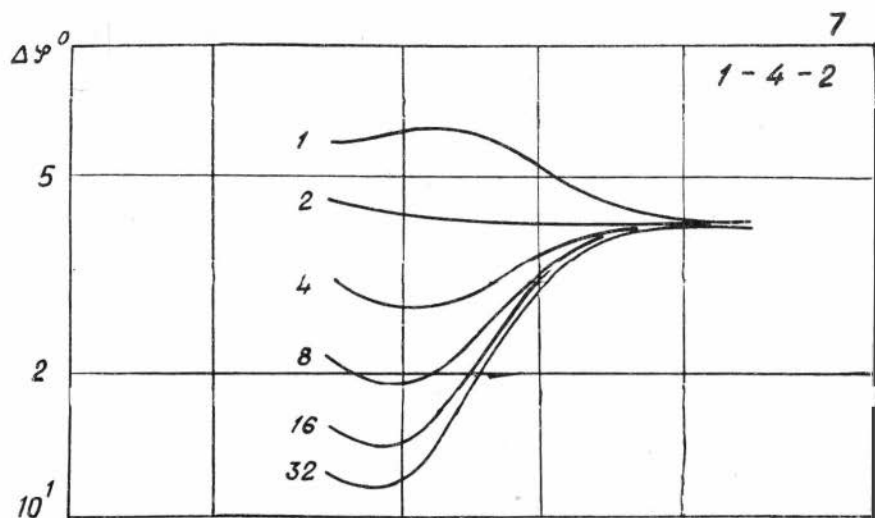
Кривые, приведенные на рисунках I - 72 сопровождаются численными данными строгих расчетов, которые сведены в таблицы. Таблицы составлены по группам чисел. Каждая группа соответствует определенному рисунку и оцифрована его номером.

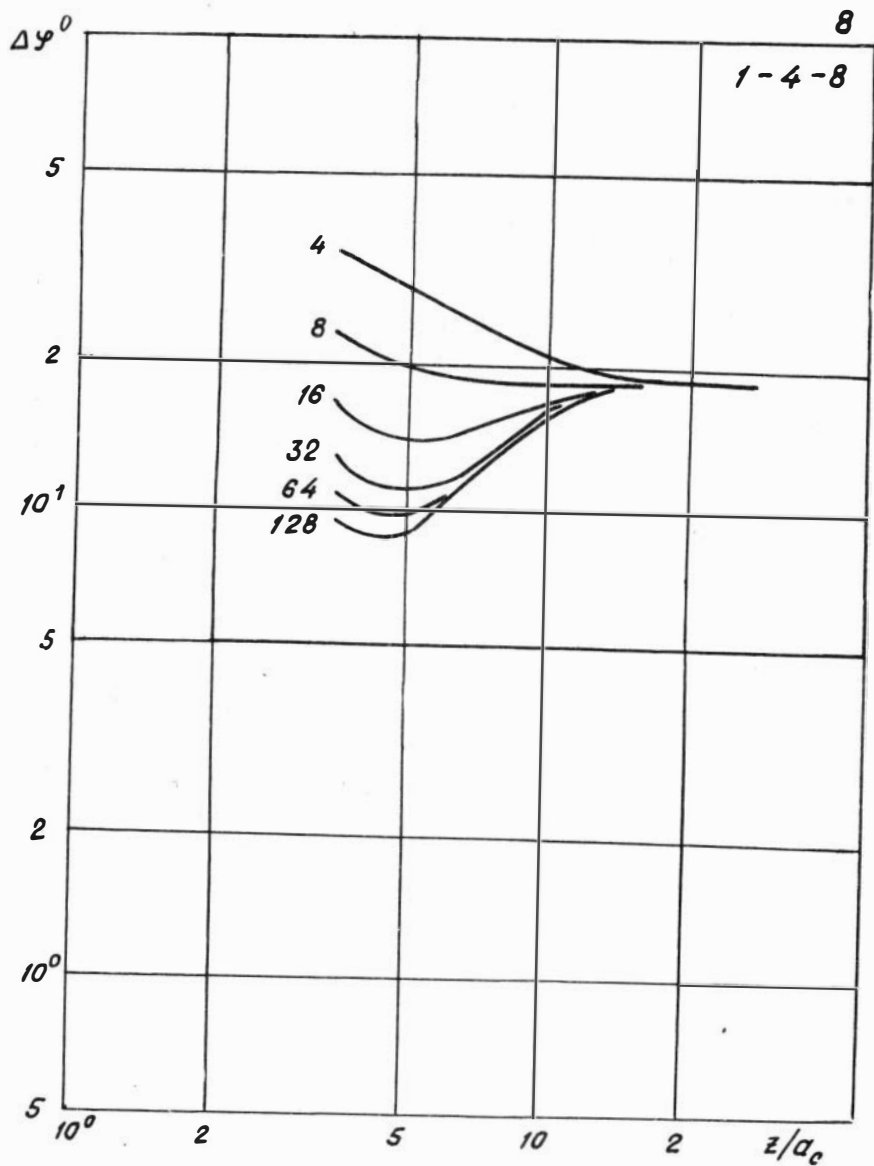
Расчеты трехслойных моделей выполнены по алгоритмам и программам разработанным Л.А.Табаровским, М.И.Эповым и другими сотрудниками лаборатории электромагнитных полей ИГиГ СО АН СССР.

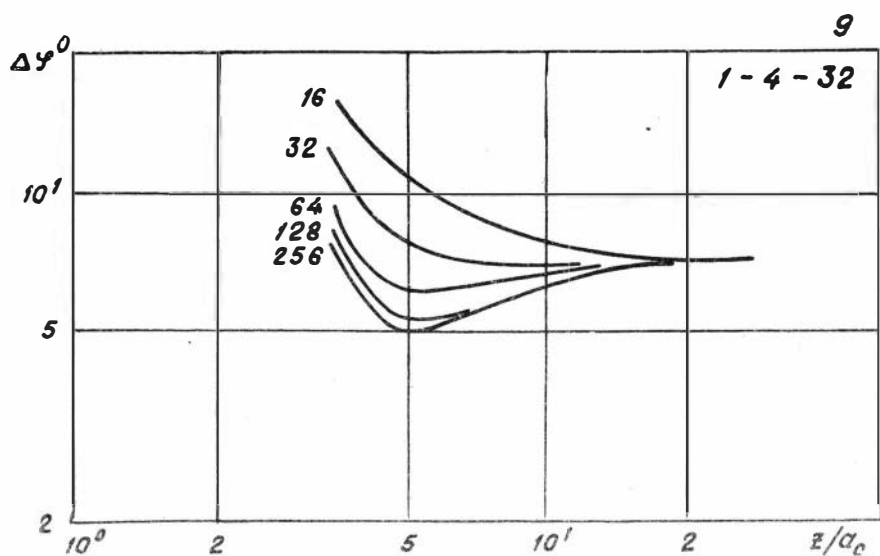
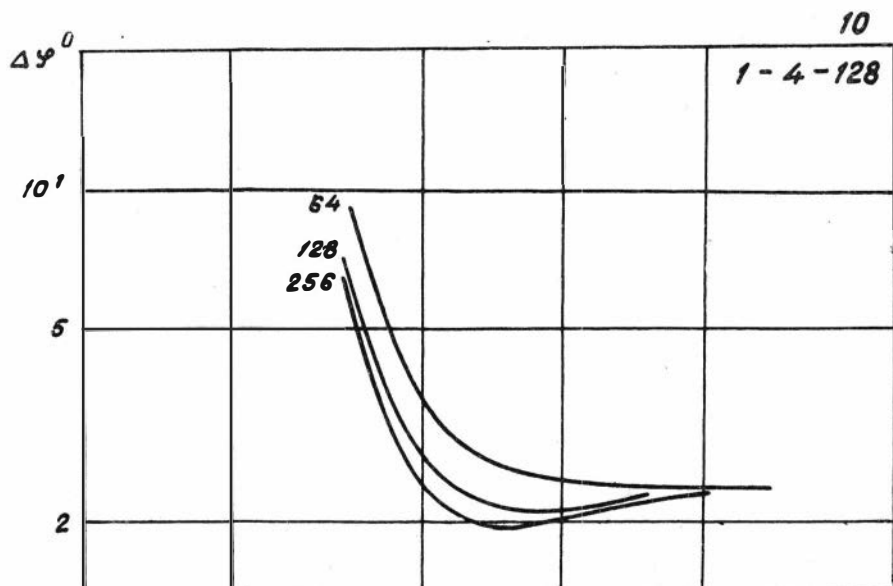
$\frac{\rho_c}{0,01 \cdot M}$	a_{3n}/a_c	ρ_n/ρ_c					n							
I	2	0,5	2	8	32	128	I	2	3	4	5	41		
							37	38	39	40				
	4	0,5	2	8	32	128	6	7	8	9	10	46		
							42	43	44	45				
0,25	8	0,5	2	8	32	128	II	12	13	14	15	51		
							47	48	49	50				
	16	0,5	2	8	32	128	I6	17	18	19	20	56		
							52	53	54	55				
	2	-	2	8	32	128	-	21	22	23	24	60		
								57	58	59				
	4	-	2	8	32	128	-	25	26	27	28	64		
								61	62	63				
	8	-	2	8	32	128	-	29	30	31	32	68		
								65	66	67				
	16	-	2	8	32	128		33	34	35	36	72		
								69	70	71				

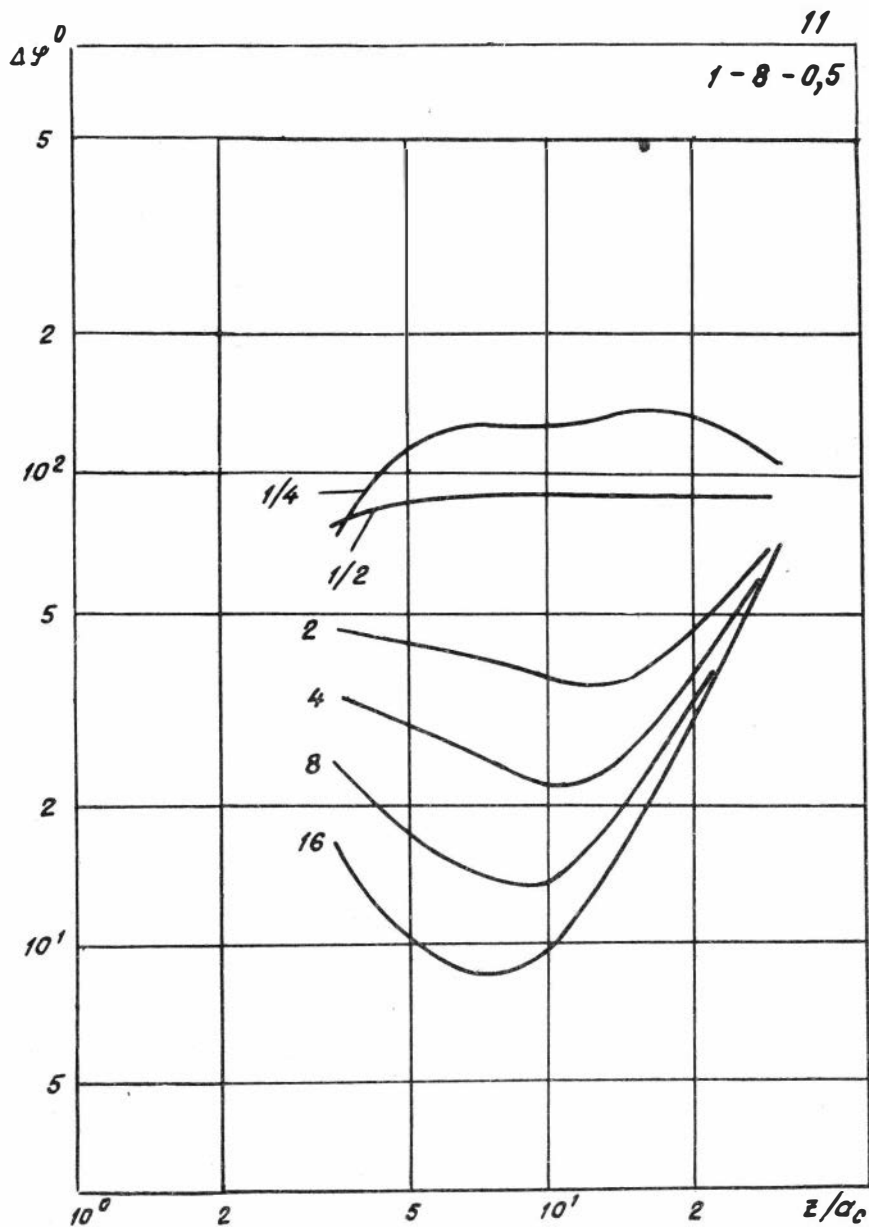


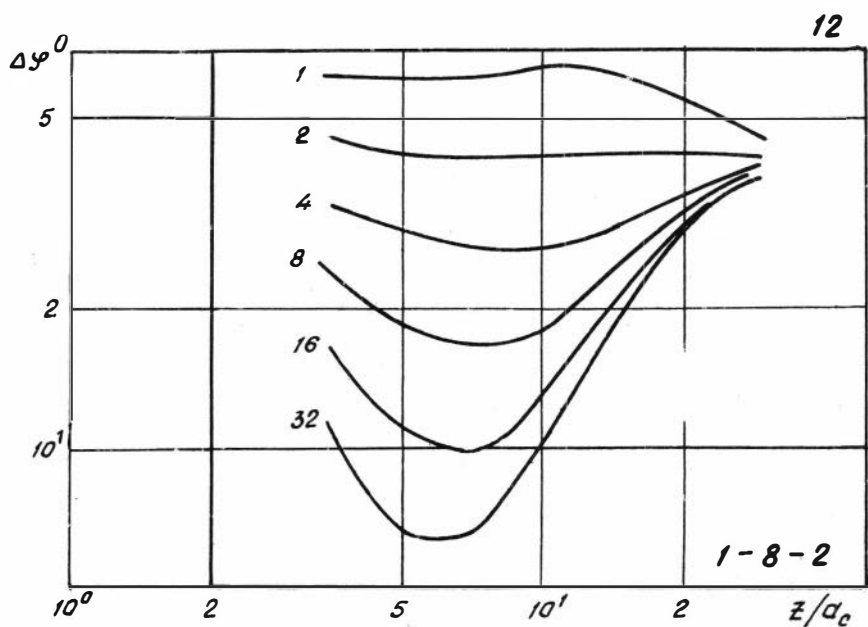
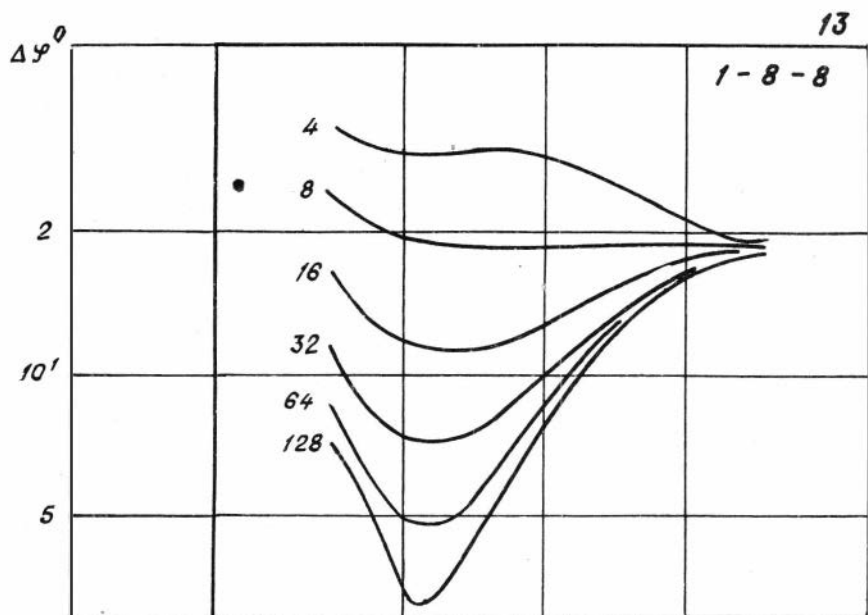


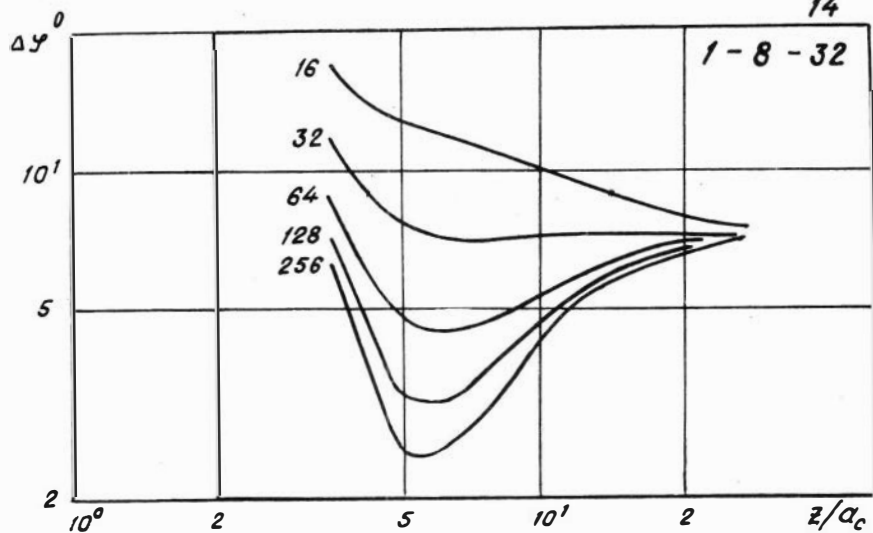
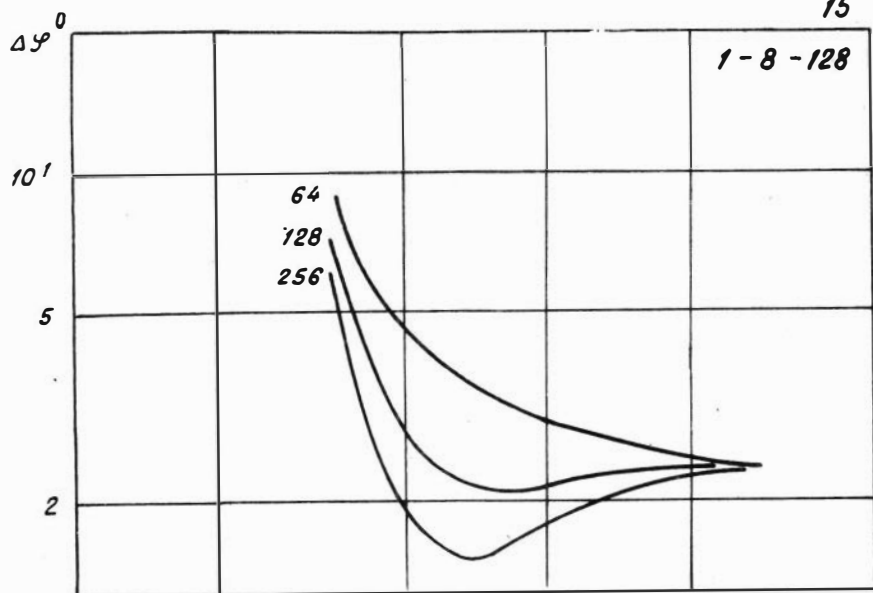


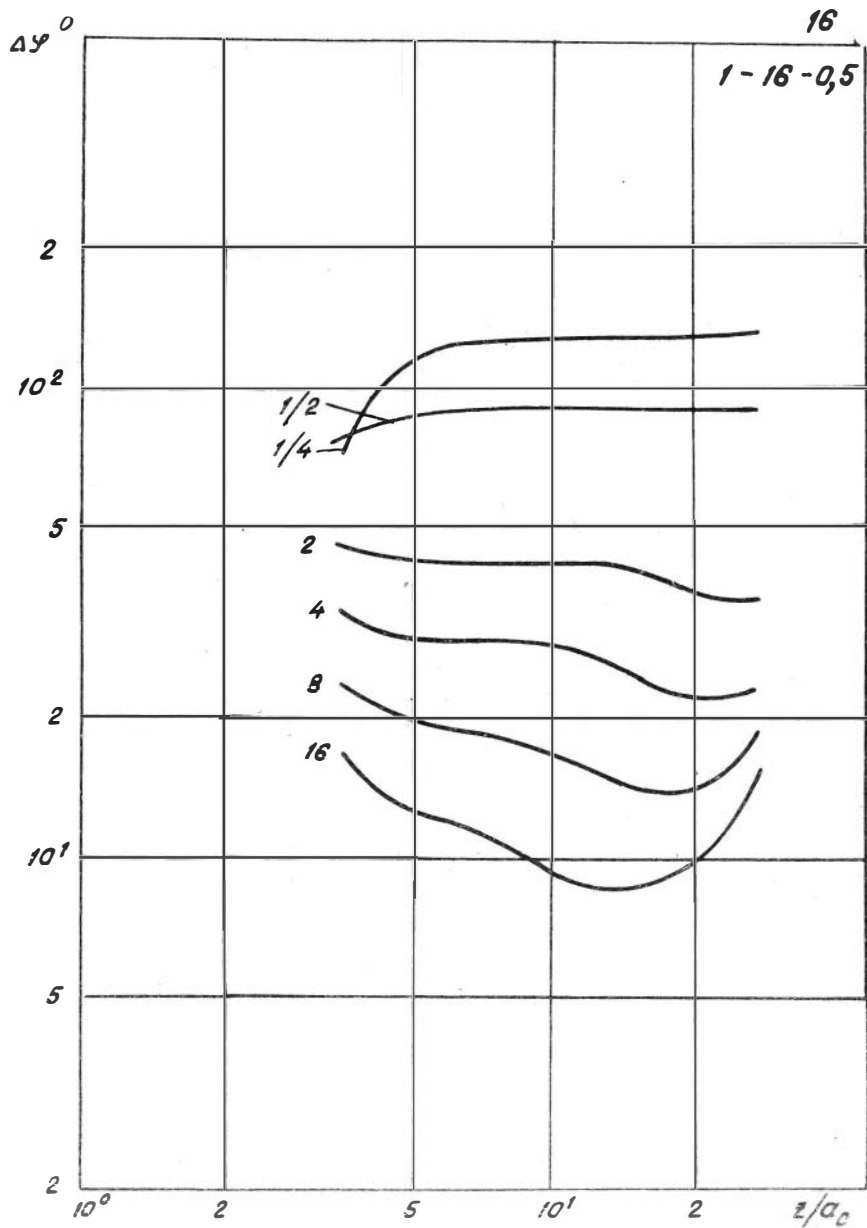


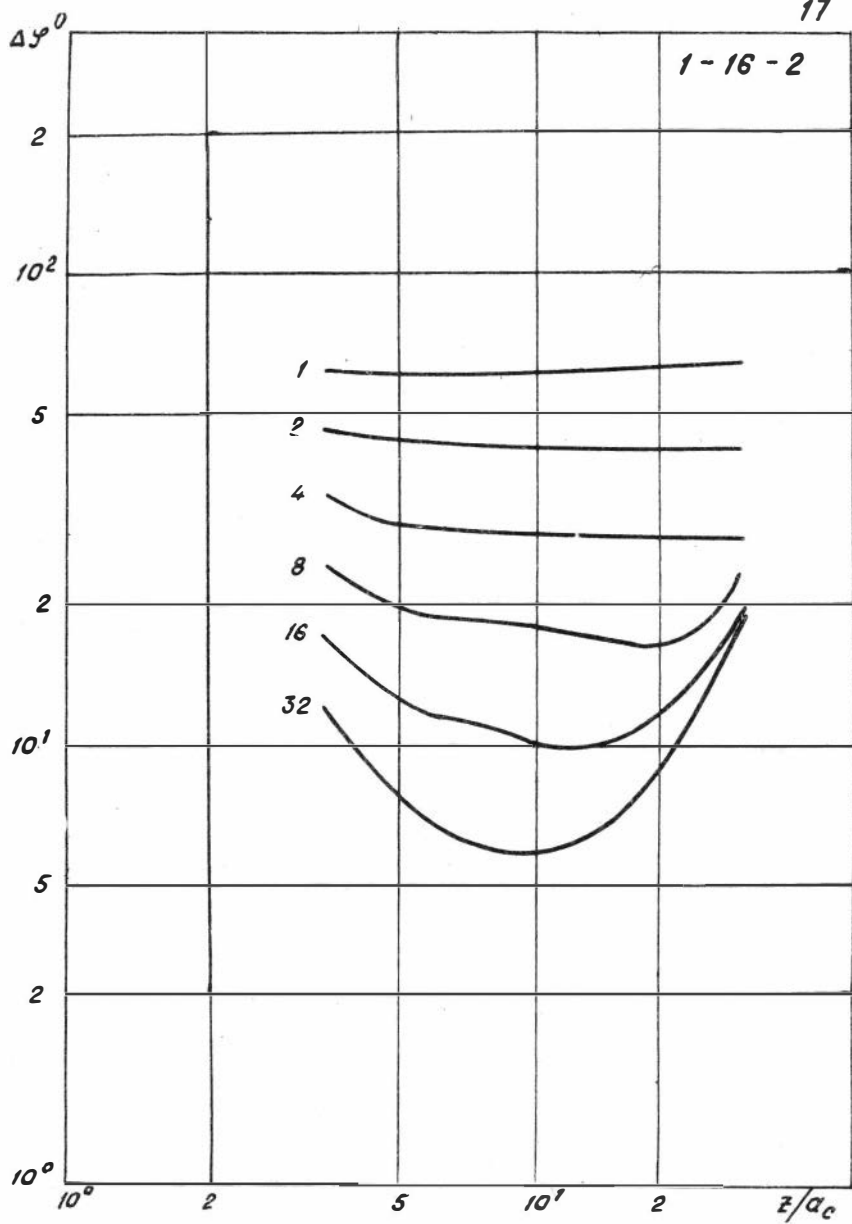












$\Delta \varphi^0$

18

1-16-8

 10^2

5

2

 10^1

2

5

 10^0 10^0

2

5

 10^1

2

 z/α_c

4

8

16

32

64

128

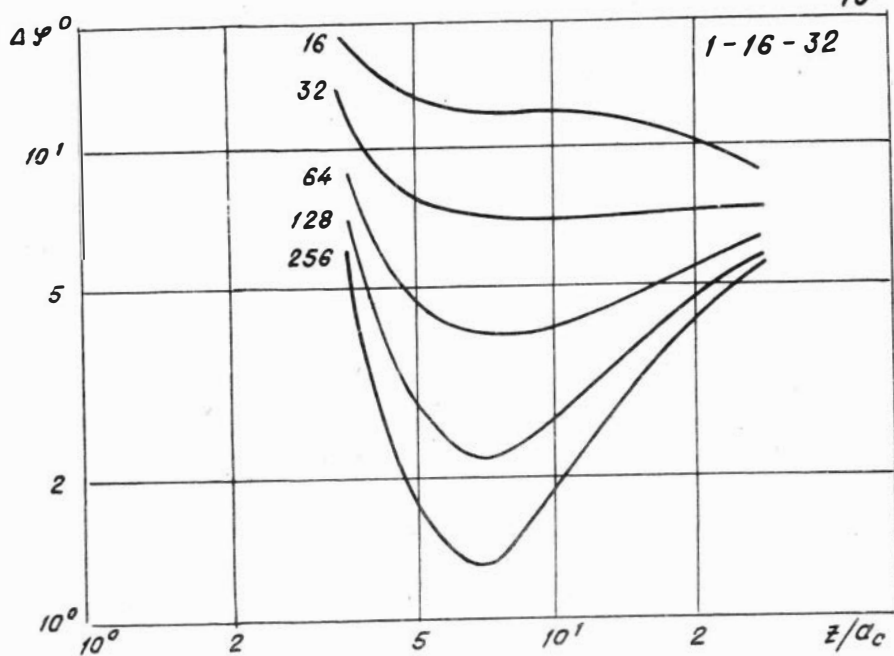
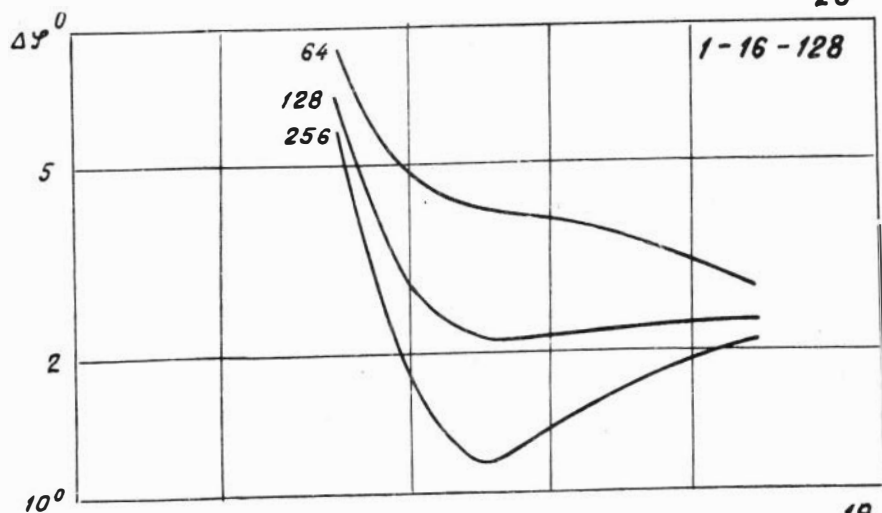
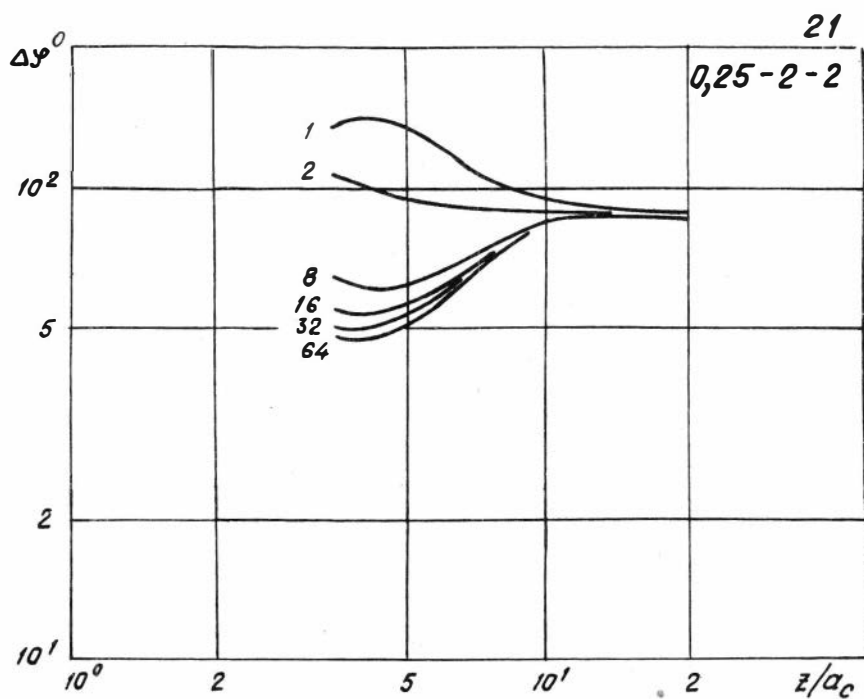
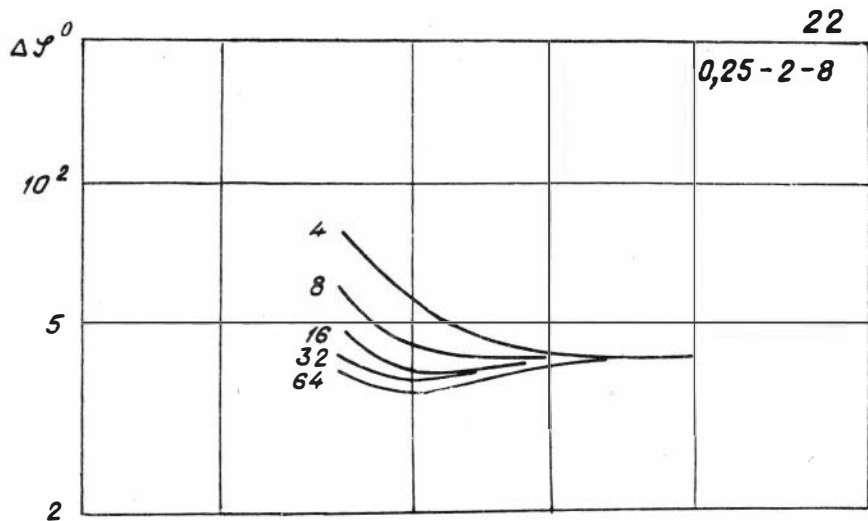


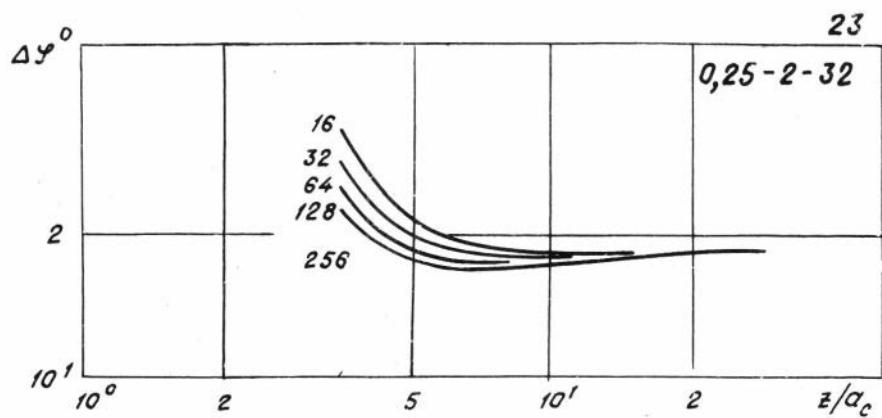
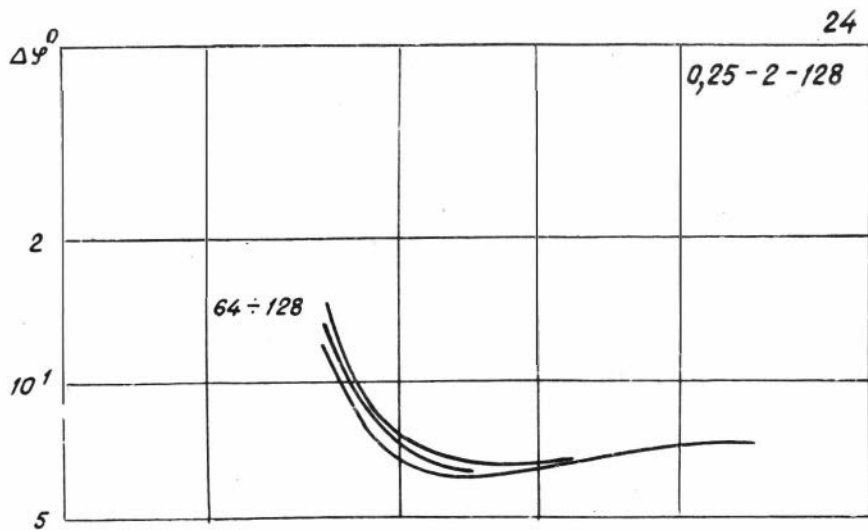
Таблица $\Delta \varphi^0$

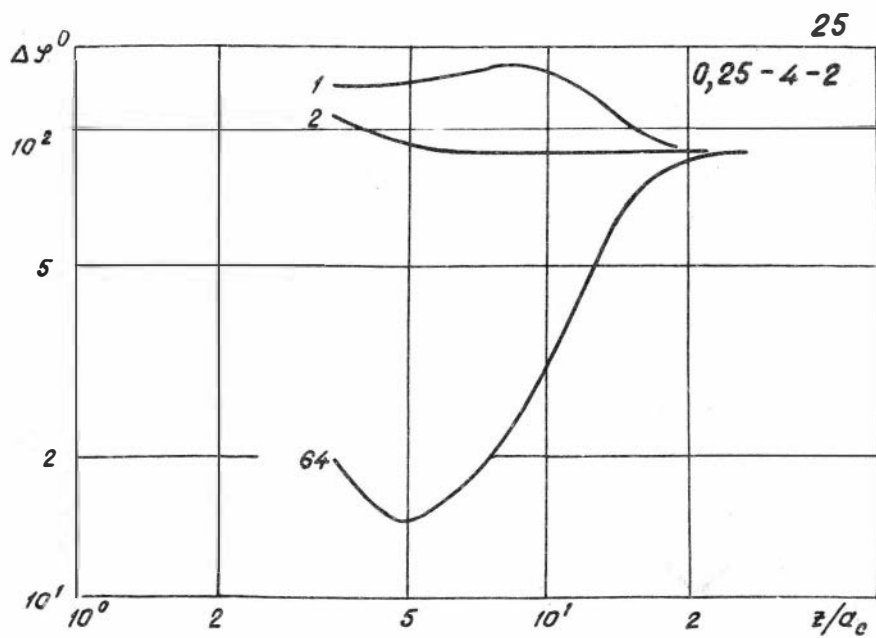
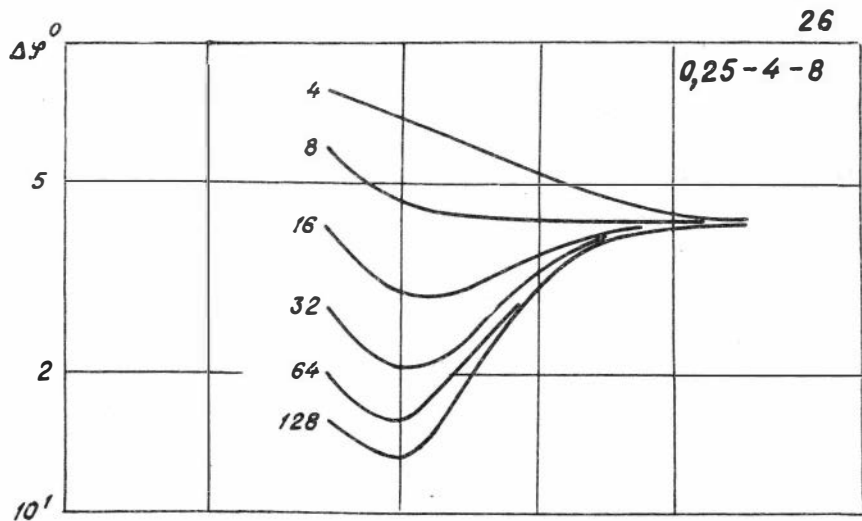
N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
1	0,25	145,2	93,09	88,41	2	1	53,63	42,84	42,14
	0,50	86,30	88,60	88,50		2	42,83	42,14	42,19
	2	47,85	85,30	88,60		4	37,12	41,81	42,21
	4	41,25	84,90	88,70		8	34,21	41,65	42,22
	8	37,92	84,70	88,70		16	32,74	41,58	42,23
	16	36,25	84,50	88,70		32	32,00	41,54	42,23
3	4	21,79	18,60	18,57	4	16	8,296	7,045	7,129
	8	19,28	18,49	18,58		32	7,689	7,023	7,132
	16	18,01	18,43	18,59		64	7,385	7,012	7,134
	32	17,37	18,41	18,59		128	7,233	7,006	7,135
	64	17,05	18,39	18,59		256	7,157	7,003	7,138
5	64	2,967	2,216	2,327	6	0,25	116,1	136,1	92,98
	128	2,816	2,211	2,327		0,5	86,30	88,60	88,50
	256	2,741	2,208	2,328		2	37,27	45,55	85,40
7				4		23,29	37,60	85,10	
				8		15,53	33,55	85,00	
				16		11,48	31,51	85,00	
				4	29,64	22,16	18,68		
				8	19,28	18,49	18,58		
				16	13,77	17,14	18,53		
9				32	10,94	16,47	18,51		
				64	9,515	16,13	18,50		
				128	8,797	15,96	18,49		
				64	3,638	2,368	2,332		
				128	2,816	2,211	2,327		
				256	2,405	2,132	2,325		

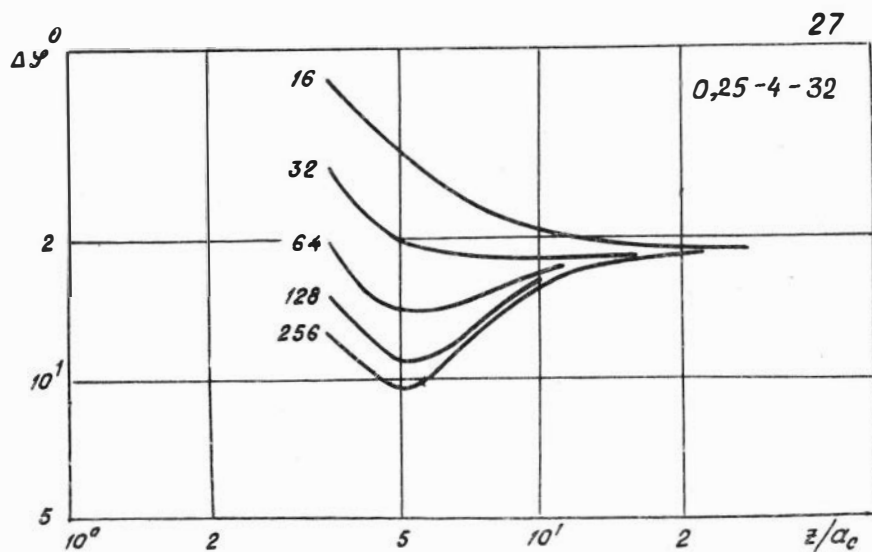
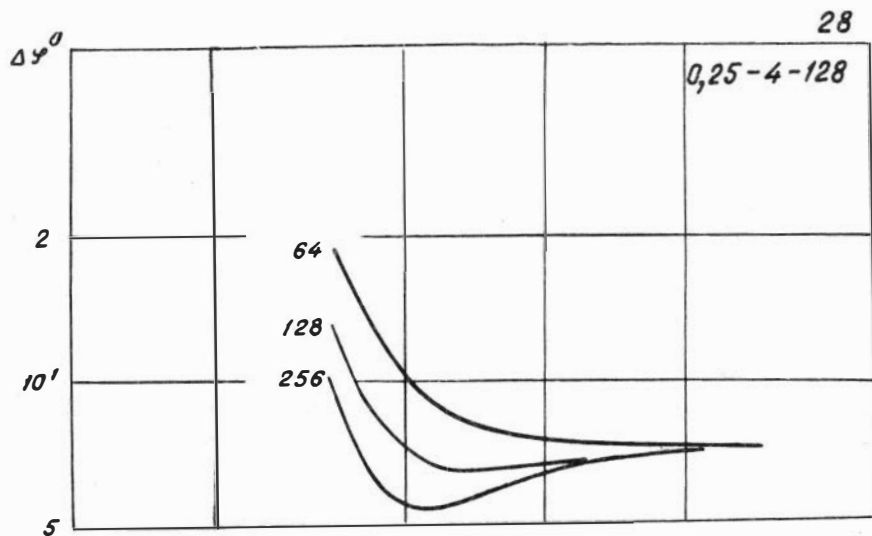
Таблица $\Delta \varphi^v$

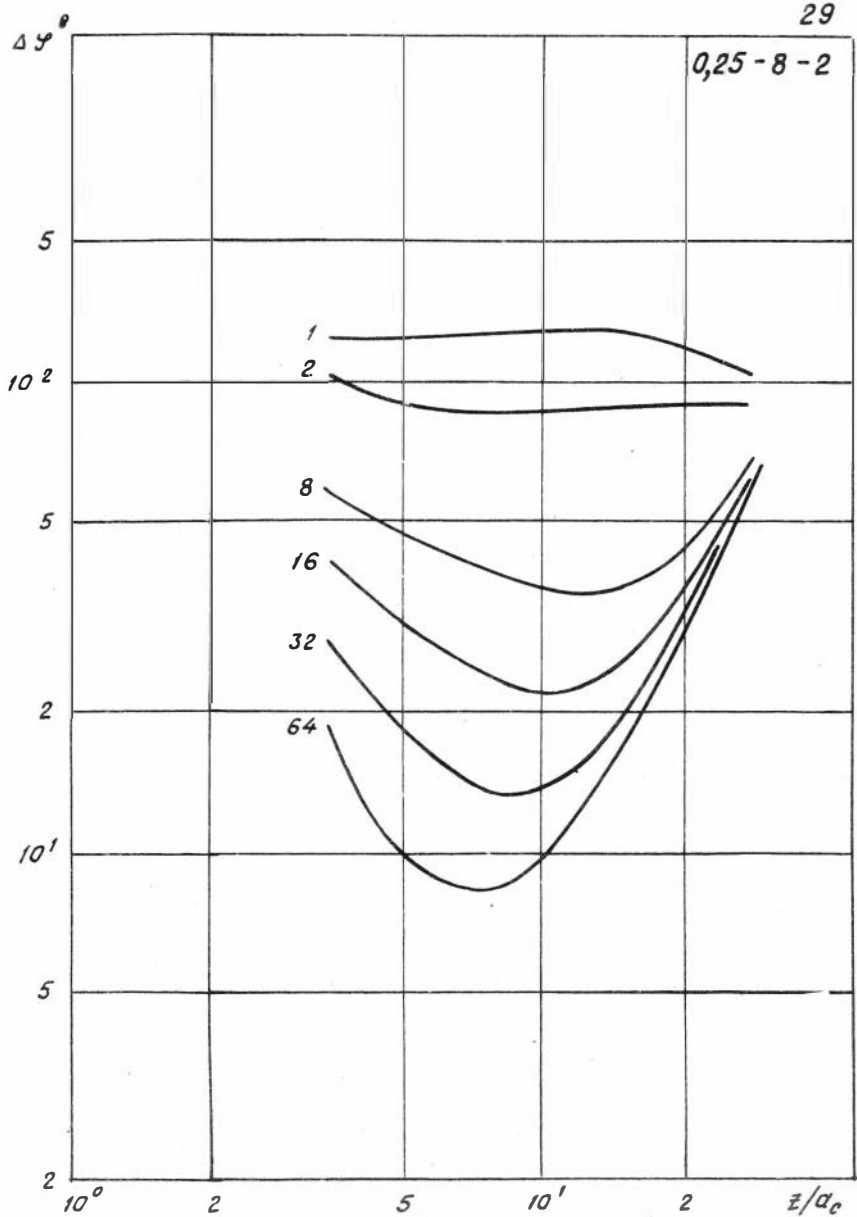
N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
II	I/4	II6,3	I26,4	I34,5	I2	I	6I,5I	64,43	53,63
	I/2	86,30	88,60	88,50		2	42,83	42,14	42,19
	2	42,95	36,36	45,43		4	29,08	26,49	35,98
	4	29,02	2I,88	37,38		8	I8,47	I7,50	32,79
	8	I7,86	I3,88	33,28		I6	II,0I	I2,74	3I,I7
	I6	IO,28	9,7I2	3I,22		32	6,60I	IO,30	30,35
I3	4	29,I9	29,04	2I,24	I4	I6	I2,69	IO,I8	7,767
	8	I9,28	I8,49	I8,58		32	7,689	7,023	7,I32
	I6	II,94	I2,90	I7,24		64	4,825	5,433	6,8I5
	32	7,3I7	IO,03	I6,58		I28	3,3I5	4,635	6,656
	64	4,762	8,588	I6,23		256	2,544	4,236	6,577
	I28	3,43I	7,862	I6,06					
I5	64	4,470	3,037	2,484	I6	I/4	II6,3	I26,7	I26,I
	I28	2,8I6	2,2II	2,327		I/2	86,30	88,60	88,50
	256	I,973	I,797	2,249		2	42,83	42,27	36,38
						4	29,I3	28,23	2I,89
						8	I9,29	I7,07	I3,88
I7	I	6I,50	6I,5I	64,43	I8	I6	I2,4I	9,475	9,7IO
	2	42,83	42,I4	42,I9		4	29,I3	28,36	29,I3
	4	29,I3	28,28	26,54		8	I9,28	I8,49	I8,58
	8	I9,28	I7,67	I7,54		I6	I2,38	II,I9	I2,99
	I6	I2,40	IO,22	I2,78		32	7,604	6,590	IO,I2
	32	7,539	5,823	IO,35		64	4,456	4,045	8,677
I9					20	I28	2,623	2,7I9	7,95I
	I6	I2,36	I2,00	IO,29		64	4,724	3,859	3,I53
	32	7,689	7,023	7,I32		I28	2,8I6	2,2II	2,327
	64	4,60I	4,I73	5,543		256	I,75I	I,37I	I,9I4
	I28	2,742	2,670	4,746					
	256	I,732	I,902	4,346					

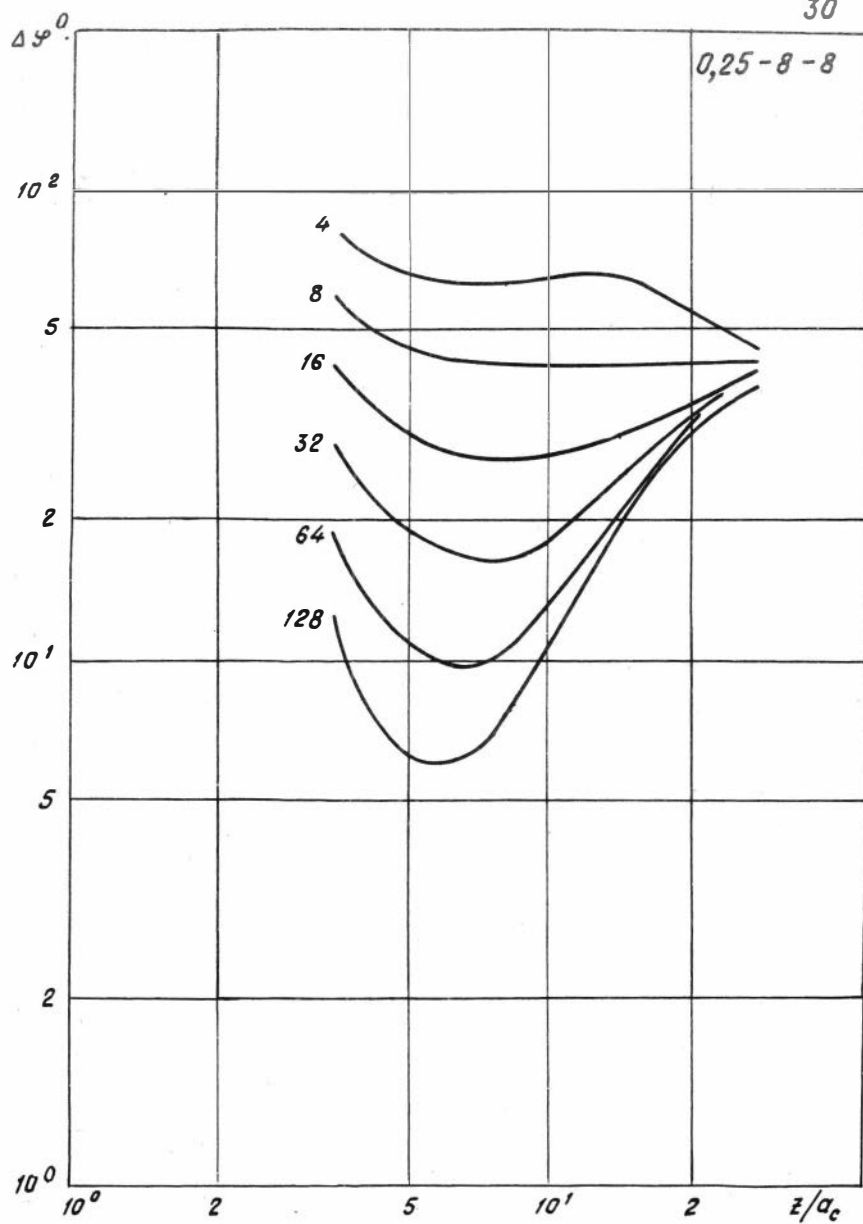


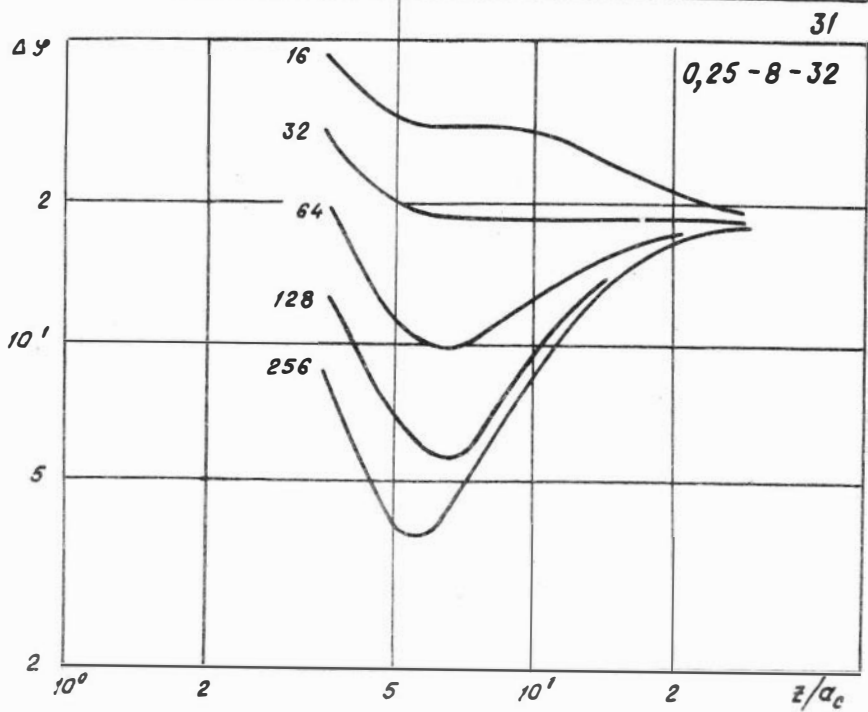
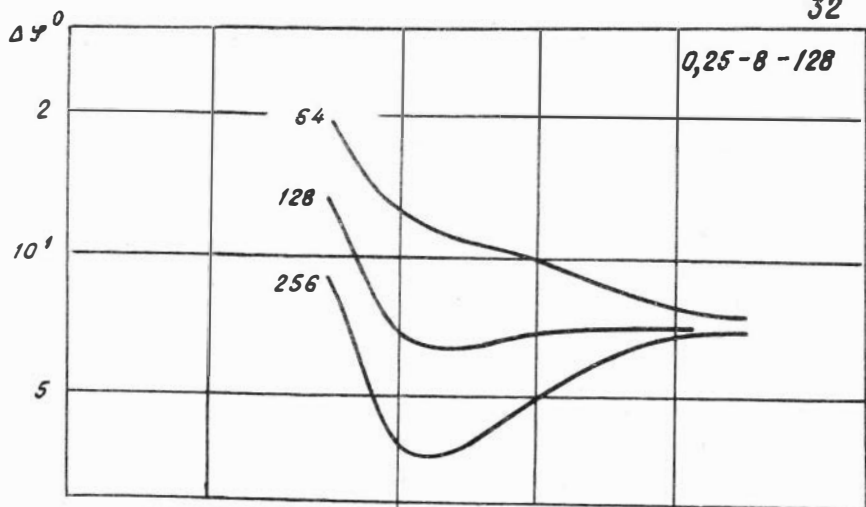


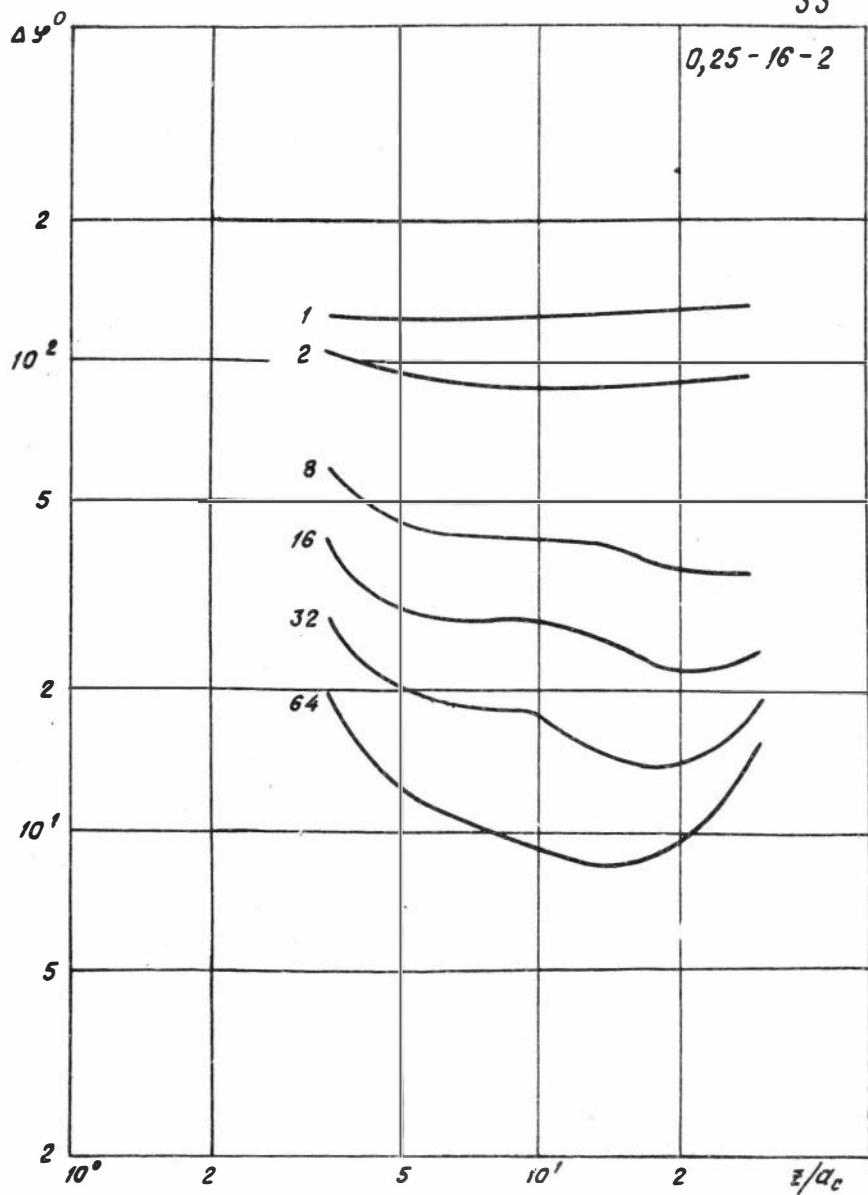


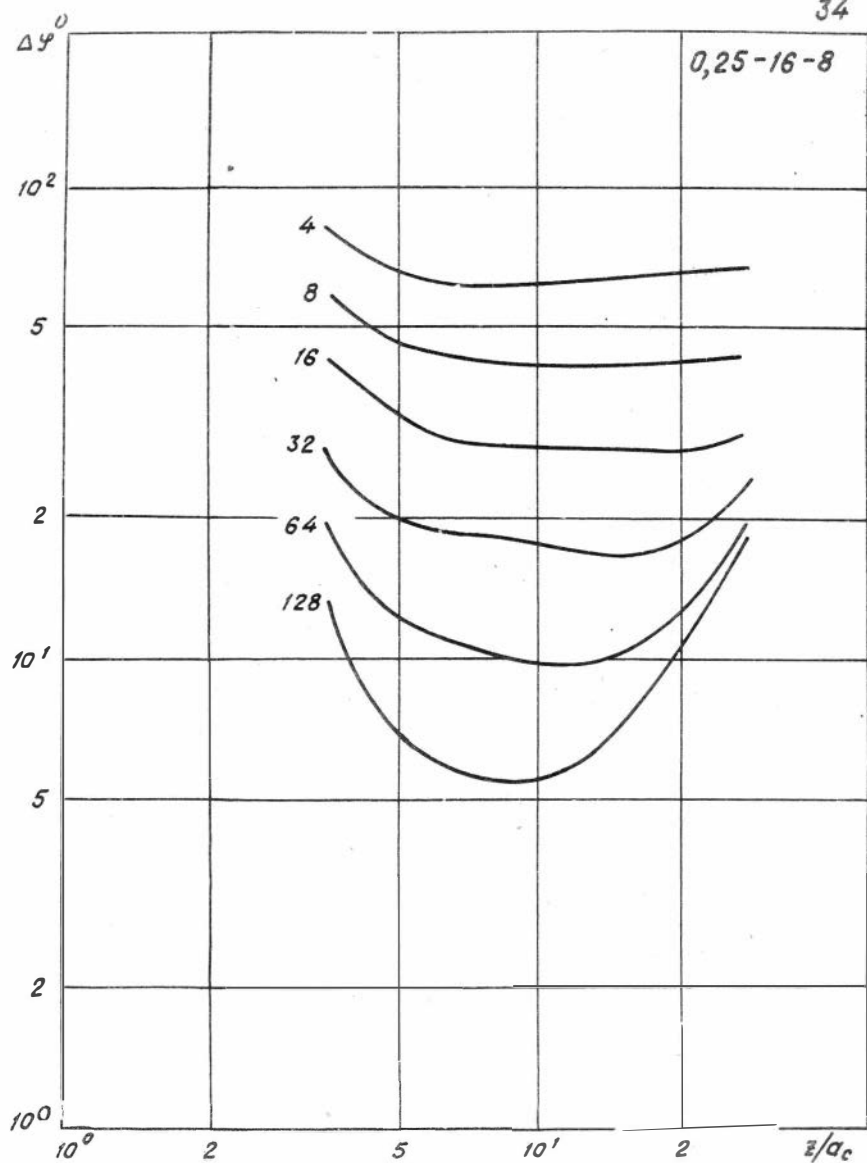




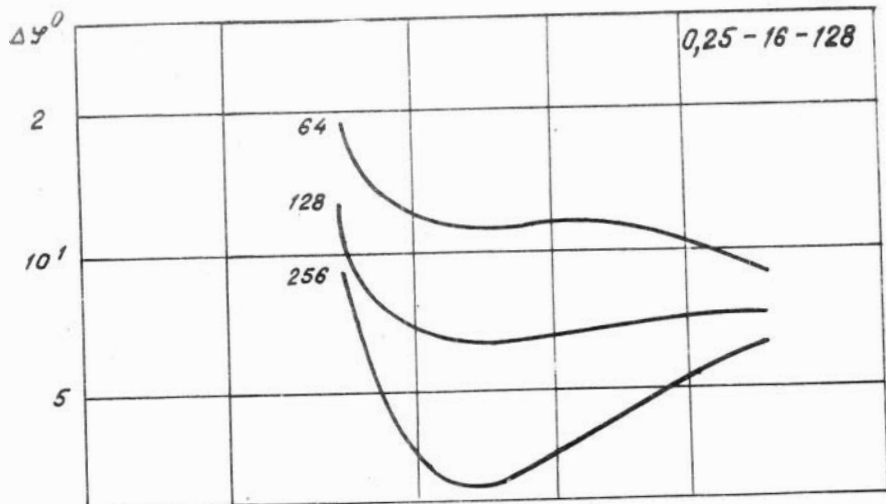








36



35

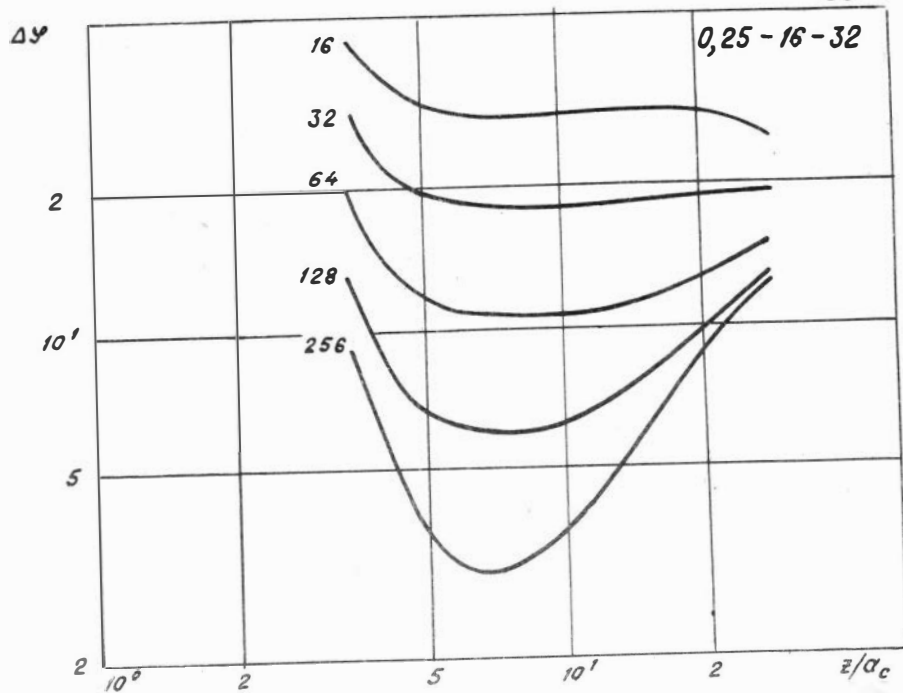
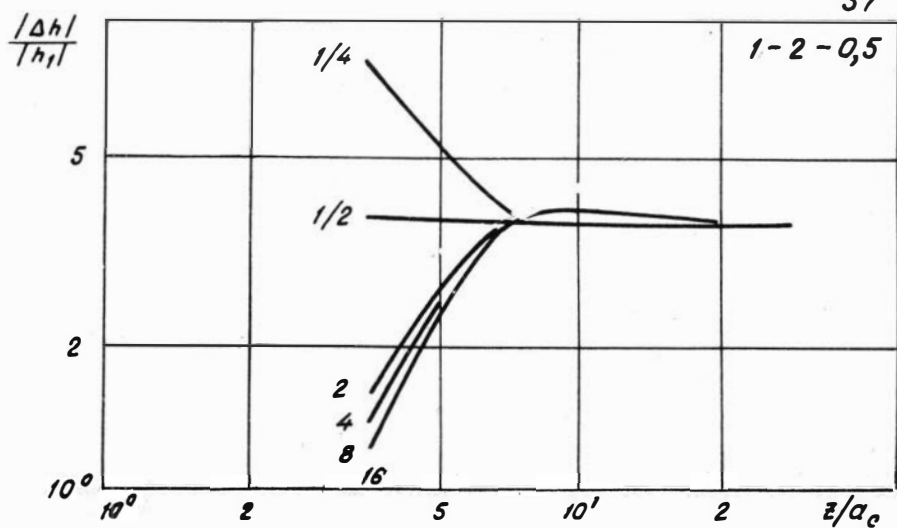
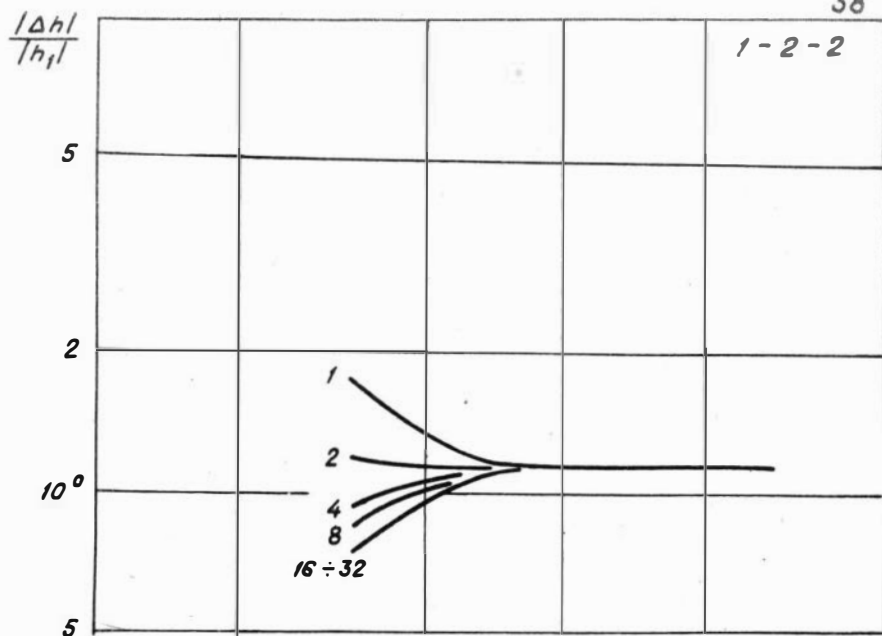


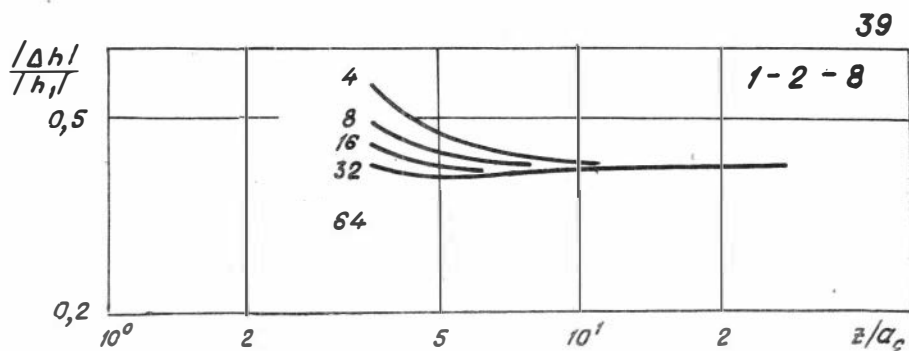
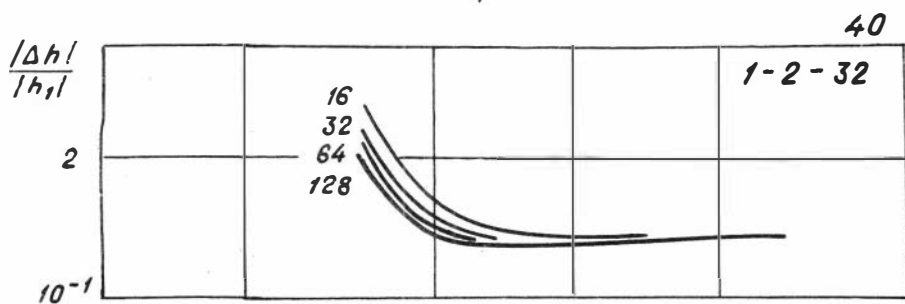
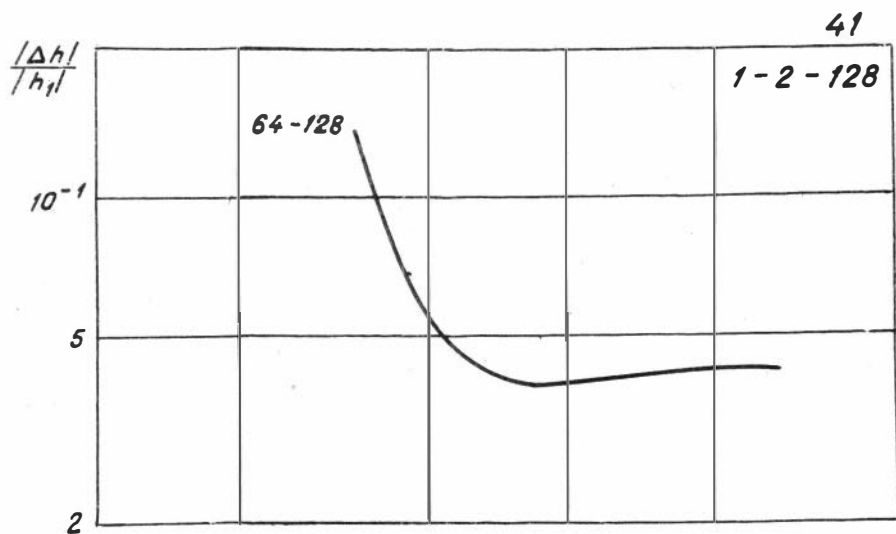
Таблица 49°

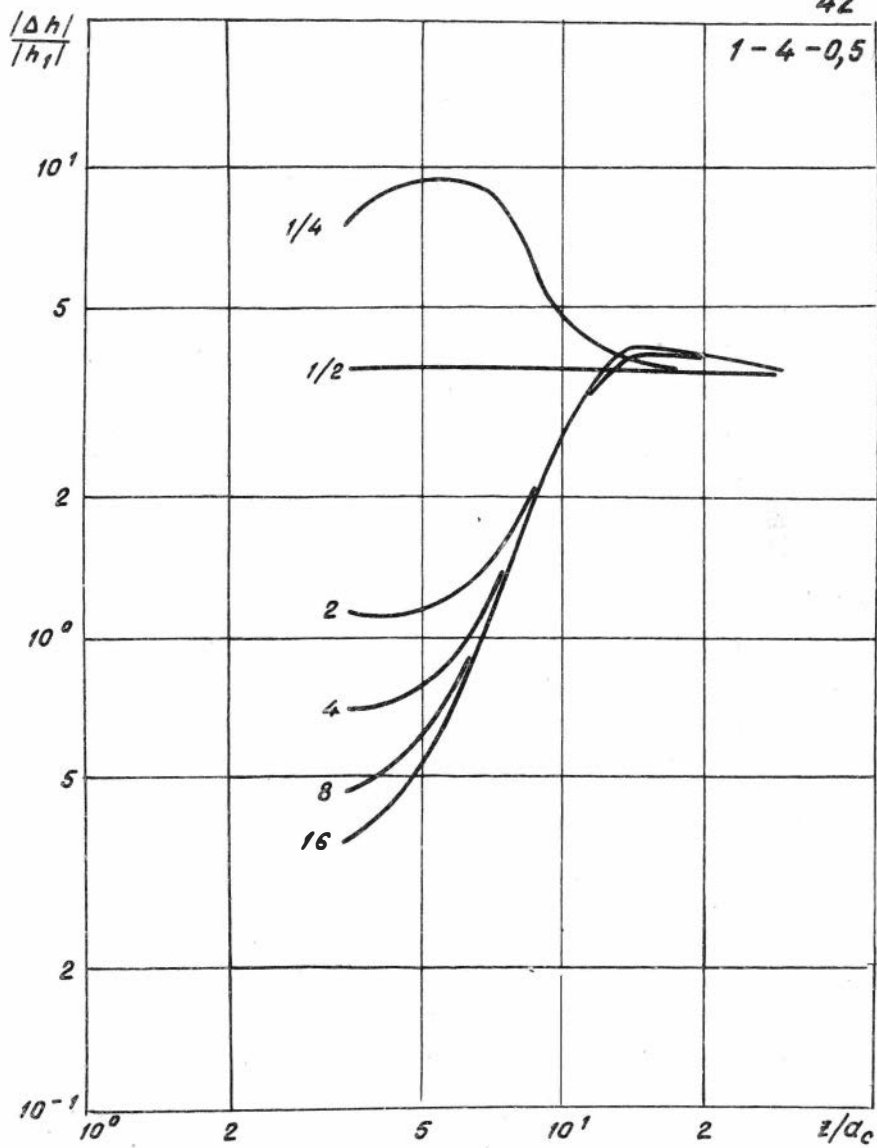
N	ρ_{Δ}/ρ_c	z/a_c			N	ρ_{Δ}/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
21	I	134,3	92,92	88,34	22	4	54,87	42,53	42,08
	2	92,92	88,34	89,50		8	45,40	41,83	42,13
	8	60,16	84,60	88,60		16	40,40	41,48	42,15
	16	54,20	84,01	88,60		32	37,80	41,31	42,16
	32	51,20	83,80	88,60		64	36,50	41,23	42,17
	64	49,70	83,70	88,60		128	35,90	38,78	42,17
23	16	21,86	18,24	18,51	24	64	7,530	6,653	7,152
	32	19,62	18,13	18,52		128	6,993	6,631	7,072
	64	18,49	18,08	18,53		256	6,723	6,621	7,073
	128	17,92	18,05	18,53					
	256	17,64	18,03	18,53					
25	I	126,0	134,3	92,92	26	4	68,64	53,20	42,77
	2	92,92	88,34	88,50		8	55,40	41,83	42,13
	64	14,13	32,64	84,70		16	29,60	35,72	41,82
						32	20,59	32,57	41,68
						64	15,77	30,98	41,61
27	16	30,10	20,77	18,62	28	128	13,30	30,18	41,58
	32	19,62	18,13	18,52		64	10,17	7,262	7,152
	64	14,02	16,80	18,47		128	6,993	6,631	7,072
	128	11,13	16,13	18,45		256	5,381	6,316	7,062
	256	9,670	15,79	18,44					
29	I	126,4	126,0	134,3	30	4	65,89	64,50	53,56
	2	92,92	88,34	88,50		8	45,40	41,83	42,13
	8	45,50	36,24	45,46		16	30,30	26,27	35,93
	16	30,20	21,83	37,42		32	18,77	17,32	32,73
	32	18,11	13,85	33,33		64	10,80	12,58	31,11
	64	10,07	9,693	31,26		128	12,39	10,15	30,30

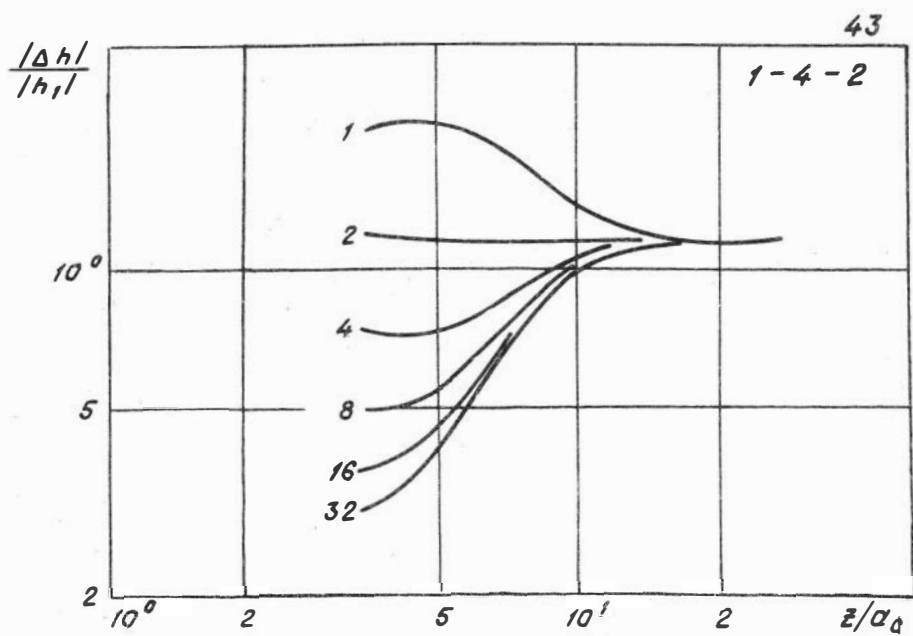
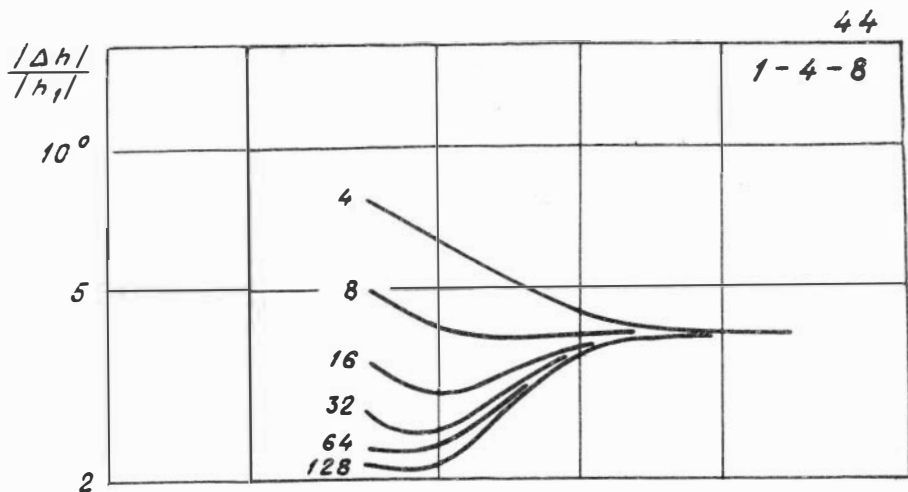
Таблица $\Delta \varphi^\circ$

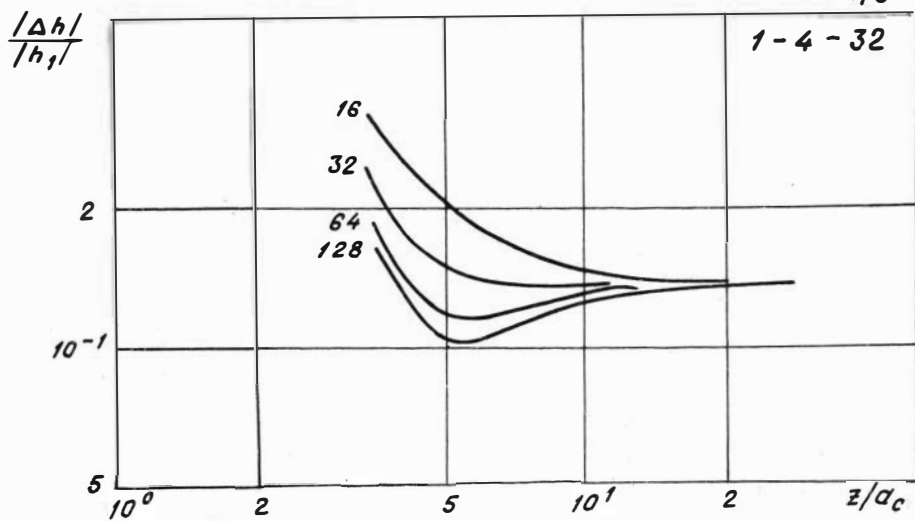
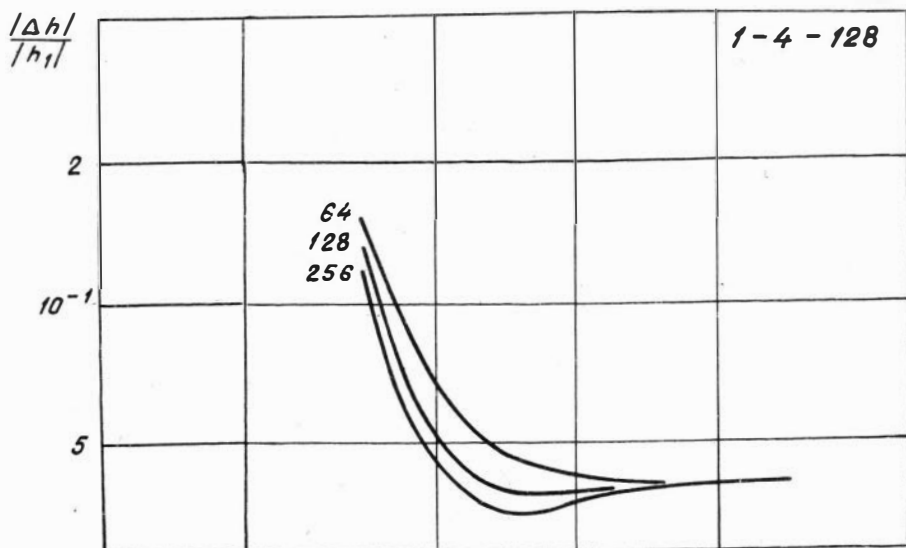
N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
30	4	65,89	64,10	53,56	31	16	30,50	28,60	21,18
	8	45,40	41,83	42,13		32	19,62	18,13	18,52
	16	30,30	26,27	35,93		64	11,70	12,57	17,18
	32	18,77	17,32	32,73		128	6,757	9,720	16,51
	64	10,80	12,58	31,11		256	4,033	8,280	16,17
	128	6,121	10,15	30,30					
32	64	12,36	9,773	7,706	33	1	126,4	126,0	126,0
	128	6,993	6,631	7,072		2	92,92	88,34	88,50
	256	3,937	5,047	6,754		8	45,40	41,34	36,31
						16	30,40	27,88	21,85
						32	19,63	16,71	13,85
						64	12,12	9,127	9,679
34	4	65,89	61,20	64,40	35	16	30,40	28,03	29,06
	8	45,40	41,83	42,13		32	19,62	18,13	18,52
	16	30,40	27,93	26,49		64	12,09	10,82	12,93
	32	19,63	17,32	17,50		128	6,896	6,219	10,07
	64	12,11	9,869	12,74		256	3,491	3,672	8,622
	128	6,821	5,468	10,30					
36	64	12,08	11,61	10,23					
	128	6,993	6,631	7,072					
	256	3,640	3,779	5,483					

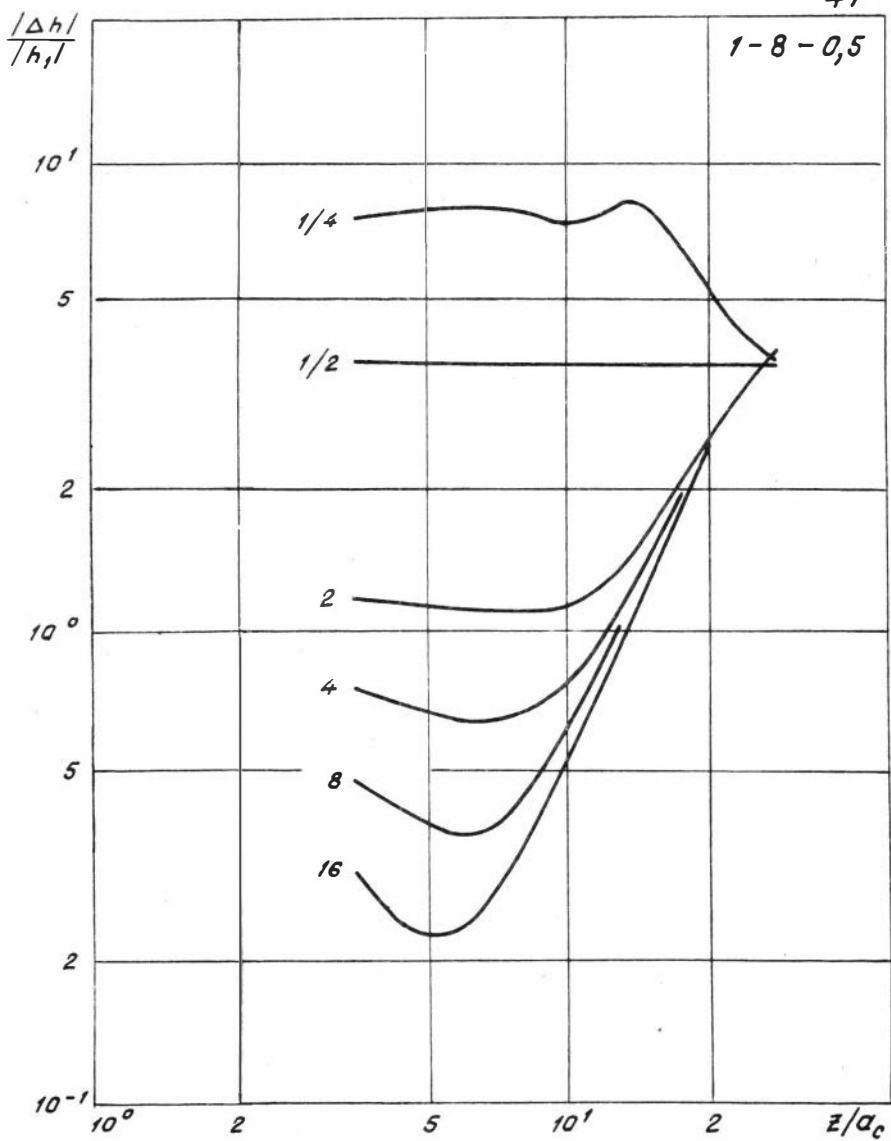




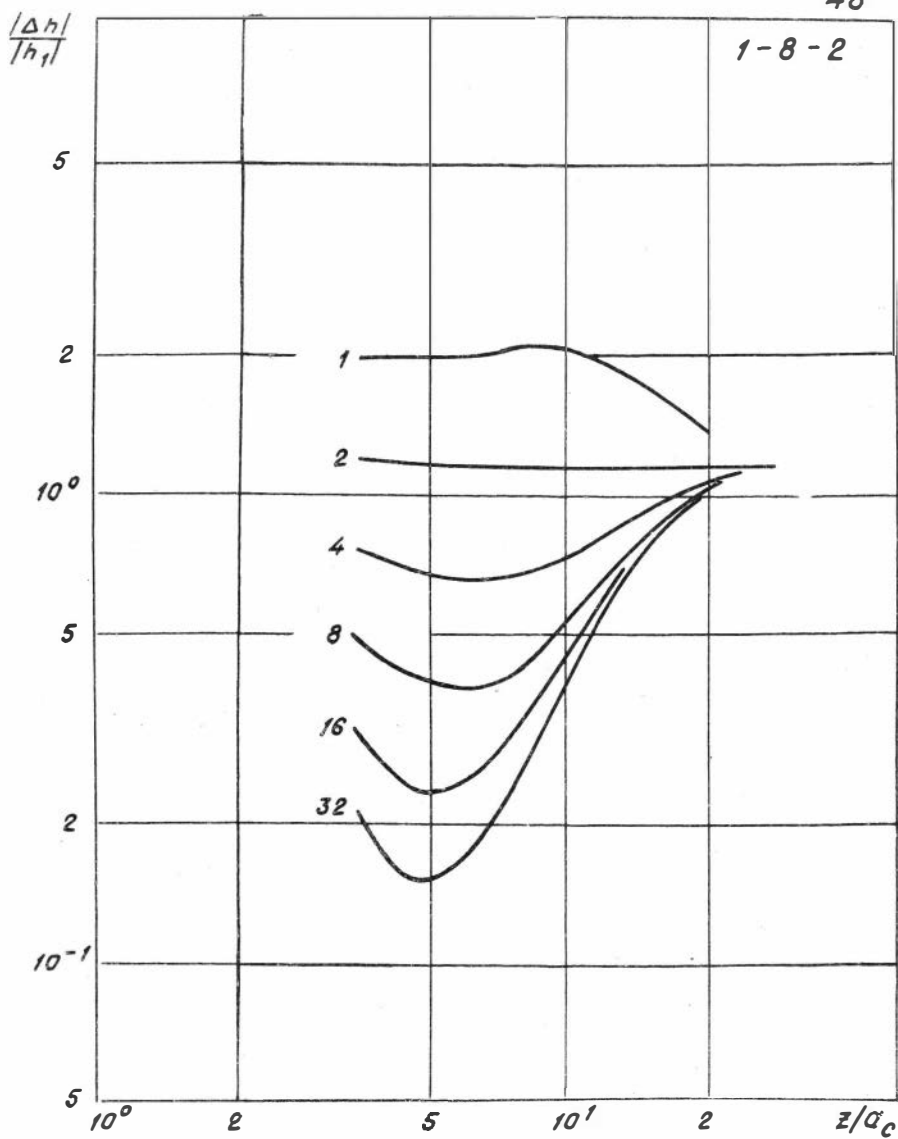


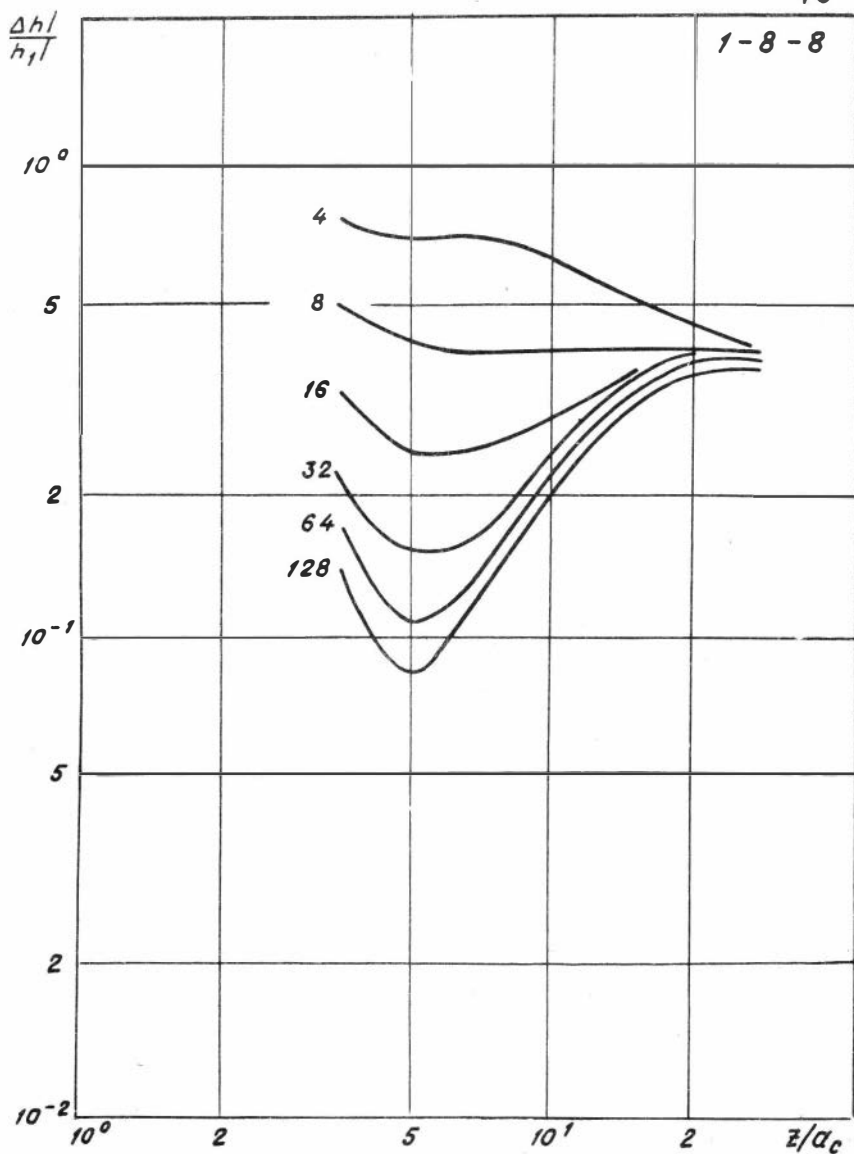


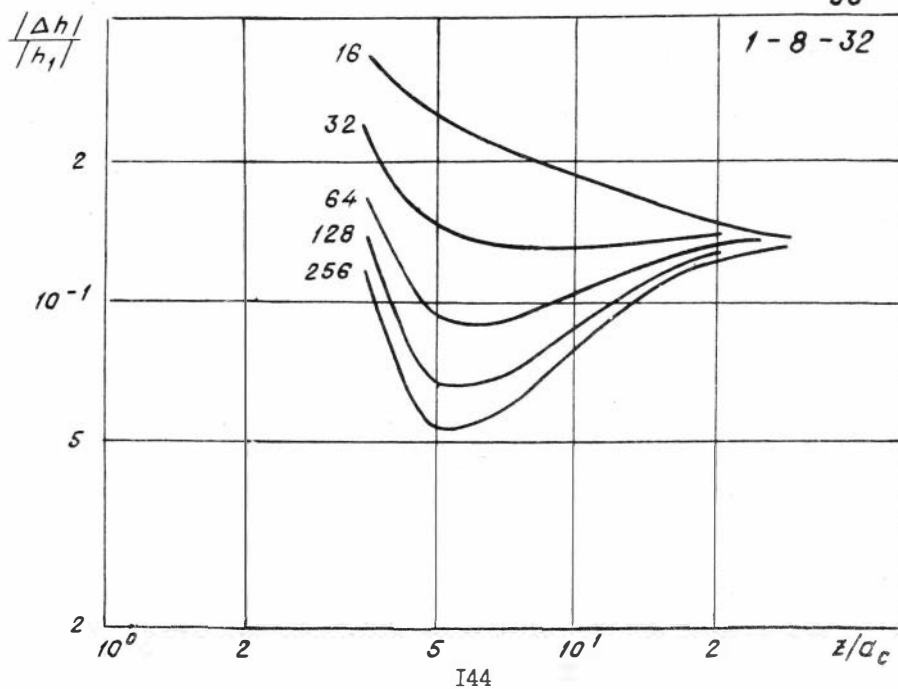
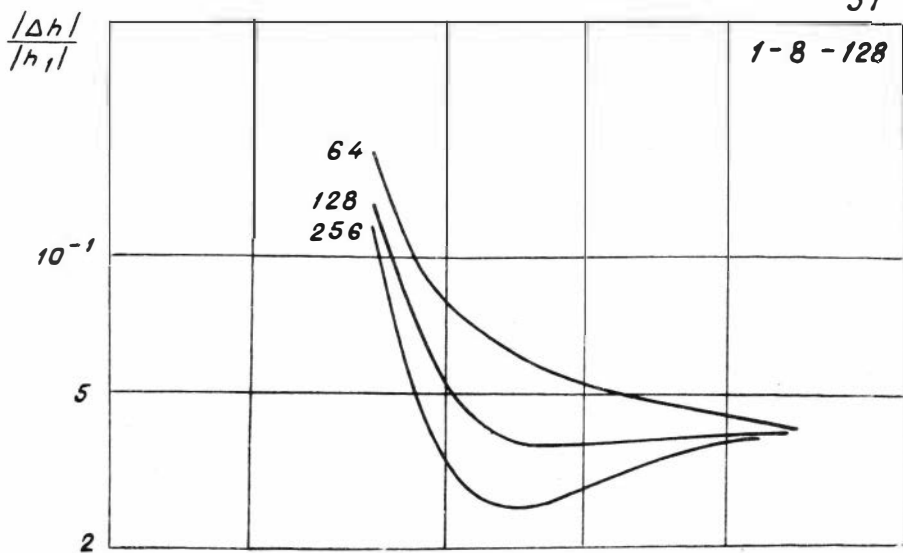


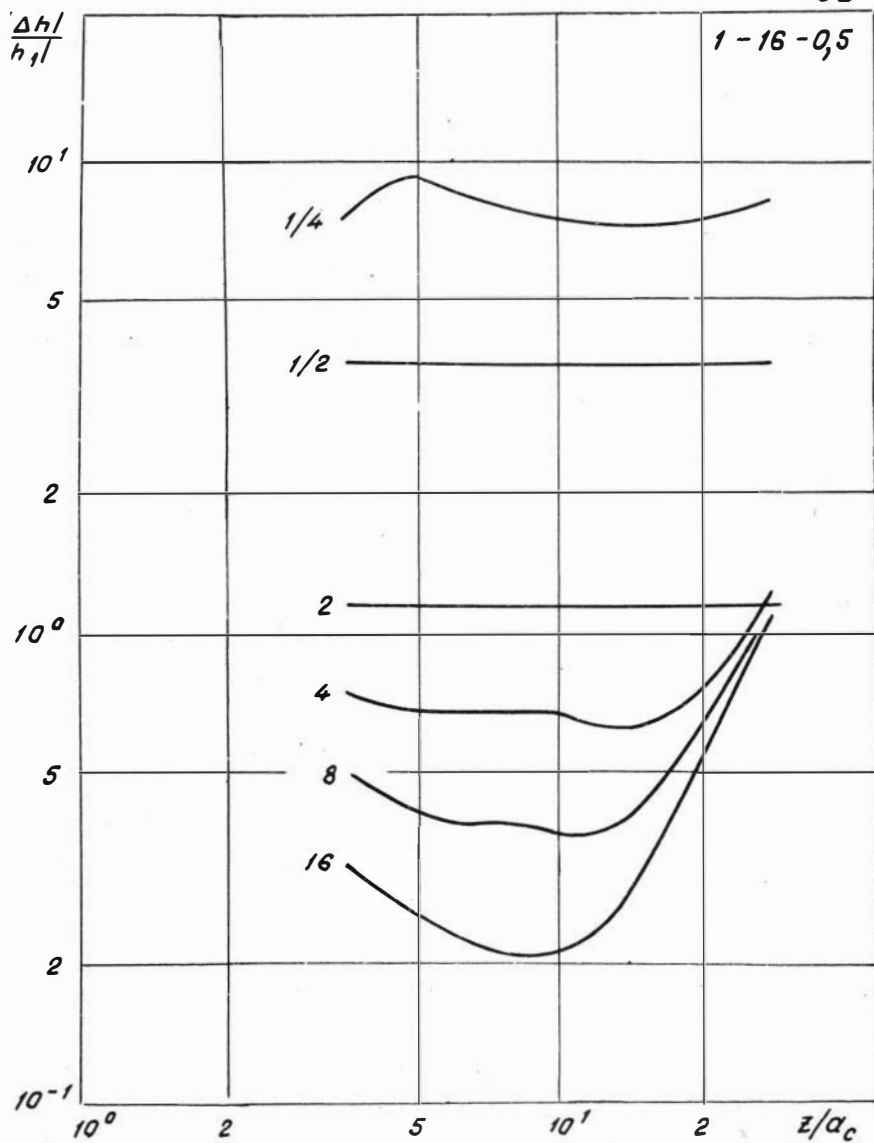


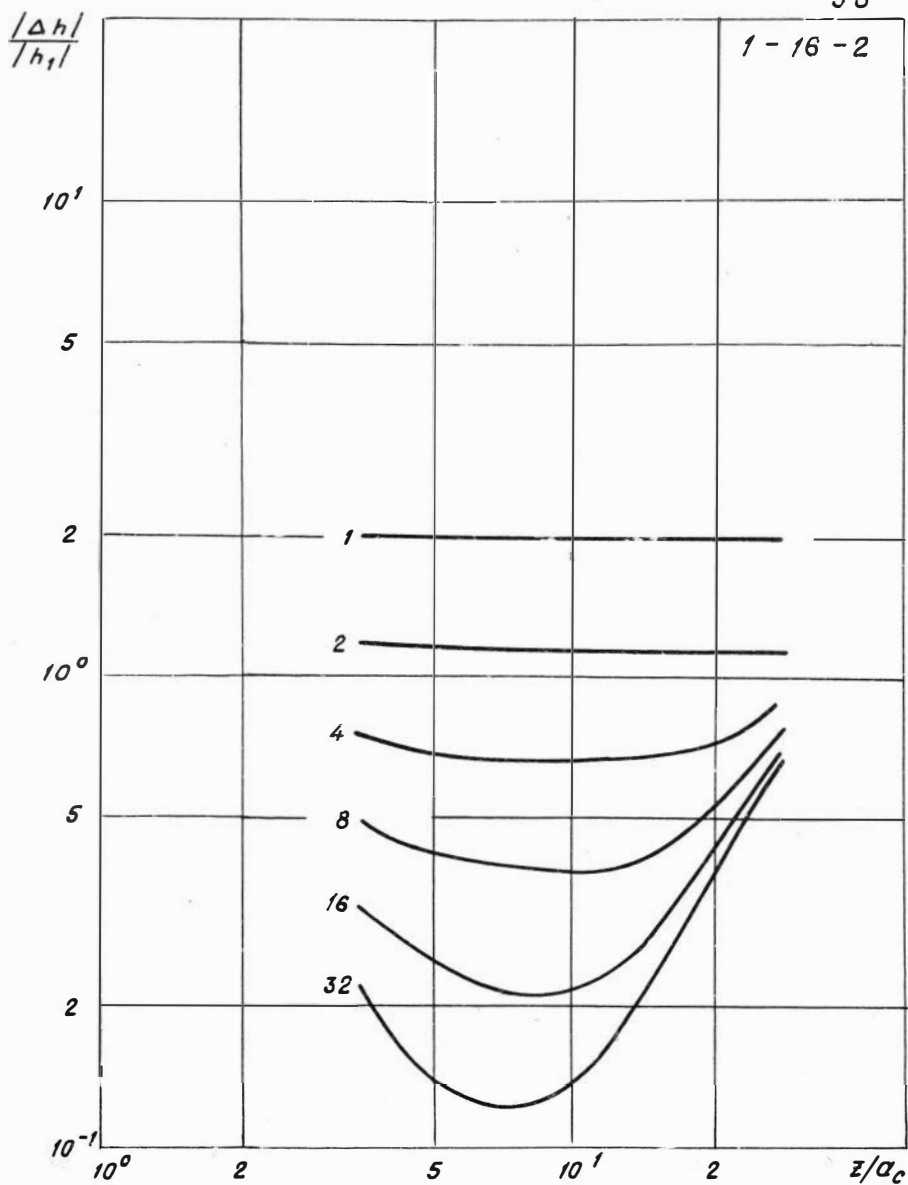
1-8-2



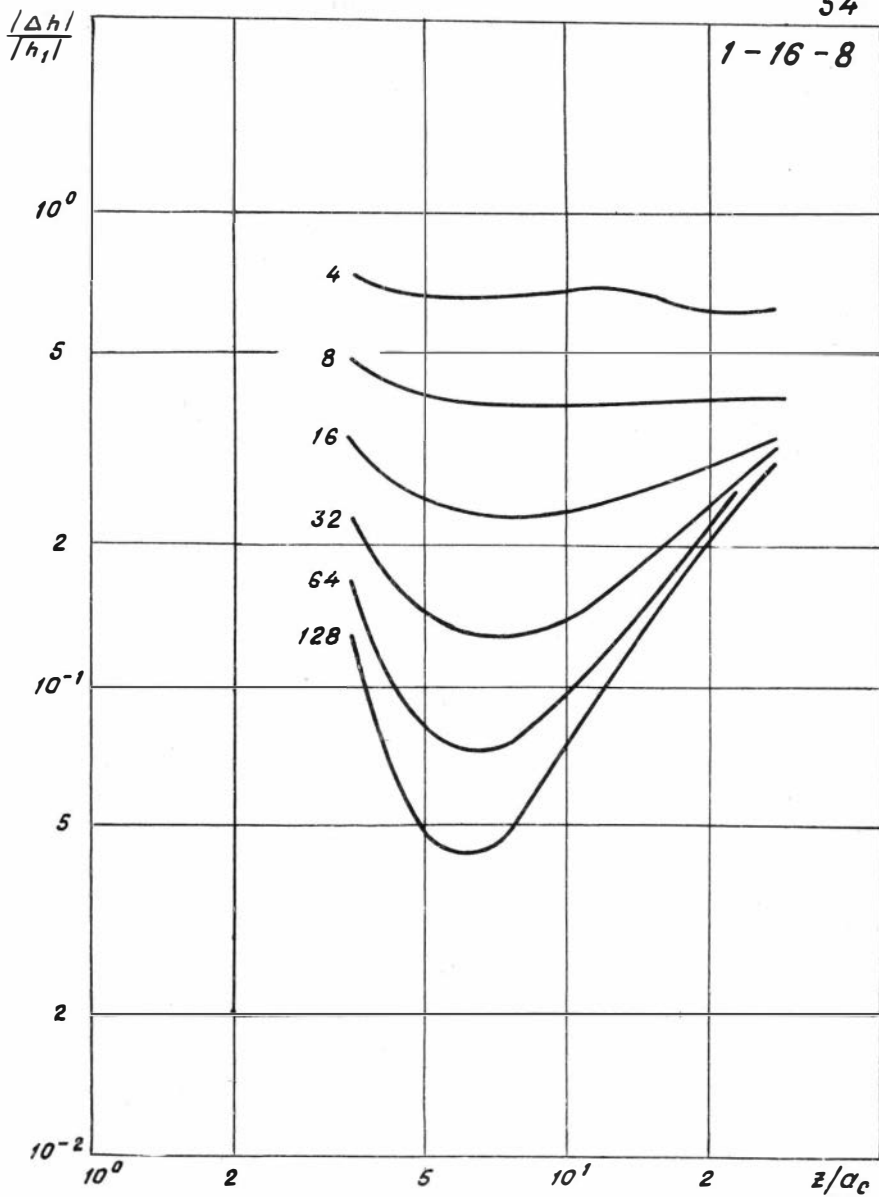








1-16-8



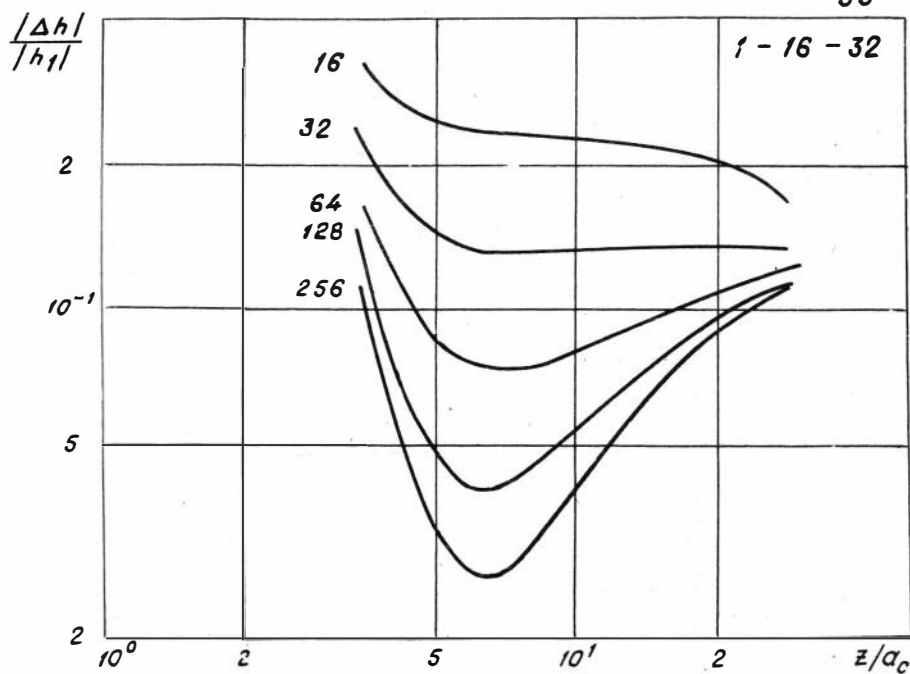
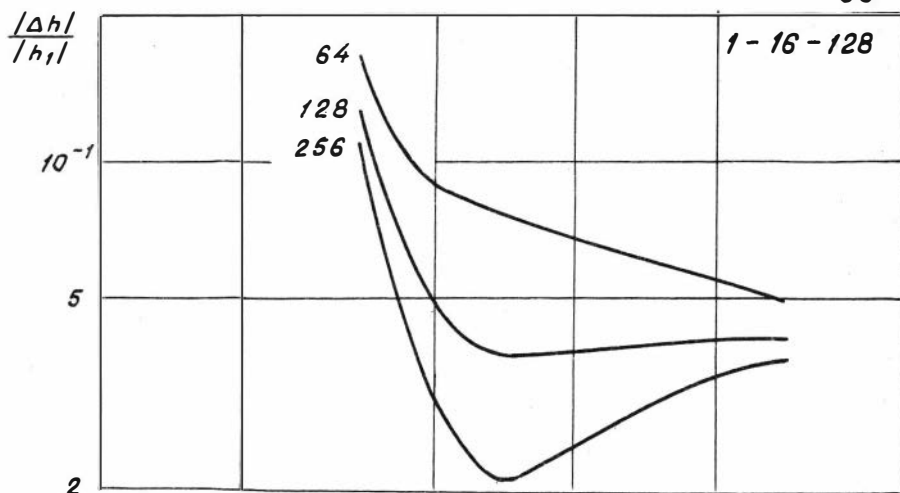


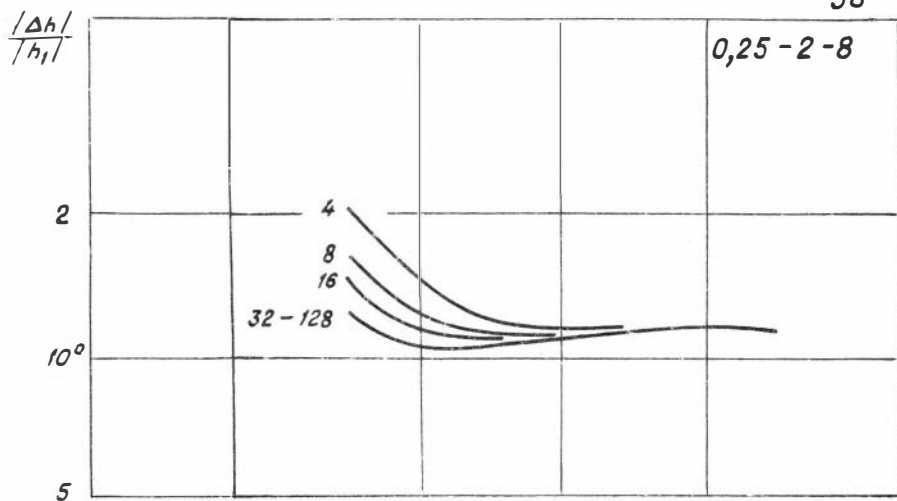
Таблица $\Delta h/h_1$

N	ρ_Δ/ρ_c	z/a_c			N	ρ_Δ/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
37	1/4	5,448	3,616	3,629	38	I	1,338	1,142	1,138
	1/2	3,754	3,647	3,640		2	1,142	1,138	1,140
	2	2,590	3,842	3,650		4	1,049	1,138	1,140
	4	2,440	3,897	3,652		8	1,004	1,139	1,141
	8	2,373	3,927	3,652		16	0,983	1,139	1,141
	16	2,342	3,943	3,653		32	0,973	1,139	1,142
39	4	0,452	0,398	0,398	40	16	0,156	0,134	0,135
	8	0,408	0,396	0,398		32	0,145	0,133	0,135
	16	0,387	0,396	0,398		64	0,140	0,133	0,135
	32	0,377	0,396	0,398		128	0,138	0,133	0,135
	64	0,372	0,395	0,398					
41	64	0,054	0,040	0,042	42	1/4	9,230	4,742	3,638
	128	0,051	0,040	0,042		1/2	3,754	3,647	3,640
	256	0,050	0,040	0,042		2	1,116	2,614	3,854
						4	0,764	2,480	3,918
						8	0,614	2,423	3,953
						16	0,551	2,397	3,972
43	I	2,065	1,338	1,142	44	4	0,630	0,440	0,399
	2	1,142	1,138	1,140		8	0,408	0,396	0,398
	4	0,721	1,047	1,141		16	0,302	0,376	0,398
	8	0,528	1,007	1,142		32	0,252	0,366	0,398
	16	0,441	0,988	1,142		64	0,228	0,361	0,397
	32	0,402	0,980	1,143		128	0,216	0,358	0,397
45	16	0,201	0,144	0,136	46	64	0,065	0,042	0,042
	32	0,145	0,133	0,135		128	0,051	0,040	0,042
	64	0,118	0,128	0,135		256	0,044	0,038	0,042
	128	0,104	0,125	0,135					

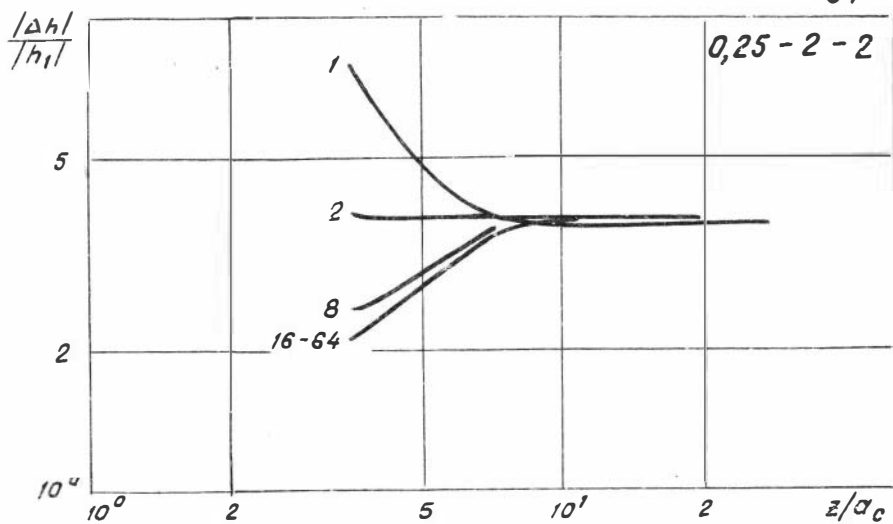
Таблица $\Delta h/h_1$

N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
47	I/4	9,323	7,359	4,813	48	I	1,985	2,065	1,338
	I/2	3,754	3,647	3,640		2	1,142	1,138	1,140
	2	1,145	1,105	2,621		4	0,676	0,708	1,050
	4	0,669	0,745	2,491		8	0,394	0,513	1,011
	8	0,381	0,594	2,436		16	0,232	0,426	0,993
	16	0,224	0,534	2,412		32	0,150	0,388	0,985
49	4	0,684	0,622	0,441	50	16	0,246	0,190	0,146
	8	0,403	0,396	0,398		32	0,145	0,133	0,135
	16	0,241	0,289	0,378		64	0,092	0,106	0,130
	32	0,150	0,239	0,368		128	0,066	0,092	0,127
	64	0,104	0,215	0,363		256	0,052	0,086	0,126
	128	0,083	0,204	0,360					
51	64	0,081	0,054	0,044	52	I/4	9,323	7,391	7,309
	128	0,051	0,040	0,042		I/2	3,754	3,647	3,640
	256	0,036	0,033	0,040		2	1,142	1,141	1,105
53	I	1,985	1,985	2,065		4	0,680	0,660	0,745
	2	1,142	1,138	1,140		8	0,409	0,368	0,595
	4	0,680	0,666	0,710		16	0,245	0,210	0,535
	8	0,409	0,381	0,514	54	4	0,680	0,674	0,623
	16	0,245	0,219	0,428		8	0,408	0,400	0,398
	32	0,142	0,137	0,390		16	0,245	0,229	0,291
55	16	0,245	0,234	0,192		32	0,144	0,137	0,241
	32	0,145	0,133	0,135		64	0,083	0,092	0,217
	64	0,085	0,080	0,108		128	0,050	0,071	0,205
	128	0,051	0,054	0,094	56	64	0,086	0,069	0,056
	256	0,033	0,041	0,088		128	0,051	0,040	0,042
56	64	0,085	0,080	0,108		256	0,032	0,025	0,035
	128	0,051	0,054	0,094					
	256	0,033	0,041	0,088					

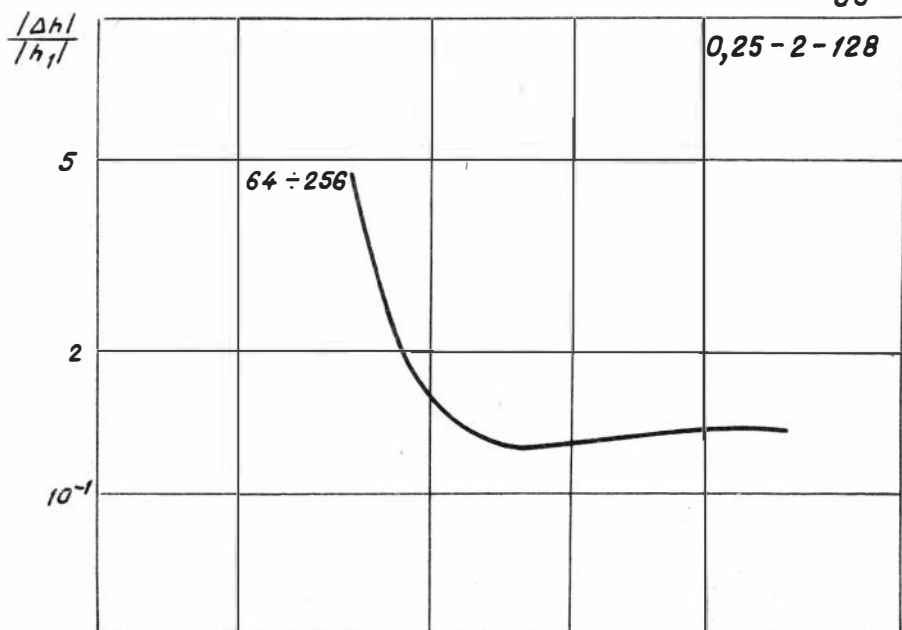
58



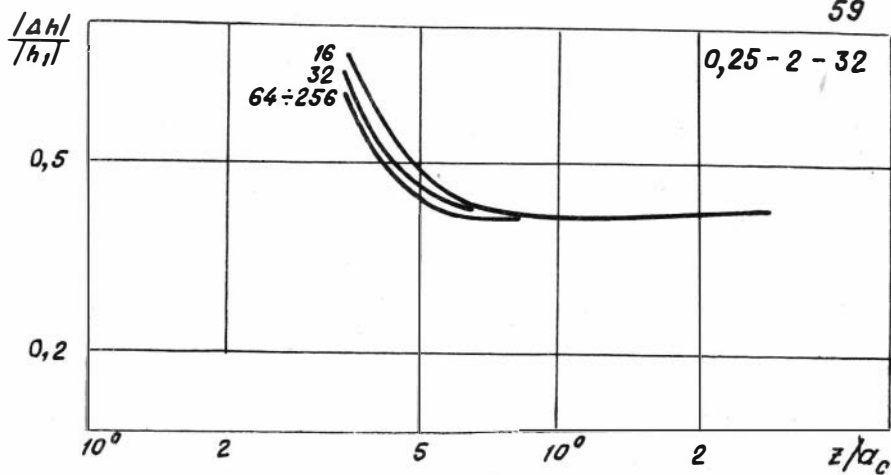
57

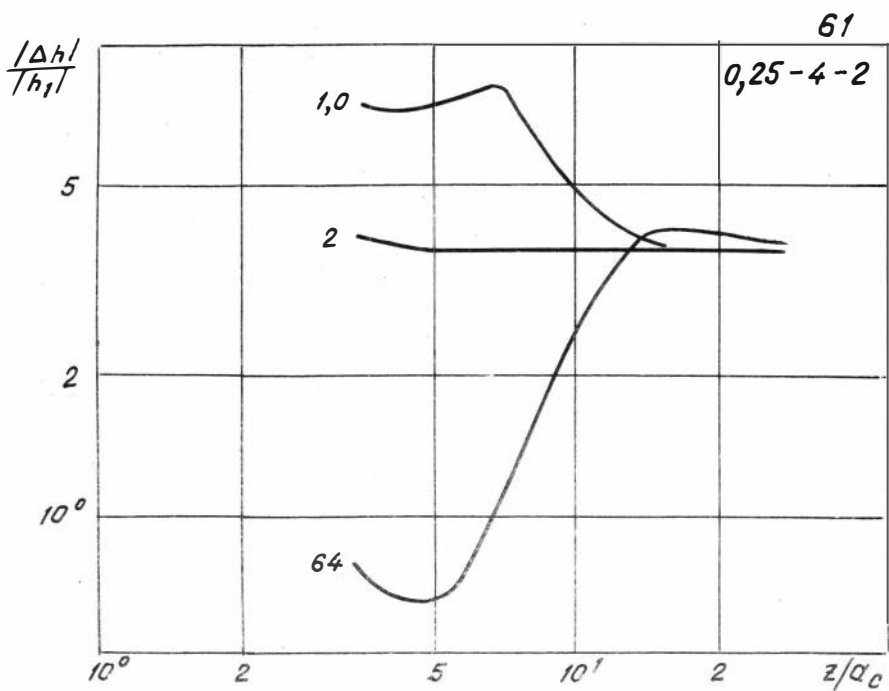
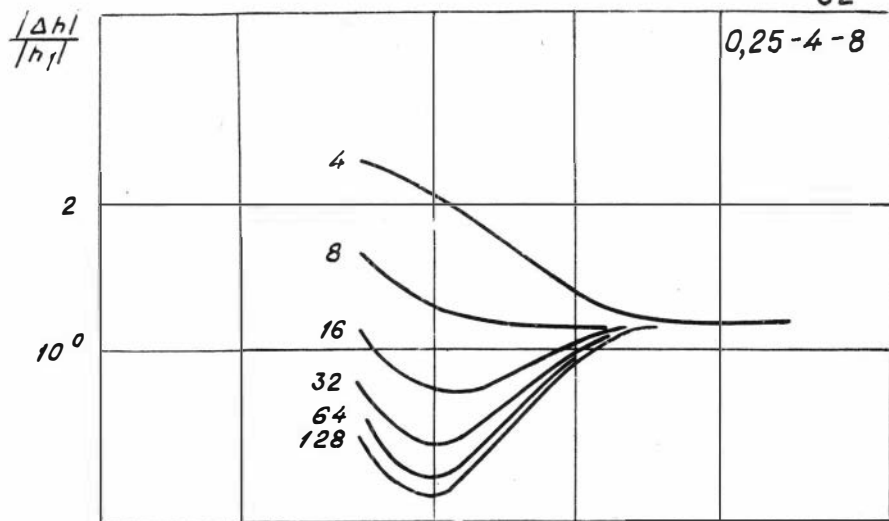


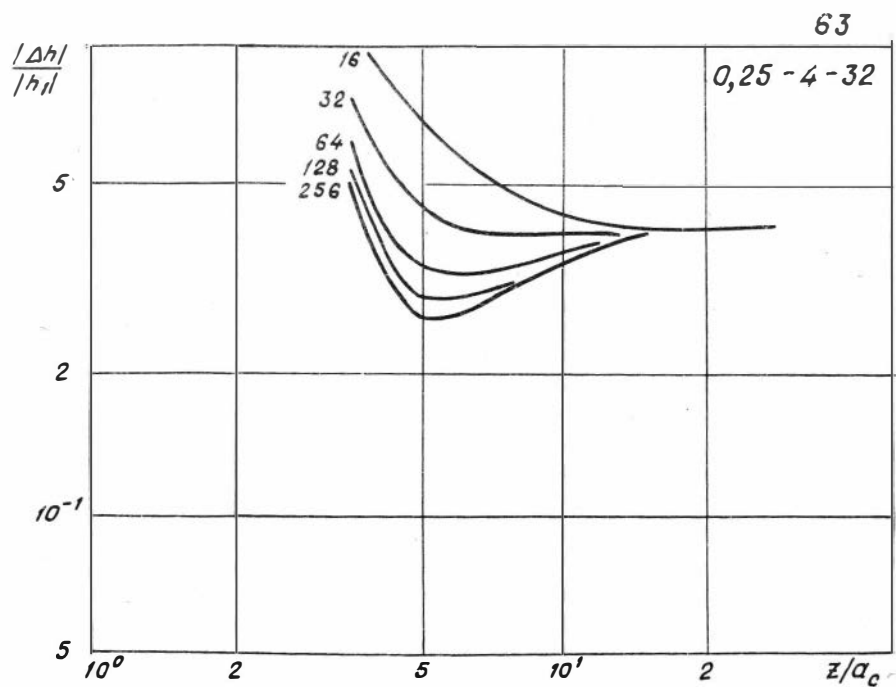
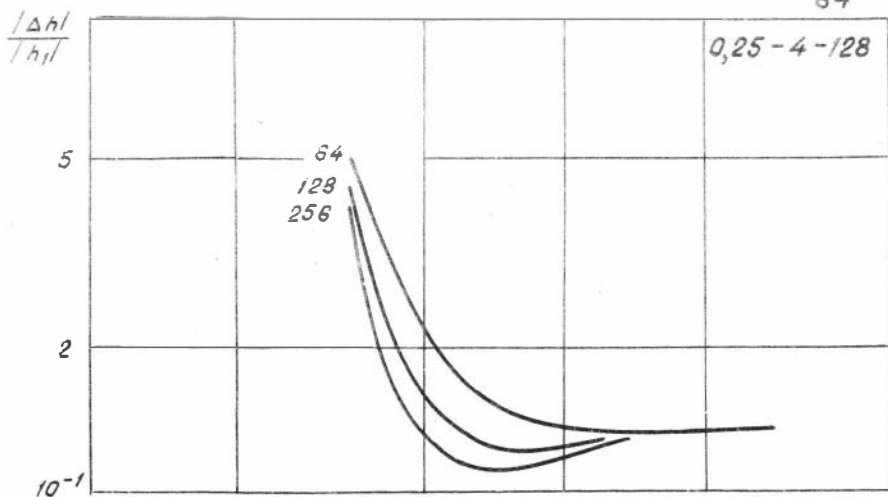
60

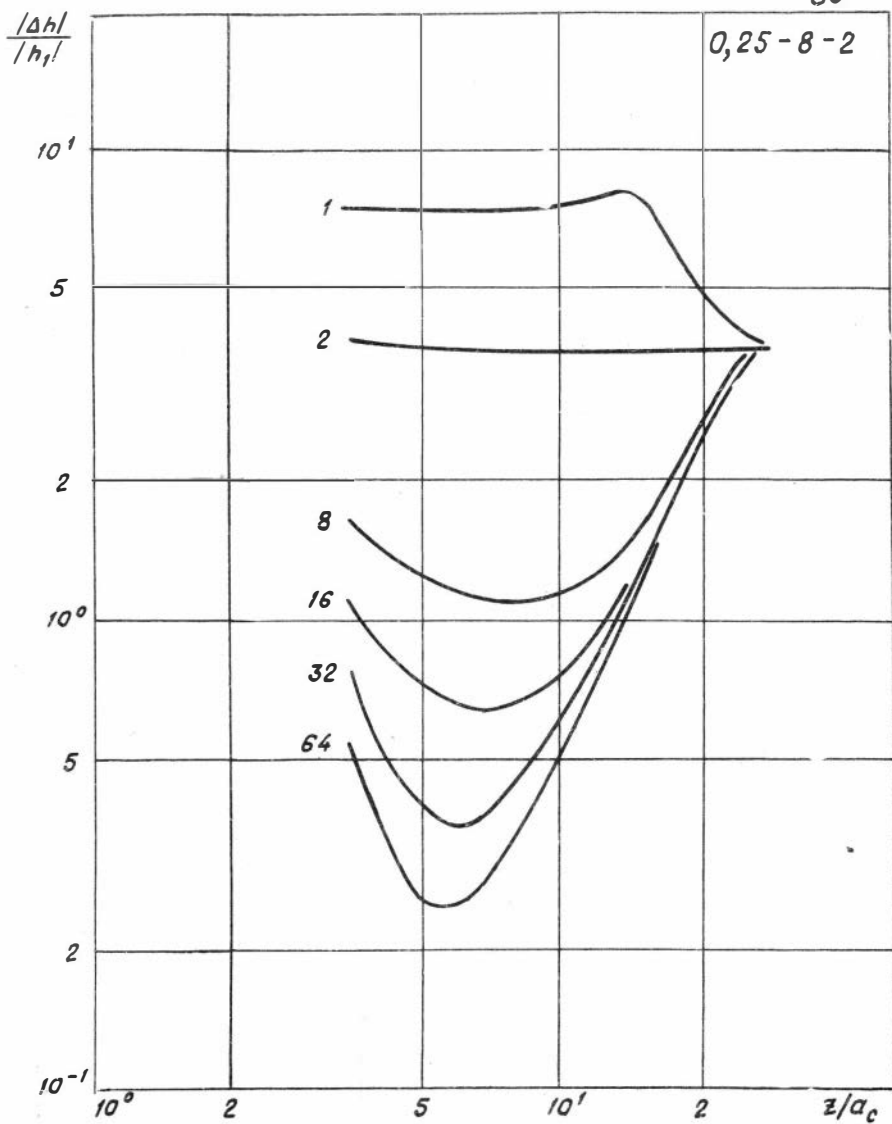


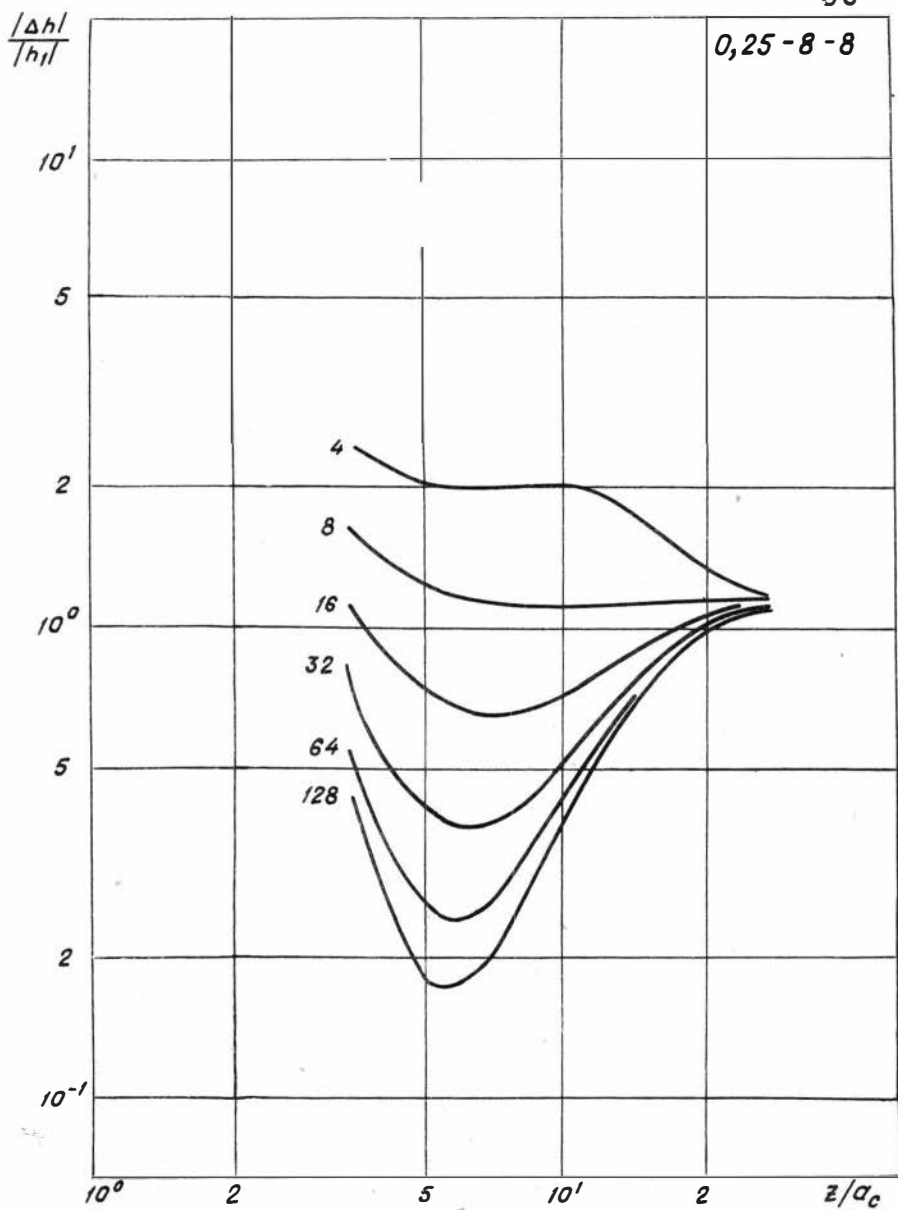
59



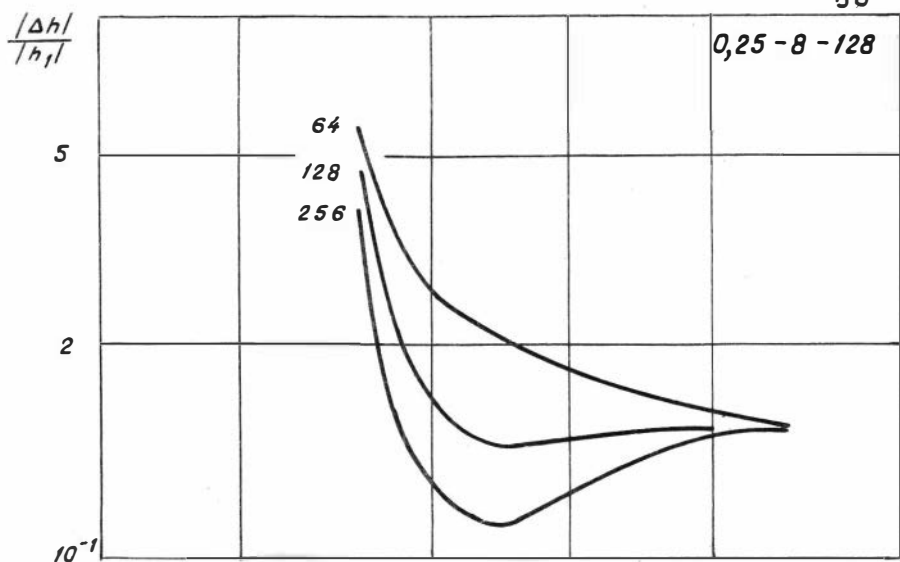




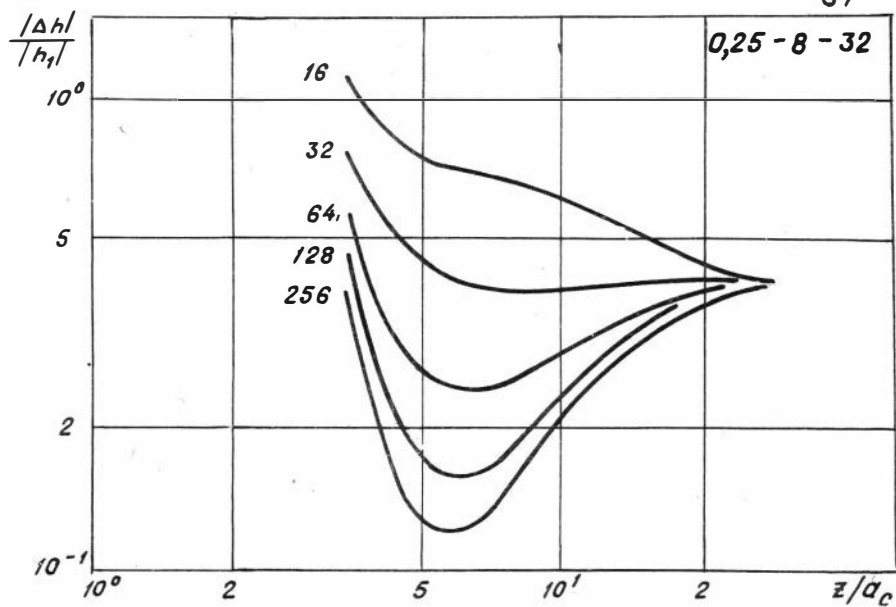


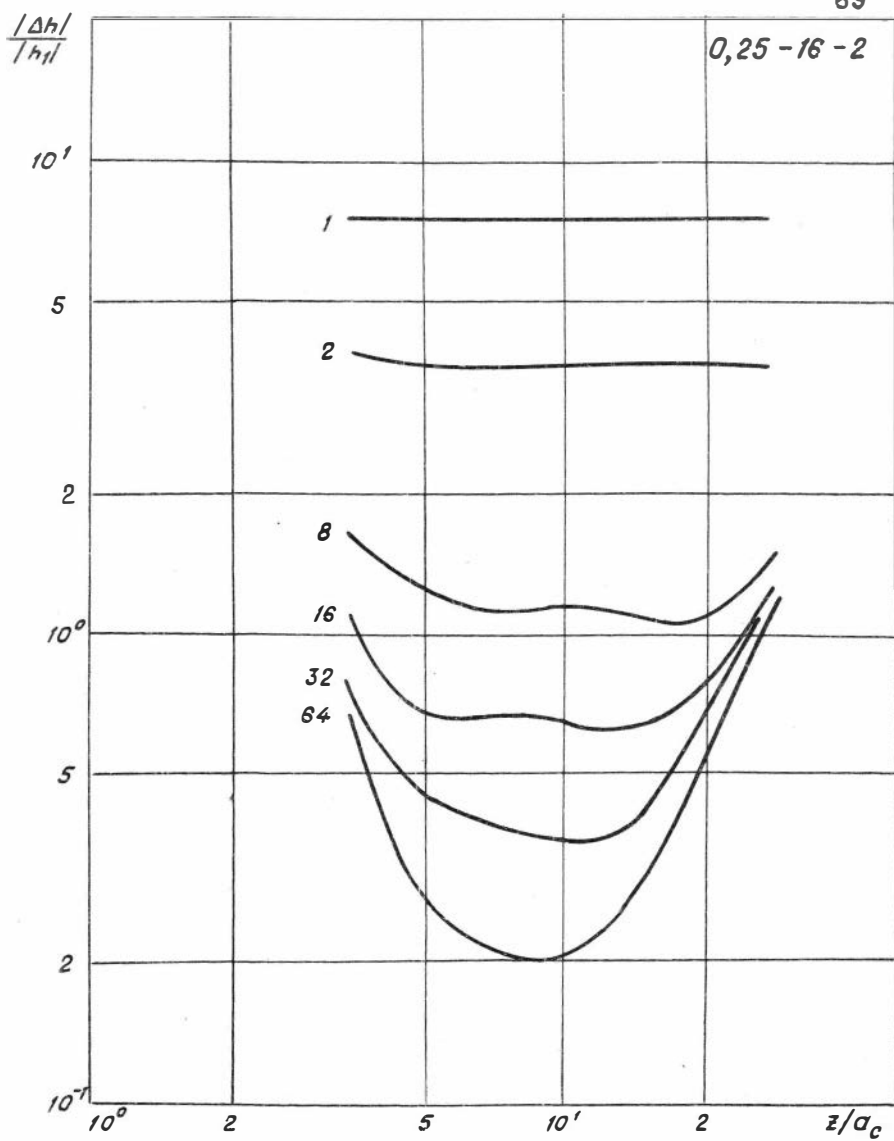


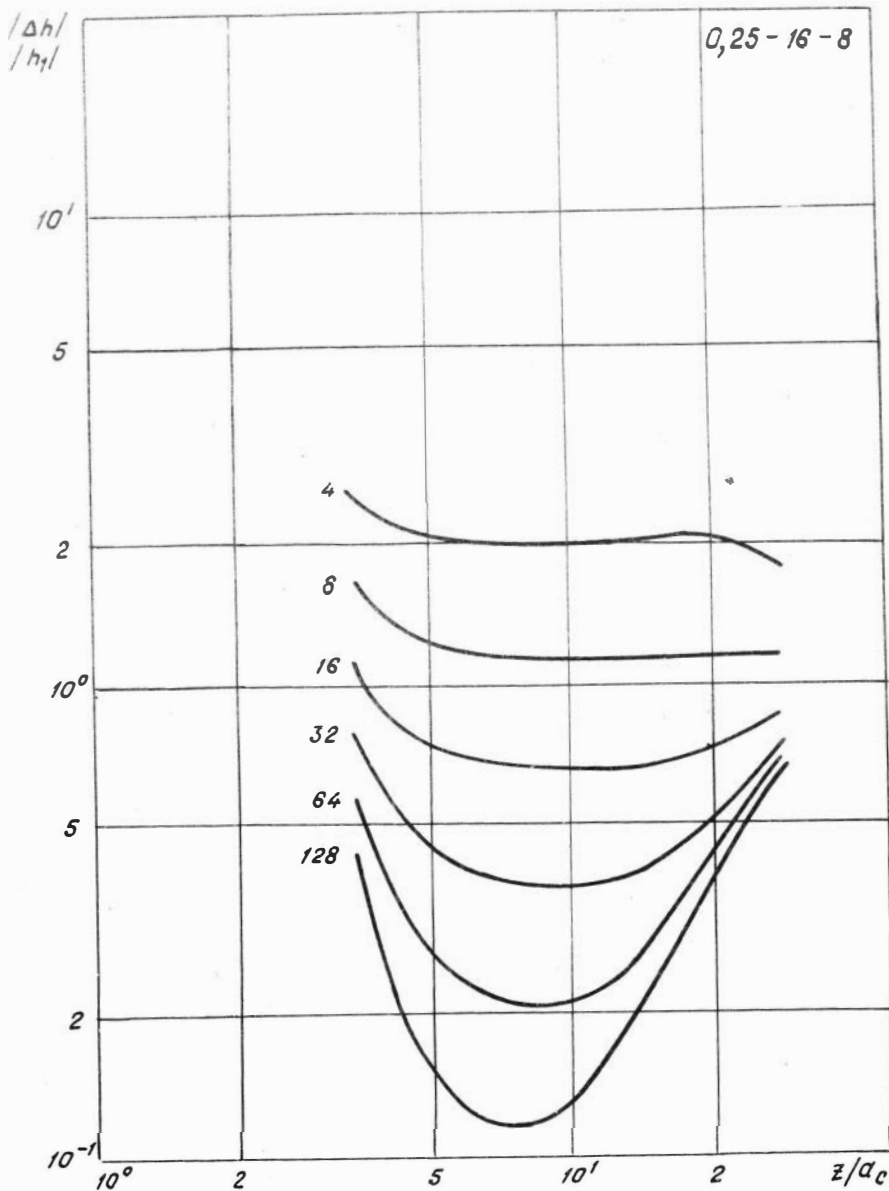
58

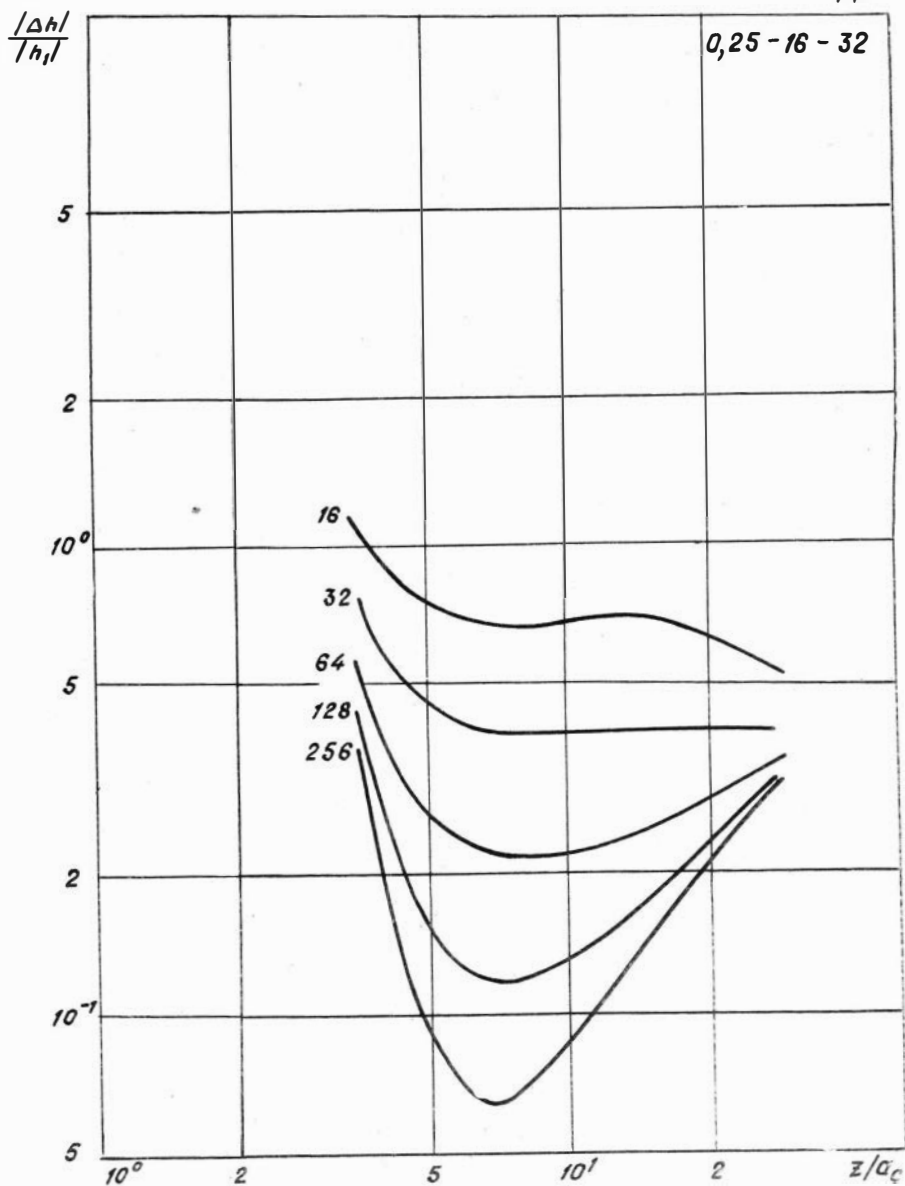


67









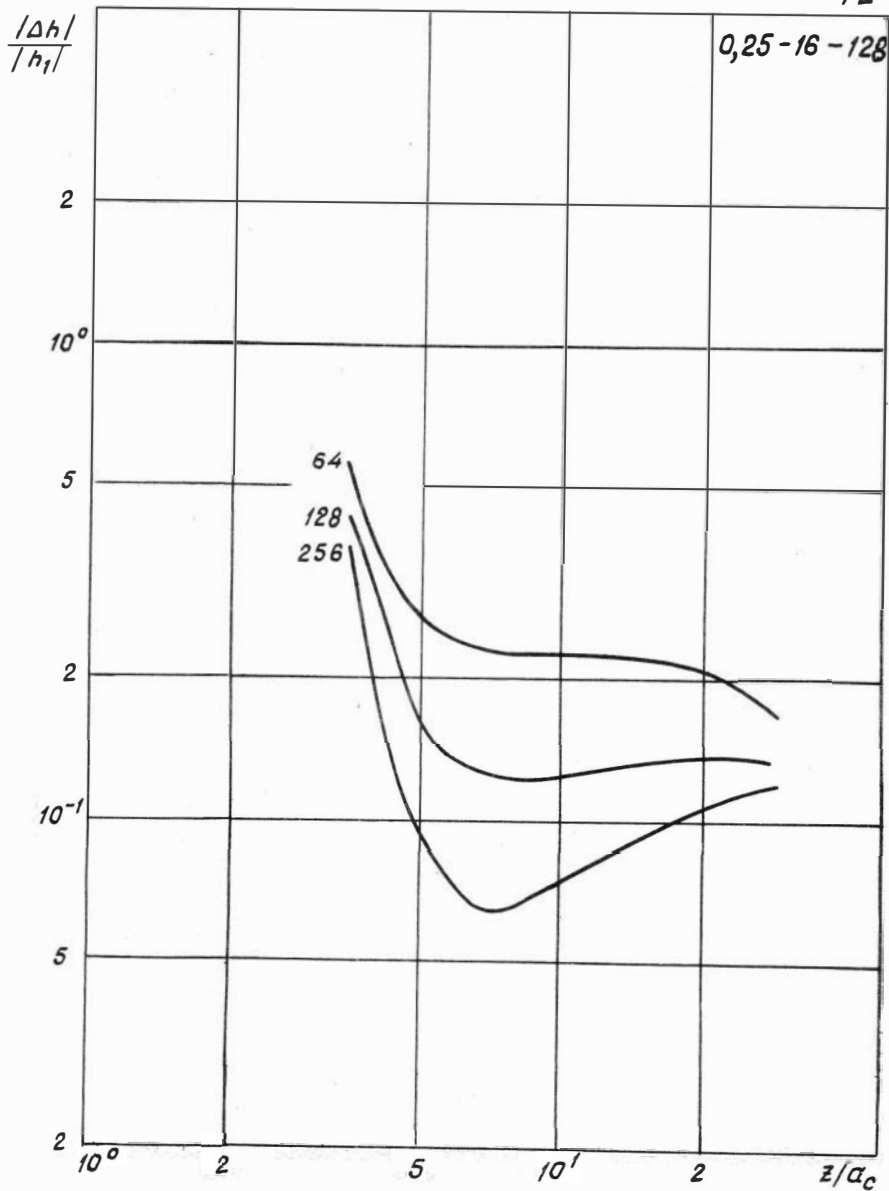


Таблица $\Delta h/h_1$

N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
57	I	4,826	3,64I	3,629	58	4	I,427	I,I38	I,I37
	2	3,64I	3,629	3,640		8	I,226	I,I3I	I,I39
	8	2,752	3,769	3,649		16	I,I27	I,I29	I,I40
	I6	2,622	3,8II	3,65I		32	I,079	I,I28	I,I40
	32	2,562	3,836	3,652		64	I,056	I,I28	I,I40
	64	2,532	3,847	3,652		I28	I,045	I,I28	I,I40
59	I6	0,488	0,39I	0,397	60	64	0,I66	0,I27	0,I34
	32	0,444	0,390	0,397		I28	0,I56	0,I26	0,I34
	64	0,422	0,389	0,397		256	0,I52	0,I26	0,I34
	I28	0,4II	0,388	0,397					
	256	0,406	0,388	0,397					
6I	I	7,3II	4,826	3,64I	62	4	2,I04	I,338	I,I42
	2	3,64I	3,629	3,640		8	I,226	I,I3I	I,I39
	64	0,674	2,36I	3,965		I6	0,805	I,036	I,I39
				32		0,608	0,993	I,I40	
				64		0,5I8	0,973	I,I4I	
				I28	0,477	0,964	I,I42		
63	I6	0,667	0,434	0,398	64	64	0,2II	0,I37	0,I34
	32	0,444	0,390	0,397		I28	0,I56	0,I26	0,I34
	64	0,337	0,368	0,397		256	0,I3I	0,I2I	0,I34
	I28	0,287	0,358	0,396					
	256	0,263	0,353	0,396					
65	I	7,338	7,3II	4,826	66	4	2,068	2,048	I,338
	2	3,64I	3,629	3,640		8	I,226	I,I3I	I,I39
	8	I,227	I,I04	2,6I7		I6	0,732	0,703	I,049
	I6	0,724	0,744	2,486		32	0,430	0,508	I,009
	32	0,4I9	0,593	2,432		64	0,262	0,422	0,99I
	64	0,258	0,533	2,408		I28	0,I82	0,384	0,983

Таблица $\Delta h/h_1$

N	ρ_d/ρ_c	z/a_c			N	ρ_d/ρ_c	z/a_c		
		5	10	20			5	10	20
67	16	0,742	0,613	0,440	68	64	0,263	0,182	0,145
	32	0,444	0,390	0,397		128	0,156	0,126	0,134
	64	0,265	0,283	0,377		256	0,105	0,100	0,129
	128	0,172	0,233	0,367					
	256	0,130	0,209	0,362					
69	1	7,338	7,338	7,311	70	4	2,068	1,975	2,063
	2	3,641	3,629	3,640		8	1,226	1,131	1,139
	8	1,226	1,133	1,105		16	0,737	0,659	0,709
	16	0,737	0,652	0,744		32	0,444	0,374	0,513
	32	0,444	0,362	0,594		64	0,264	0,213	0,427
	64	0,264	0,205	0,535		128	0,153	0,132	0,389
71	16	0,737	0,667	0,622	72	64	0,265	0,227	0,190
	32	0,444	0,389	0,397		128	0,156	0,126	0,134
	64	0,265	0,222	0,290		256	0,094	0,073	0,107
	128	0,154	0,131	0,240					
	256	0,093	0,086	0,216					

3.3. ЧЕТЫРЕХСЛОЙНАЯ ПИЛИНДРИЧЕСКИ-СЛОИСТАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Моделирование четырехслойных сред было направлено на исследование возможностей изопараметрических зондов обнаруживать кольцевую ("окаймляющую") зону пониженного удельного сопротивления между зоной проникновения и незатронутой проникновением частью пласта. С этой целью в модель трехслойной среды на границе между пластом и зоной проникновения вводился еще один цилиндрический слой. Толщина этого слоя по радиусу устанавливалась в определенном соотношении с радиусом зоны проникновения: $a_{03} = 0,2a_{zn}$, здесь a_{03} - разность между расстоянием от оси скважины до границы пласта и внешним радиусом зоны проникновения. Таким образом, модель состоит из четырех цилиндрических слоев. Первый слой соответствует скважине, второй - начиная от стенки скважины, зоне проникновения, третий слой - окаймляющей зоне и, наконец, четвертый слой неограниченного радиуса - пласт. Влияние окаймляющей зоны на кажущееся удельное сопротивление исследовалось на двух моделях. В первой модели низкоомный слой размещался за зоной проникновения, радиус которой равнялся четырем радиусам скважины, а во второй модели - восьми радиусам скважины. При этом удельное сопротивление зоны проникновения как в первой, так и во второй моделях имело два различных значения. Одно из них равнялось удельному сопротивлению пласта, так называемое нейтральное проникновение, второе - более высокое, чем у пласта (повышающее проникновение). Удельное сопротивление окаймляющей зоны изменялось от величины, равной удельному сопротивлению пласта, что соответствует двухслойной (при нейтральном проникновении) модели до значений меньших ρ_n . Эти значения соответственно составляли 25, 50 и 75% от ρ_n .

На рис. I, а приведены теоретические кривые зондирования четырехслойных моделей.

Изопараметры зондов:

$$Z_i^2 f_i = 3,5 \cdot 10^6 / \text{м}^2 \cdot \text{Гц}, \quad \Delta Z_i / Z_i = 0,3.$$

Параметры модели следующие.

Скважина: $\rho_c = 0,76 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $a_c = 0,1 \text{ м}$.

Зона проникновения: $\rho_{zn} = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $a_{zn} = 4 a_c$.

Окаймляющая зона: $\rho'_{03} = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (кривая № 2);
 $\rho''_{03} = 1,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (кривая № 3);
 $a_{03} = 0,2 a_{3n}$
 Пласт: $\rho_n = 6,14 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

По оси ординат отложены значения ρ_k (Ом·м), а по оси абсцисс - длины изопараметрических зондов - z_i (м). Здесь же, на поле графиков, нанесена кривая № 1, которая соответствует трехслойной модели среды, когда окаймляющая зона отсутствует.

Сопоставление кривых 2 и 3 с кривой 1 иллюстрирует динамику изменений измеряемой характеристики за счет изменения зоны; чем меньше ее удельное сопротивление, тем глубже экстремум на кривой зондирования.

На рис. 1,б приведены результаты расчета четырехслойных моделей, в которых изменяется местоположение окаймляющей зоны относительно оси зондов. Параметры модели следующие.

Скважина: $\rho_c = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $a_c = 0,1 \text{ м}$.

Зона проникновения: $\rho_{3n} = 16 \text{ Ом}\cdot\text{м}$,

$a_{3n} = 3a_c$; $4,5a_c$; $6a_c$ (соответственно,

кривые № 2, 3 и 4).

Окаймляющая зона: $\rho_{03} = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $a_{03} = 0,3 a_{3n}$.

Пласт: $\rho_n = 6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

На поле рисунка 1,б приведена кривая 1, соответствующая среде без окаймляющей зоны ($a_{3n} = 4a_c$). Смещение экстремума на кривых вправо по оси длин зондов соответствует более глубокому радиальному местоположению окаймляющей зоны.

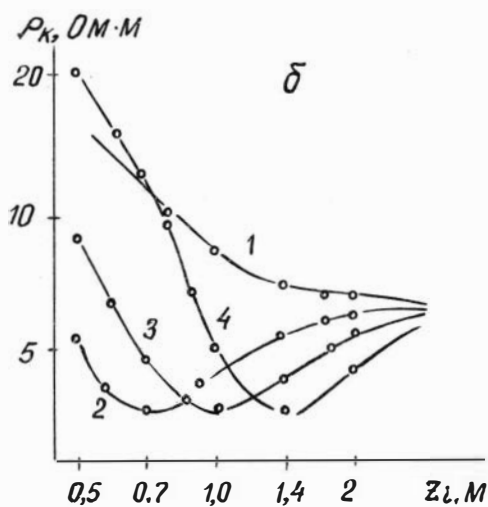
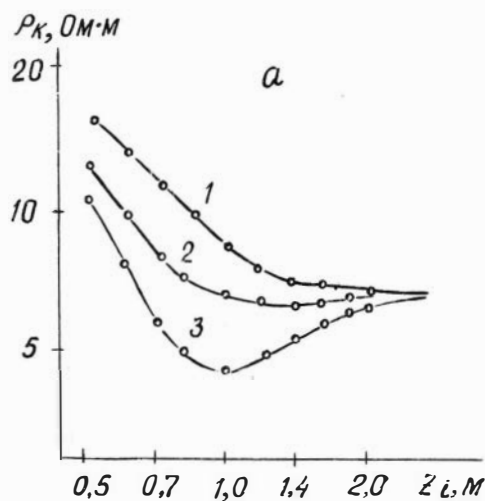


Рис. 1, а, б

3.4 ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ

Для изучения радиальной избирательной способности зондов ВИКИЗ было выполнено математическое моделирование цилиндрически-слоистой среды следующей модификации. Зонды размещались в однородной среде с удельным сопротивлением 1, 10 и 100 Ом·м. Коаксиально зондам вводился очень тонкий цилиндрический слой (0,01 м), удельное сопротивление которого отличалось незначительно от удельного сопротивления вмещающей его среды – превышение составляло не более чем 10%. Такой слой, практически слабо влияя на общее распределение плотности индуцируемых токов в среде, служит индикатором чувствительности зонда к местоположению слоя в радиальном направлении, а соответствующие кривые, о которых будет сказано ниже, являются мерой избирательности и радиальной глубинности исследования зондов. Такие характеристики могут быть весьма выразительными при сопоставлении зондов различного типа (индукционного каротажа, волнового каротажа проводимости и т.п.).

Результаты моделирования избирательной способности изопараметрических зондов ВИКИЗ ($Z_i^2 f_i = 3,5 \cdot 10^6$, $\Delta Z_i / Z_i = 0,3$) приведены на рисунках 1, а, б, в. По оси ординат отложены значения разности фаз, а по оси абсцисс – расстояние от оси зонда до стенки тонкого цилиндра в метрах (радиус исследования). Шифром кривых являются значения длин зондов (Z_i). Чем меньше удельное сопротивление среды (рис. 1, а), тем ближе к оси зонда располагаются экстремумы кривых, т.е. глубинность исследования сокращается. В таблице приведена оценка радиуса исследования зондов по экстремальным точкам на кривых.

$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м} \backslash Z_i, \text{м}$	0,5	0,7	1,0	1,4	2,0
1	0,18	0,26	0,36	0,52	0,72
10	0,26	0,36	0,52	0,72	1,04
100	0,32	0,44	0,64	0,88	1,28

Полученные математическим моделированием кривые по общим признакам аналогичны дифференциальному геометрическому факто-

ру для зондов низкочастотного (доллевого) индукционного каротажа. Как известно, дифференциальные характеристики являются удобными для сопоставления зондов различного типа.

В соответствии с рис. 1, а, б, в экстремумы кривых, принадлежащих одному и тому же зонду, смещаются по радиусу исследования. Характерно, что это смещение в долях длины зонда составляет 0,35, 0,52 и 0,64 в средах, удельное сопротивление которых равно, соответственно, 1; 10 и 100 Ом·м. Таким образом, глубинность исследования зондов ВИКИЗ зависит от величины удельного сопротивления однородной среды. Чем меньше УЭС среды, тем сильнее проявляется скин-эффект и тем ближе к зонду и уже становится полоса избирательности изопараметрических зондов. Вместе с тем, уже при $\rho > 10$ Ом·м радиальная глубинность зондов длиной 1,4 и 2 Ом·м не уступает глубинности зондов ИК, составляя 0,9 - 1,3 м, если оценку выполнять по экстремуму дифференциальной характеристики зондов. Оценки глубинности исследования изопараметрических зондов согласуются с данными расчетов в многослойных цилиндрически-слоистых средах.

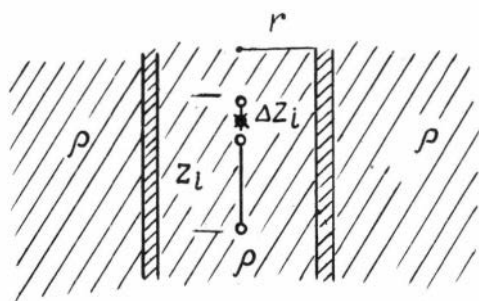
$\Delta\varphi^0$

61,5

61,4

61,3

61,2



$$\rho_{c1} \approx 1,1 \rho$$

$$\rho = 10 \text{ M.M}$$

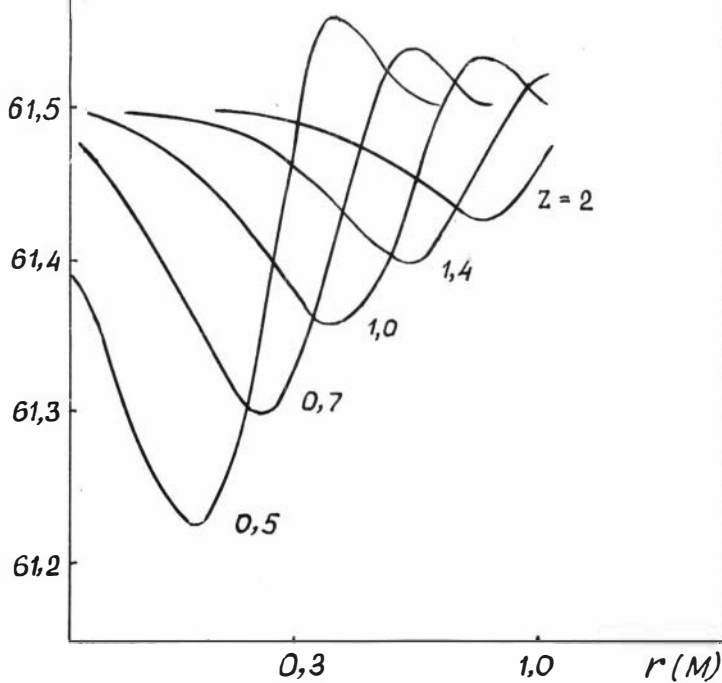


Рис. 1, а

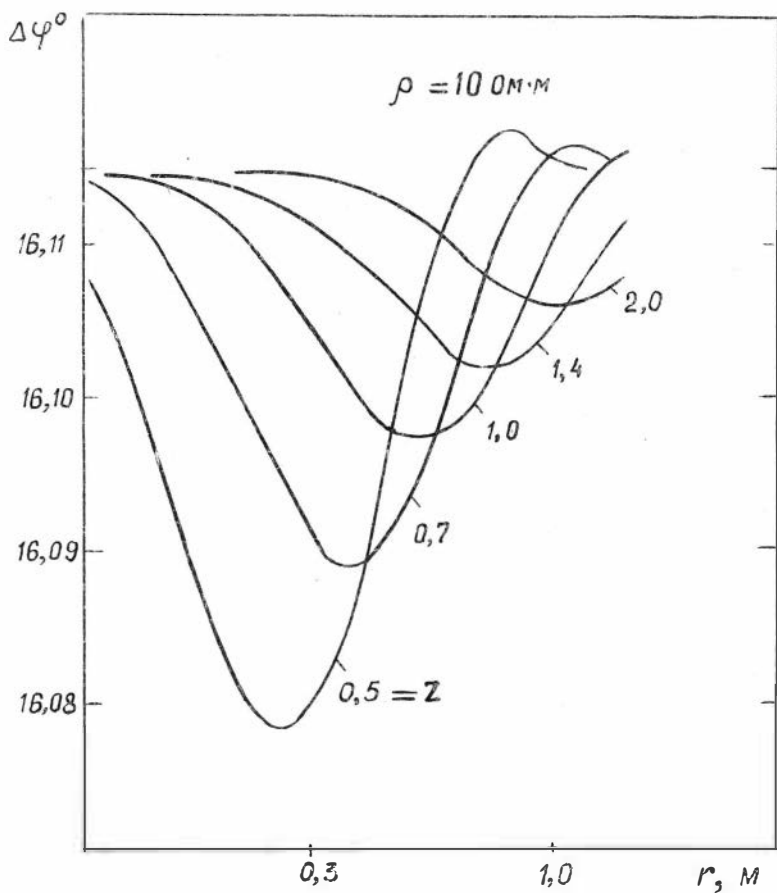


Рис. 1, б

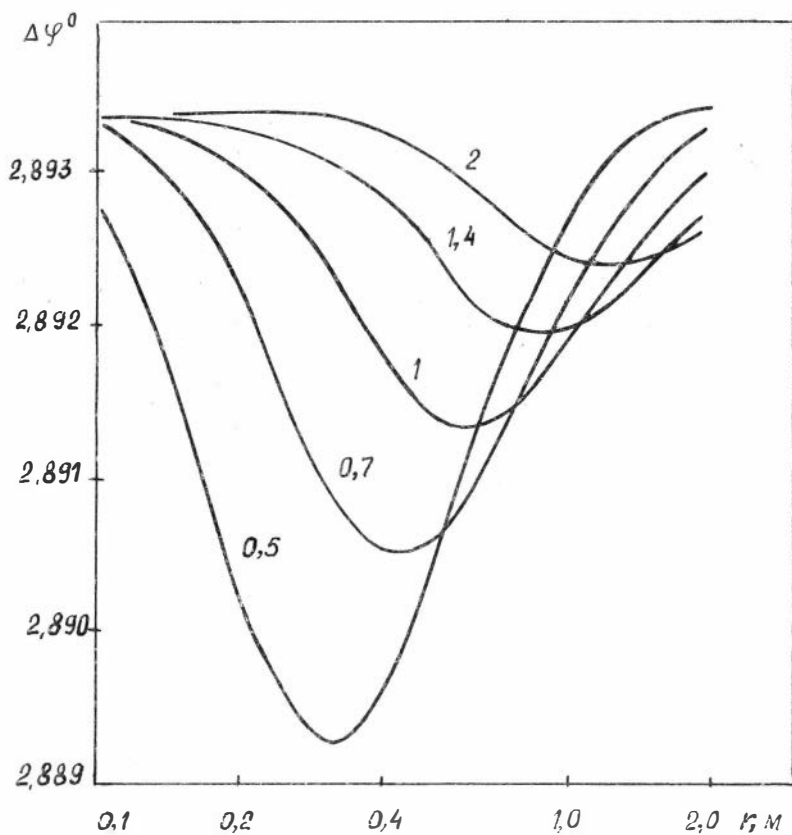


Рис. 1, б

4. ПАЛЕТКИ КАРОТАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.

Аппаратурой для каротажного электромагнитного зондирования типа ВИКИЗ предусмотрено измерение разности фаз ($\Delta\varphi^\circ$) с переводом измеряемой характеристики в удельное электрическое сопротивление (УЭС) с помощью соответствующей шкалы. Масштаб шкалы УЭС устанавливается по градуировочным сигналам перед проведением измерений в скважине или в процессе каротажа. Величина УЭС, измеряемая зондами аппаратуры ВИКИЗ, зависит главным образом от электропроводности горных пород, слагающих разрез скважины. Кроме того, результаты измерений зондами ВИКИЗ слабо зависят от параметров скважины — это подтверждается данными расчетов для двухслойной цилиндрически-слоистой среды, и в основном определяются электрическими неоднородностями зоны проникновения, глубиной проникновения фильтра промывочной жидкости и УЭС пласта.

Главной задачей ВИКИЗ при исследовании нефтяных скважин является определение УЭС пласта и зоны проникновения, определение размеров зоны проникновения и обнаружение "окаймляющей" зоны пониженного сопротивления за зоной проникновения в диапазоне УЭС от долей до 200 Ом·м. На результаты измерений указанных параметров пласта оказывает влияние удельное сопротивление вмещающих пород, если пласт не более чем в два раза превышает длину зонда.

В рамках трехслойных цилиндрически-слоистых сред для пластов, мощность которых превышает 1–1,5 м, объем палеточного материала, достаточный при геофизической интерпретации данных ВИКИЗ, небольшой. Так, четыре палетки для пластов ограниченной мощности и четыре палетки для определения радиальных характеристик пластов с проникновением фильтра промывочной жидкости позволяют определить ρ_{3n} , α_{3n} и ρ_n , а при искажении экспериментальных кривых установить наличие окаймляющей зоны низкого удельного сопротивления.

Набор палеток для пластов ограниченной мощности представлен на рис. 1–4 для $H/2i = 2; 1,5; 1; 0,5$, соответственно. По оси ординат палеток отложены значения искомой (исправленной) величины УЭС, а по оси абсцисс — УЭС экстремальных значений

снятых с каротажных кривых против исследуемого пласта. Шифром кривых является УЭС вмещающих пород.

Принципиальная возможность определения удельных сопротивлений пласта и зоны проникновения по данным измерений зондами малой длины определяется главным образом удельным сопротивлением участка среды, несколько отстоящей от стенки скважины (за счет фокусировки, т.е. исключения параметров скважины и прилегающей к ней области). При этом радиальная локальность исследования (т.е. ограничение глубинности) усиливается высокой рабочей частотой возбуждаемого поля. С увеличением длин зондов и уменьшением частот глубинность исследования растет, и в формировании измеряемых удельных сопротивлений принимают участие все большие объемы среды, главным образом, удаленные от скважины. Удельное сопротивление, измеренное большим зондом ВИКИЗ, главным образом определяется электропроводностью среды, удаленной от стенки скважины на 1-1,5 метра (при $\rho \approx 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), при этом на результаты измерений не влияют параметры зоны проникновения (ρ_{zn} и Q_{zn}).

Палетки для определения удельных сопротивлений пласта и зоны проникновения, а также радиуса зоны проникновения приведены на рис. 5-8. Каждая палетка отличается значением ρ_{zn} . По оси ординат палеток отложены значения искомым УЭС, а по оси абсцисс - отношение длины изопараметрического зонда к радиусу зоны проникновения. Графиками на поле палеток представлены теоретические кривые зондирования трехслойной модели среды. Асимптотики графиков справа соответствуют УЭС пласта, слева - УЭС зоны проникновения. Подготовку и проведение геофизической интерпретации результатов измерений, полученных зондами ВИКИЗ, выполняют следующим путем. Против исследуемого пласта по экстремальным значениям каротажных кривых определяют УЭС и заносят в таблицу. В случае малой мощности пласта оценивают необходимость внесения поправки за влияние вмещающих пород. По исправленным значениям строится экспериментальная кривая зондирования пласта на логарифмическом бланке с координатными шкалами, равными палеточным (рис. 5-8). Численные значения ординаты бланка соответствуют удельным сопротивлениям, снятым с каротажных диаграмм, а ось абсцисс - соответствует длинам зондов ВИКИЗ.

Если экспериментальная кривая имеет асимптотические значения в области коротких или длинных зондов, то в зависимости от этой величины определяют выбор соответствующей палетки. Так, для асимптотики слева (короткие зонды или большие размеры зоны проникновения) выбирают палетку со значением удельного сопротивления в асимптотике теоретической кривой близким или совпадающим с асимптотикой на экспериментальной кривой зондирования. Затем экспериментальный график накладывают на палетку, совмещая с одной из палеточных кривых. Полное совпадение кривых определяет значение удельных сопротивлений зоны проникновения и пласта по левой и правой асимптотам теоретической кривой, соответственно. При этом радиус зоны проникновения определяется числом (в метрах) на оси абсцисс экспериментального графика в точке пересечения оси с вертикальной линией палетки, соответствующей величине $z_i / a_{3n} = 1$.

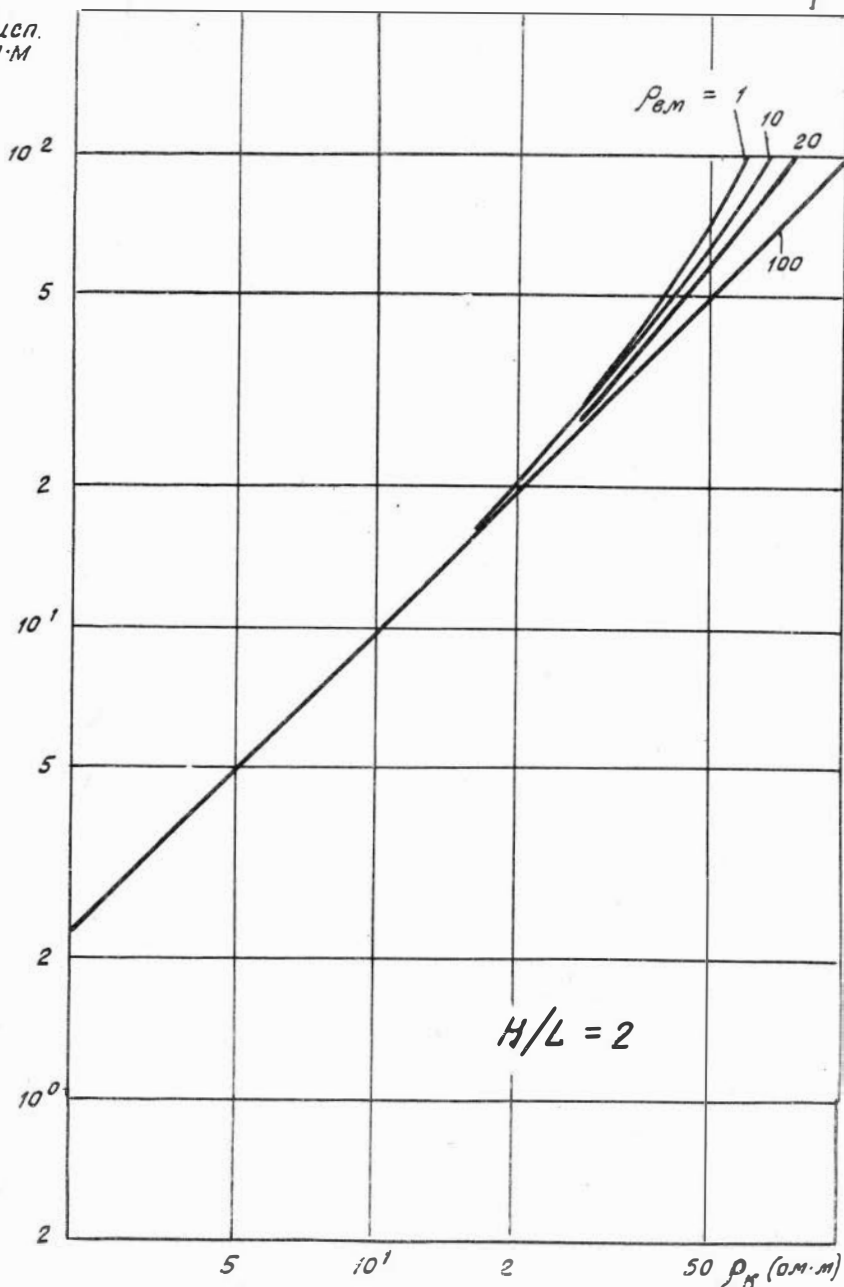
Экспериментальные кривые, отличающиеся конфигурацией от теоретических для трехслойной цилиндрически-слоистой среды, указывают на наличие неоднородности. Например, характерные искажения кривых зондирования могут быть признаками "окаймляющей" зоны. Количественная оценка электрических и геометрических параметров такой зоны должна проводиться по палеткам для четырехслойных моделей среды с методикой, близкой к боковому каротажному зондированию для трехслойных сред. Целесообразность разработки таких палеток должна быть определена практикой при апробации метода ВИКИЗ в широких масштабах.

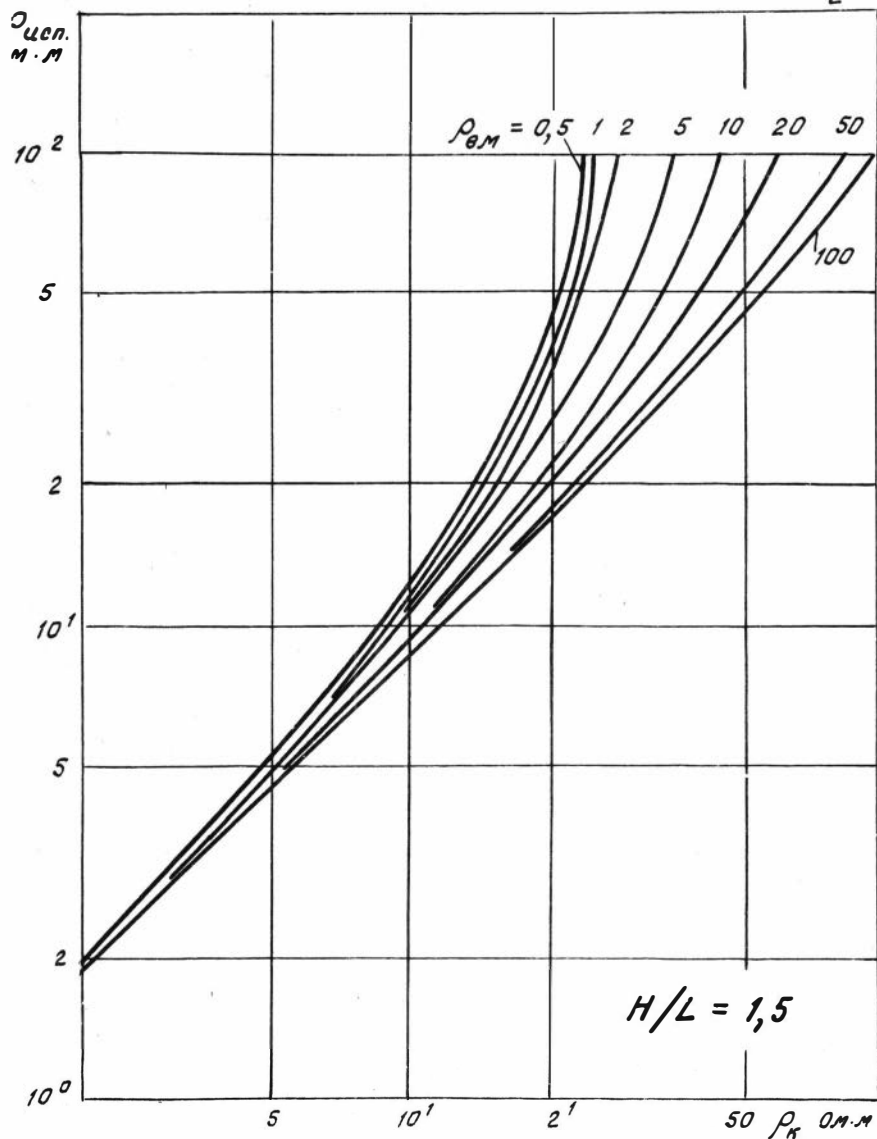
На рис. 9 приведены графики зависимости разности фаз (ось абсцисс) от удельного сопротивления (ось ординат) для различных значений диэлектрической проницаемости однородной среды (градуировочные кривые).

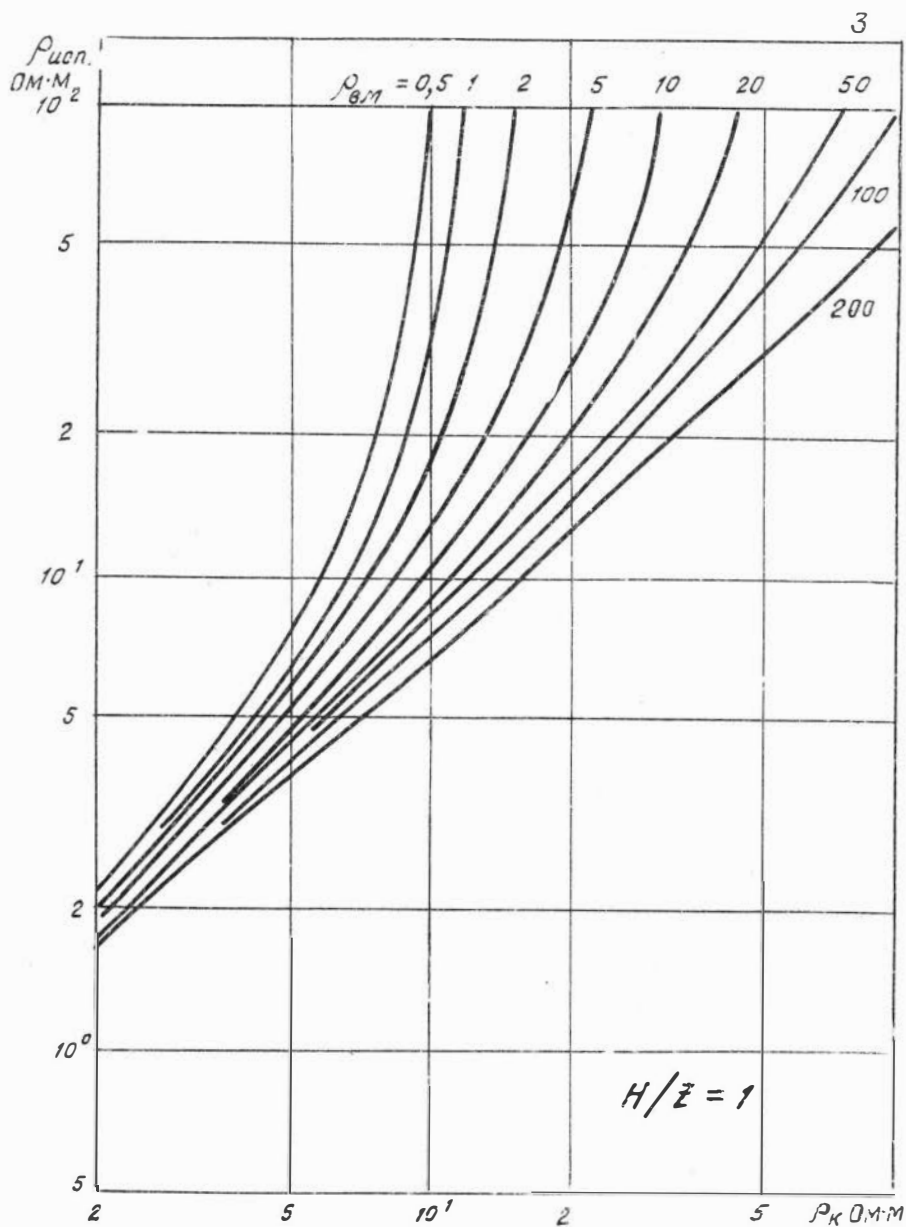
На поле рисунка приведена таблица рабочих частот зондов аппаратуры ВИКИЗ и значения коэффициентов, с помощью которых определяется величина диэлектрической проницаемости путем умножения числа в шифре кривой на K . Например, для рабочей частоты 3,5 МГц ($Z = 1$ м) кривая с цифрой 9,3 соответствует однородной среде с $\epsilon^* = 9,3 \cdot K = 9,3 \cdot 4 = 37,2$ относительных единиц диэлектрической проницаемости. Здесь отметим, что при исследовании низкоомных пластов, например, характерных для терригенных толщ

$\rho_{\text{уч.}}$
 $\text{см} \cdot \text{м}$

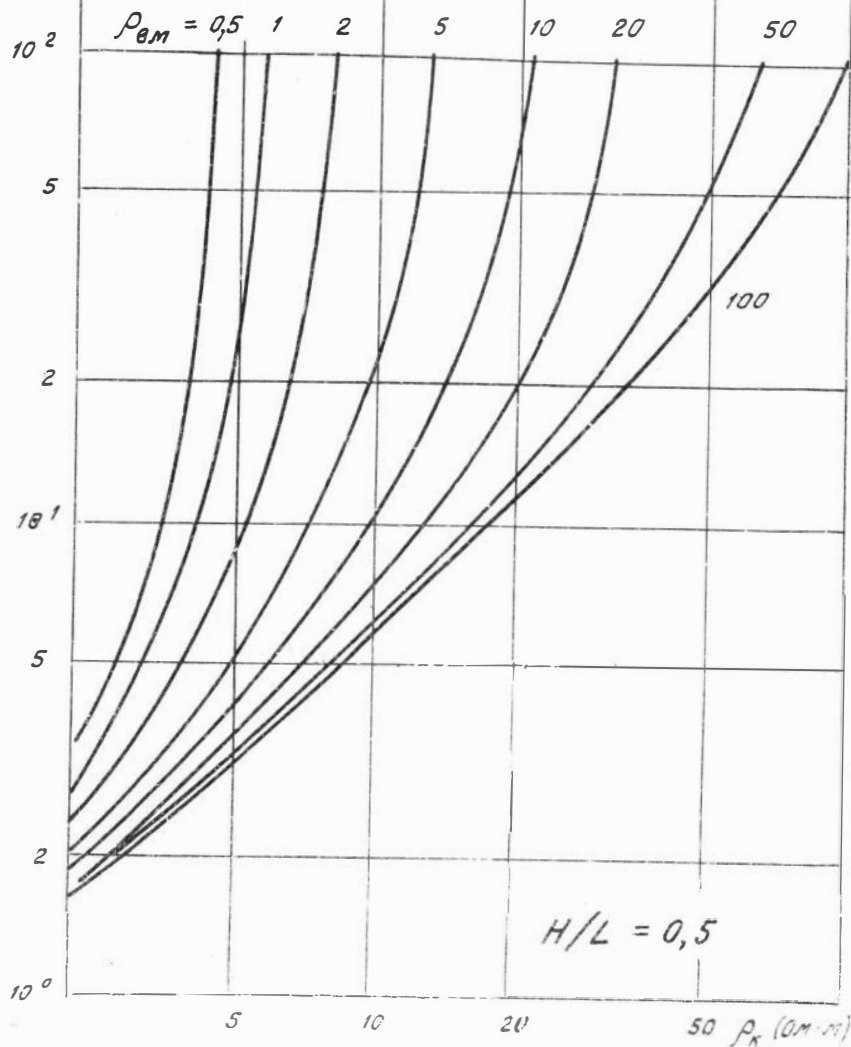
1

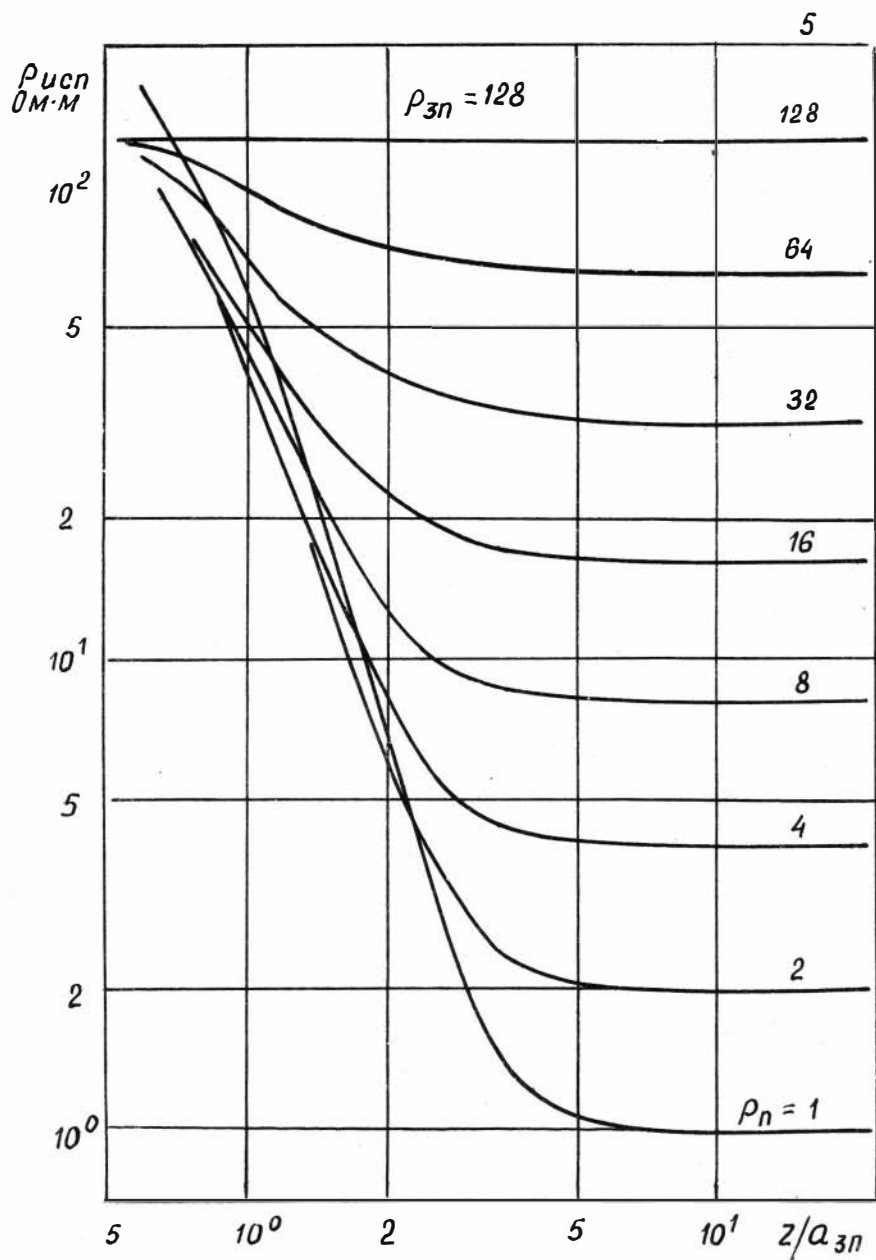


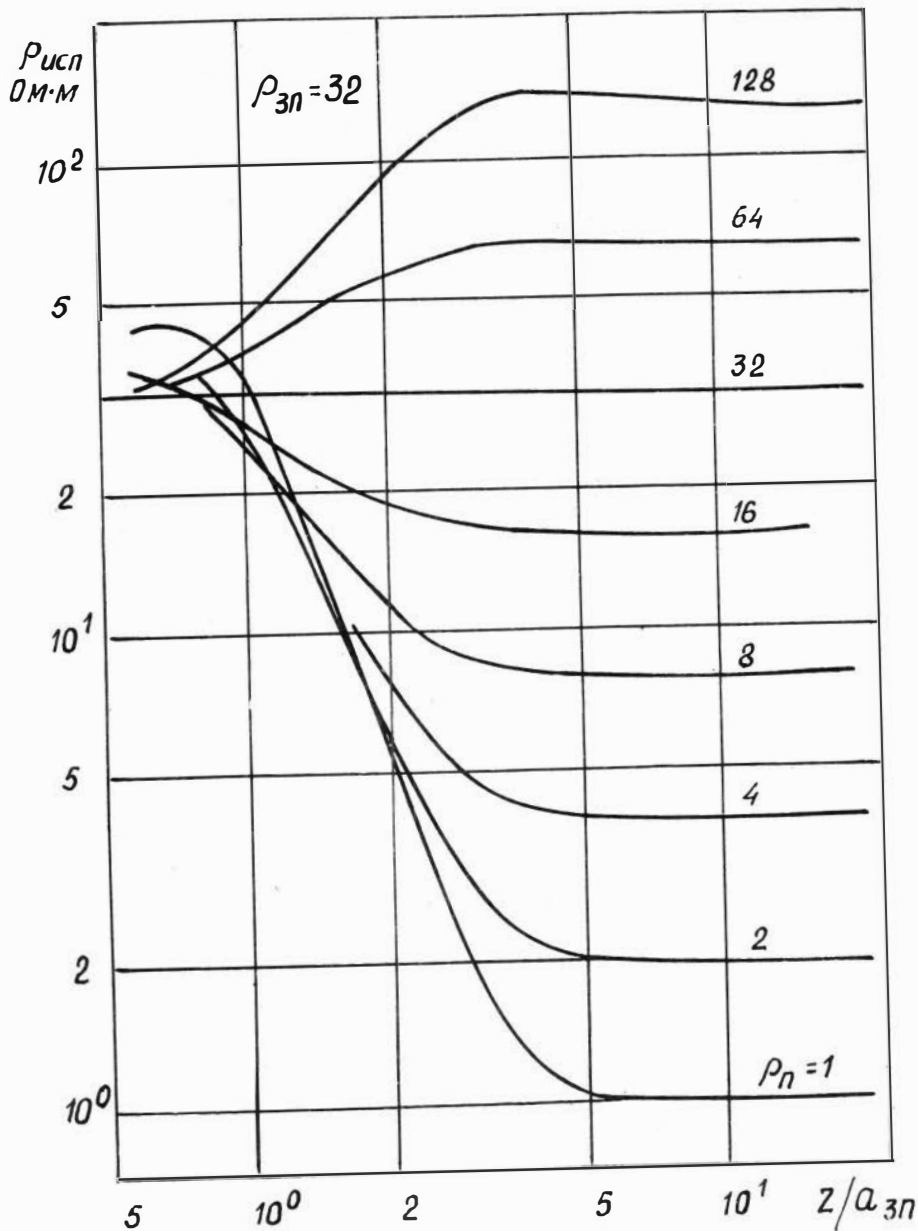


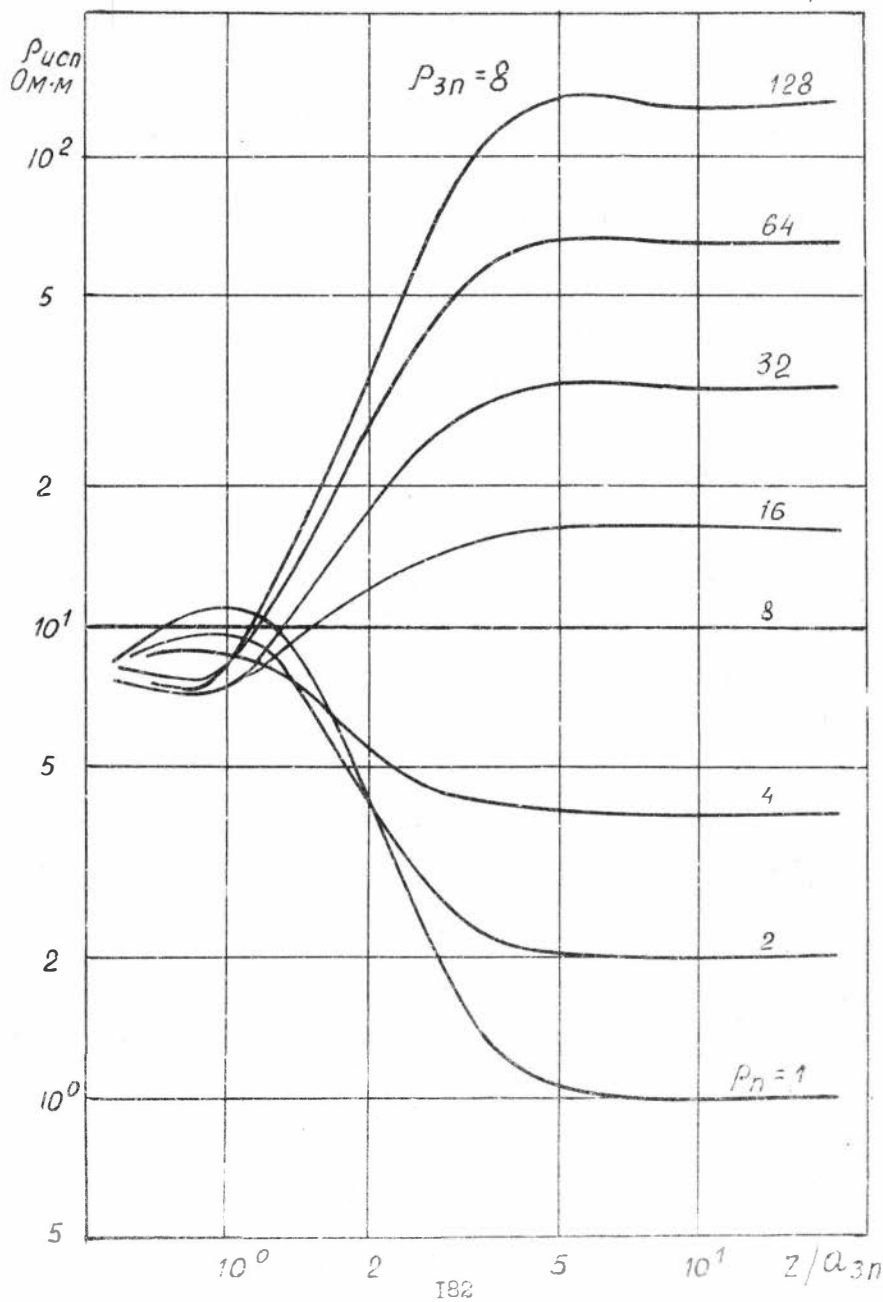


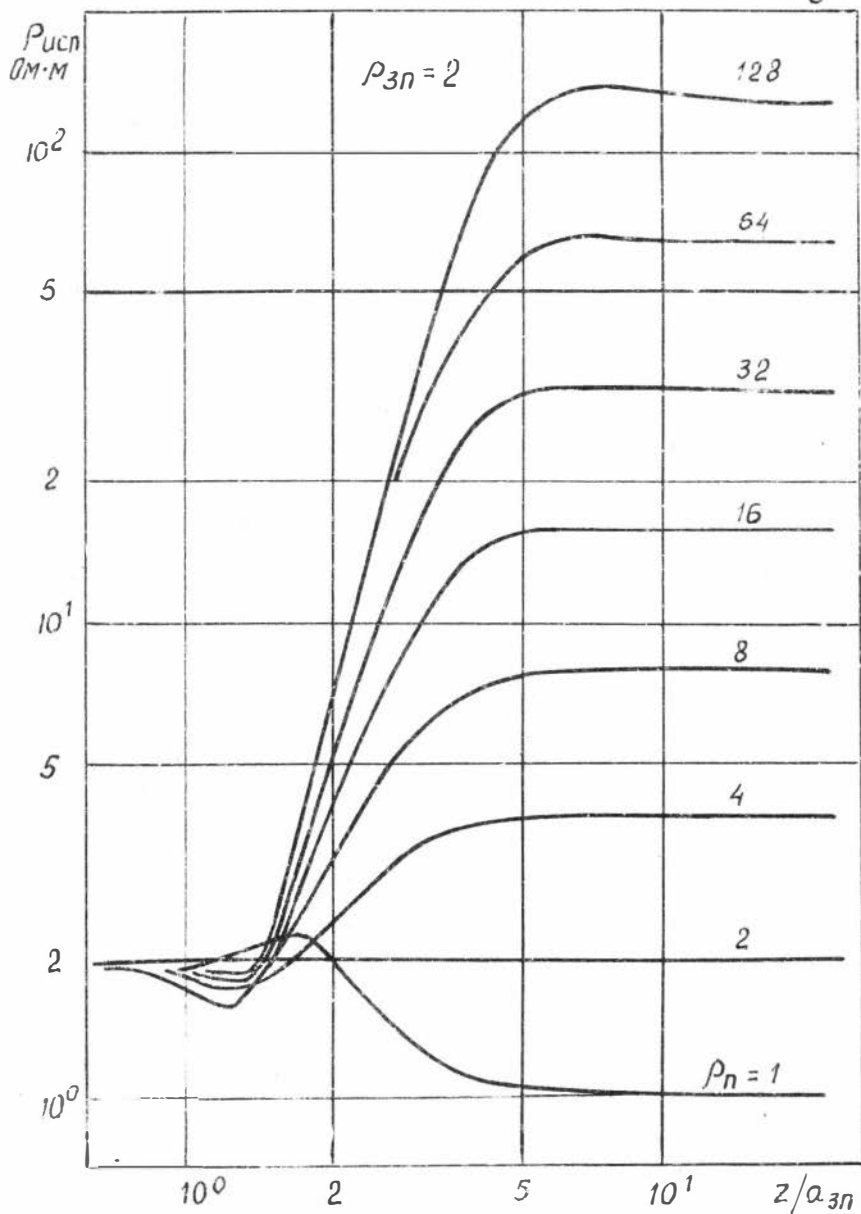
$\rho_{\text{уч.}}$
 $\text{OM} \cdot \text{M}$

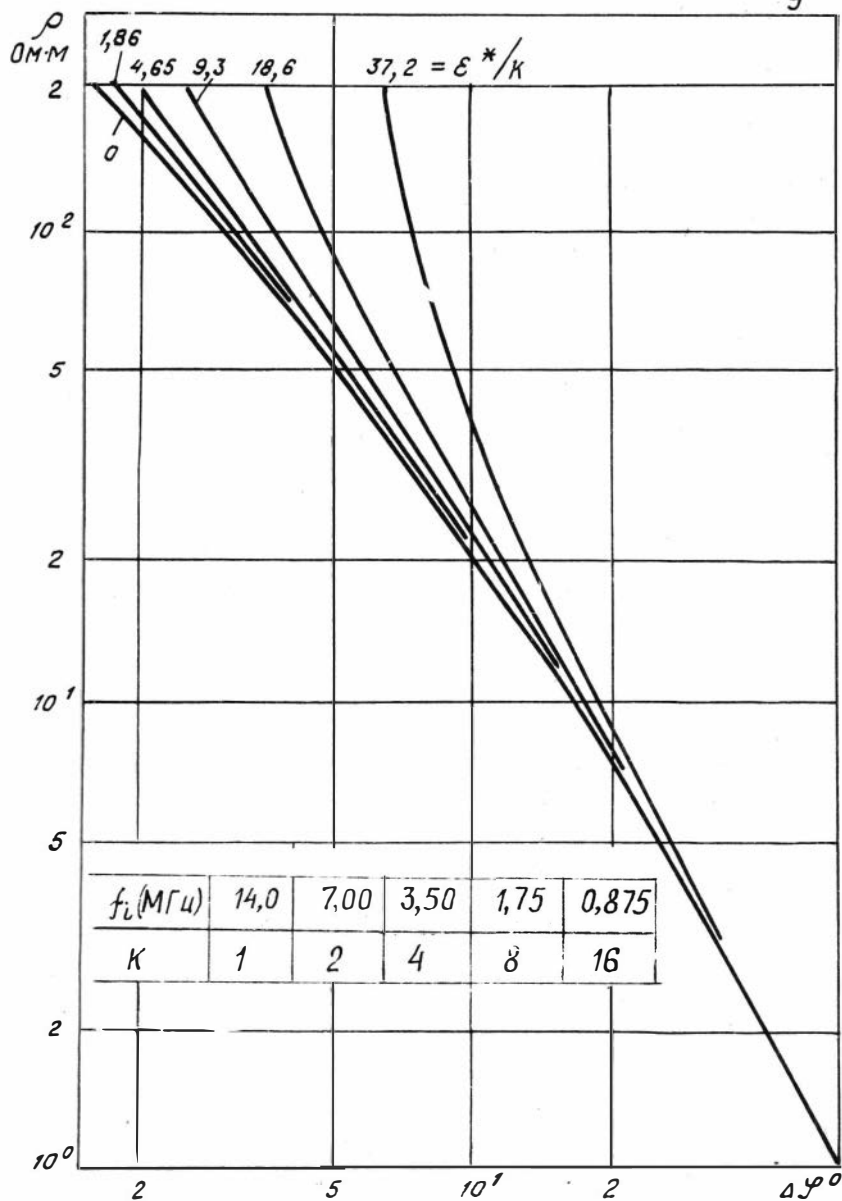












4.1. ПРИБОРЫ ЗОНДИРОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ

На рис. 1 приведены фрагменты каротажных диаграмм, полученных в скважинах, бурившихся на одном из месторождений нефти в Западной Сибири. Геоэлектрические характеристики приведенного разреза являются характерными для всего Среднего Приобья. Из электрических методов каротажа приведены диаграммы потенциалов собственной поляризации (U_{nc}); бокового каротажного зондирования (БКЗ), записанного четырьмя подошвенными градиент-зондами длиной от 0,45 до 4,25 м, одним кровельным зондом ($L = 2,25$ м). Здесь же изображены кривые фокусирующих зондов электрического (БК и МБК) и индукционного методов (ИК). Кроме того, даны диаграммы радиоактивных методов - гамма-каротажа (ГК) и гамма-гамма плотностного каротажа (ГГК-П). Приведены кривые акустического метода (АК): две кривые времен распространения продольной волны (T_1 и T_2) и их интервальное время (ΔT).

На интервале глубин 1928-1990 м выделены пять водонасыщенных (верхняя часть фрагмента) и четыре нефтенасыщенных интервала AC_7 и AC_8 . Ниже приведены еще два фрагмента: водоносный интервал (2030-2038 м) и нефтеносный пласт BC_{2+3} 2II4-2II22 м).

По данным ВИКИЗ, водоносные пласты характеризуются относительно большим градиентом изменения удельного сопротивления в радиальном направлении: от ~ 20 Ом·м, соответствующих показаниям самого короткого зонда ВИКИЗ (0,5 м), до $\sim 2,5$ Ом·м и ниже по данным самого длинного зонда (2 м).

Для нефтенасыщенных пластов, по данным ВИКИЗ, характерен меньший градиент удельного сопротивления в зоне проникновения. Вероятно, для нефтеносных интервалов песчаника в ряде случаев характерно повышенное содержание пелитовой фракции и, следовательно, повышенное содержание связанной пластовой воды. Нефтеносный пласт $BC_{(2+3)}$ характеризуется меньшей пелитизацией, большим коэффициентом пористости и, как следствие, более высокими значениями удельных сопротивлений в зоне проникновения и пласте. Отличительными признаками нефтенасыщенных и водонасыщенных пластов, по данным зондирования ВИКИЗ, в рассматриваемой скважине являются следующие. При исследовании малыми зондами (от 0,5 до 1 м) радиальный градиент удельных сопротивлений приблизительно одинаков как

для нефтеносных, так и для водоносных пластов. Далее, при измерении длинными зондами (1,4 и 2 м), градиент УЭС резко снижается в нефтенасыщенных пластах. Более того, в нефтенасыщенных интервалах может наблюдаться отрицательный градиент УЭС, как например в кровле пласта АС₇ и в пласте БС₂. В водоносных пластах градиент удельного сопротивления сохраняется практически для всех зондов.

Отметим, что данные ВИКИЗ по выделению пластов-коллекторов коррелируют с данными кавернометрии, акустического каротажа и всеми методами электрического каротажа сопротивлений. Вместе с тем, кривые ВИКИЗ не подвержены экранирующему влиянию и искажению за счет высокоомных плотных пропластков, где бы они не находились относительно исследуемого пласта. Так, два тонких пласта, расположенных ниже пласта АС₈, мощность которых не превышает 2 м, могут характеризоваться как нефтенасыщенные по градиенту УЭС всех зондов ВИКИЗ. Для этих пластов характерно сужение диаметра скважины, отрицательная аномалия ПС, малая плотность пород по ГТК-П и значительное снижение интервального времени ΔT , по данным АК. По данным бокового и микробокового методов, эффективная мощность этих пластов выделяется уверенно. Индукционный метод не разрешает эти пласты по вертикали, а боковое каротажное зондирование подвержено экранирующему влиянию.

В таблице приведены результаты интерпретации нефтенасыщенных пластов АС₇, АС₈ и БС₂, а также водоносного интервала (второй фрагмент на рис. 1).

Интервал		Мощность пласта, м	БК	ИК	БКЗ	В И К И З		
Пласт	глубин, м		ρ_K Ом·м	ρ_K Ом·м	ρ_n Ом·м	ρ_n Ом·м	$\rho_{зп}$ Ом·м	$\alpha_{зп}$ м
1 АС ₇	1954,0-1958,4	4,4	10	4	2,1	2,6	20	0,65
2	1968,0-1970,2	2,2	11	10	—	9,0	14	0,45
3 АС ₂	1970,2-1972,4	2,2	10	9	—	6,0	12	0,45
4 АС ₈	1974,6-1983,6	9,0	8	7	5,0	5,5	10	0,45
5	20,32 -2038,0	5,6	9	3	2,0	2,2	21	0,50
6 БС ₂	2114,0-2117,2	3,2	23	16	—	13	40	0,70

На рис. 2 и рис. 3 приведены кривые электромагнитного каротажного зондирования. На рис. 2 - для водонасыщенных пластов I и 5, а на рис. 3 - для нефтенасыщенных пластов AC_7 (2 и 3), AC_8 (4) и BC_2 (6). Здесь же, на поле экспериментальных графиков, изображены теоретические кривые для трехслойных (рис. 2) и четырехслойных (рис. 3) цилиндрически-слоистых сред (штриховые линии). Шифром теоретических кривых на рис. 2 являются значения ρ_n , а на рис. 3 - a_{3n}/a_c . Толщина слоя окаймляющей зоны составляет 20% от радиуса зоны проникновения: $a_{03} = 0,2 a_{3n}$

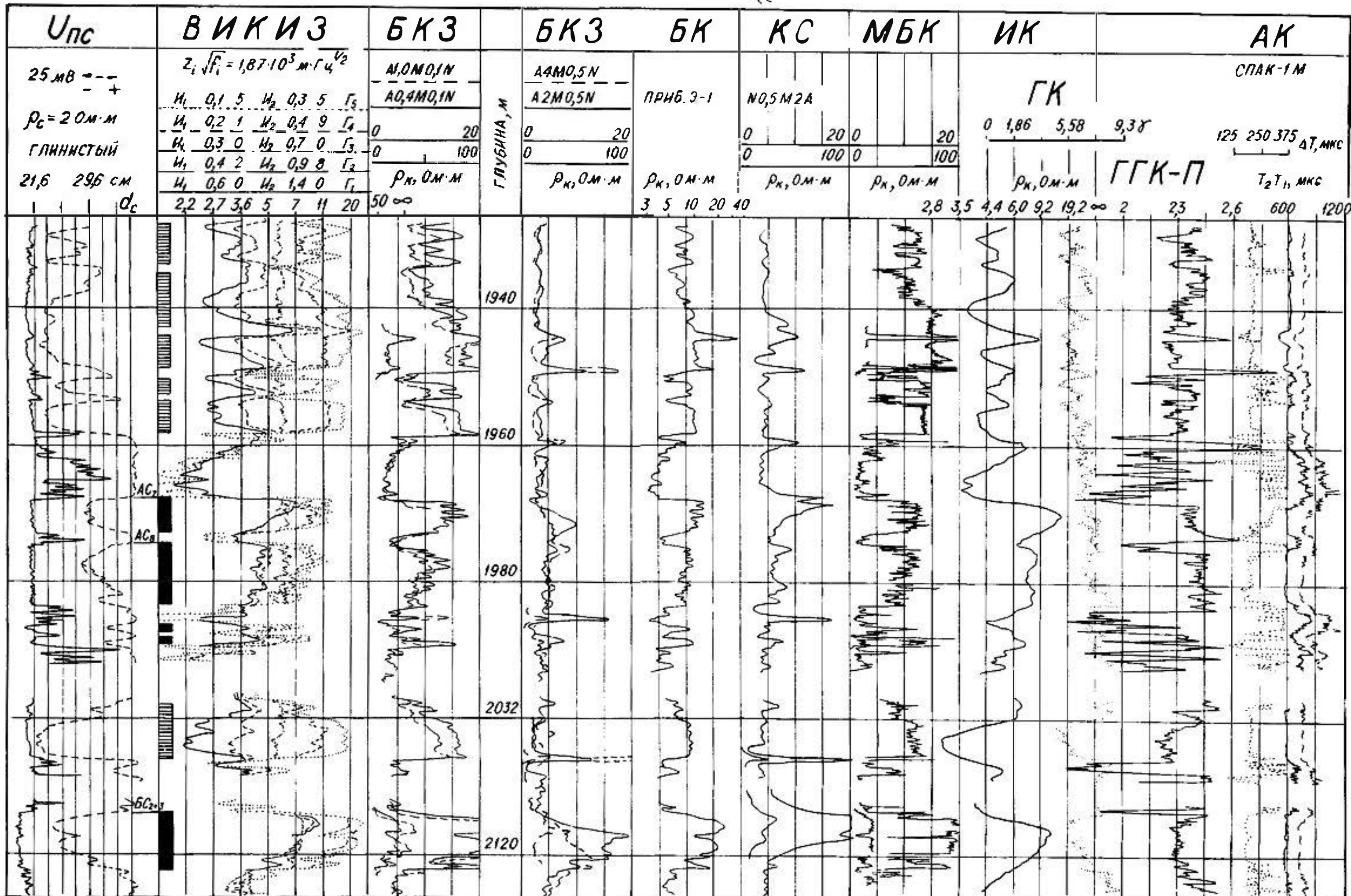


Рис. 1

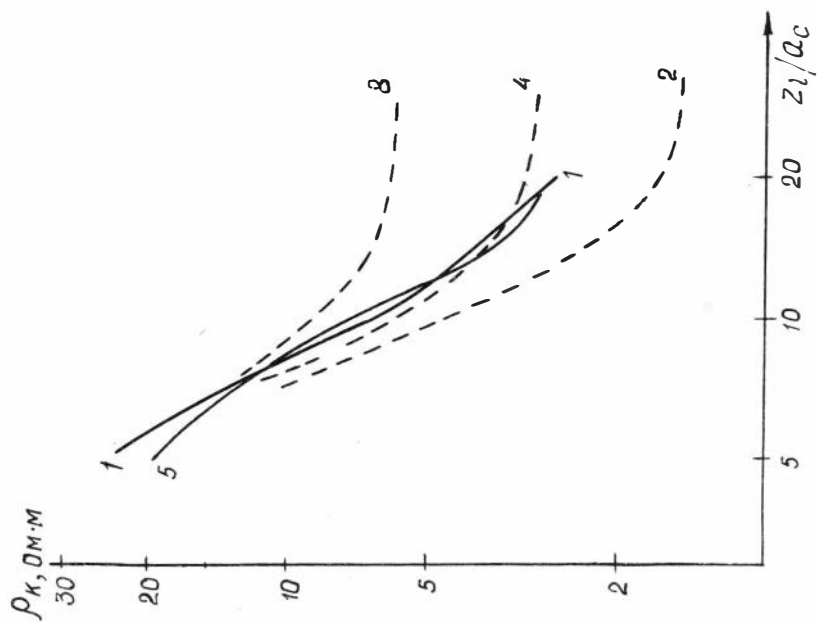


Рис. 2.

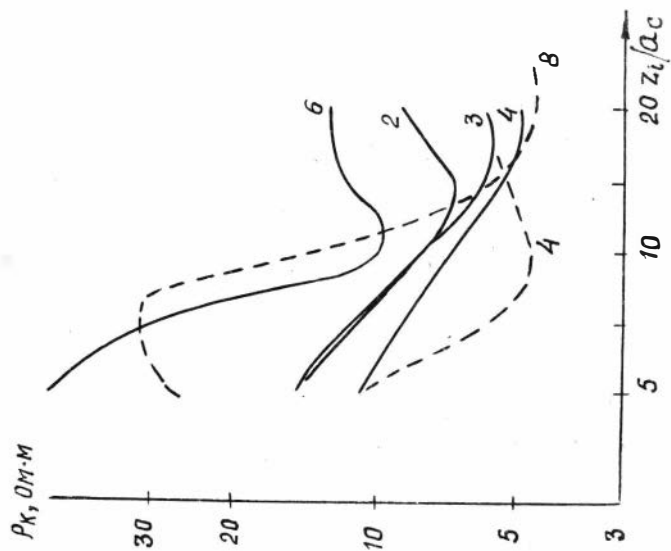


Рис. 3.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Антонов Ю.Н. Изопараметрическое каротажное зондирование.- Геол. и геофиз., 1980, № 6, с. 81-91.

2. Антонов Ю.Н. Вертикальные характеристики изопараметрического каротажного зондирования. - Геол. и геофиз., 1981, № 5, с. 123-129.

3. Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Методические рекомендации. Состав.: Антонов Ю.Н., Жмаев С.С., Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1979, с. 104.

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ	3
2 . ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИЗОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ В СРЕДАХ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ РАЗДЕЛА (ПЛАСТЫ КОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ)	35
2 .1. Вертикальные характеристики зондов при центральном раз- мещении точки записи относительно границ пластов	37
2 .2. Кривые профилирования пластов изопараметрическими зон- дами	57
3 . ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ НА ОСИ КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА	66
3.1. Двухслойная цилиндрически-слоистая модель среды	66
3.2. Трехслойная цилиндрически-слоистая модель среды	108
3.3. Четырехслойная цилиндрически-слоистая модель среды . .	164
3.4. Дифференциальные характеристики изопараметрических зондов	167
4. ПАЛЕТКИ КАРОТАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	172
4.1. Примеры зондирования в скважинах	185
ЛИТЕРАТУРА	189

АЛБЕОМ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ
КАРОТАЖНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Методические рекомендации

Технический редактор Н.Н. Александрова

Подписано к печати 17.02.83. МН 17458.
Бумага 60x84/16. Печ.л. 12,0+1вкл. Уч.-изд.л. 10,7.
Тираж 200. Заказ 85. Цена 75 коп.

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

ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ СО АН СССР высылает наложенным платежом следующие книги по геофизике:

Дипольные частотные зондирования двухслойной среды. Новосибирск, 1980. Часть I - I руб., часть II - 2 руб.

Методика интерпретации и альбом теоретических кривых глубинных зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне. Новосибирск, 1982. 35 коп.

Альбом теоретических кривых глубинных зондирований становлением поля в горизонтально-неоднородных средах. Составитель Табаровский Л.А. Новосибирск, 1979. I руб.

Альбом теоретических кривых зондирований становлением поля над неоднородным пластом. Составитель Табаровский Л.А. Новосибирск, 1979. 2 руб.

Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование. Составители: Антонов Ю.Н., Емаев С.С. Новосибирск, 1979. 90 коп.

Л.А. Табаровский, Г.Б. Ицкович. Метод переходных процессов при исследовании кимберлитовых трубок. Новосибирск, 1981. (Препринт). 20 коп.

Л.А. Табаровский, Г.Б. Ицкович. Дифракция нестационарного электромагнитного поля на тонком диске (трехмерная задача). Новосибирск, 1982. (Препринт).

Индукционные датчики в рудной геологии/ Составители: В.В. Аксенов, С.С. Лапин. Новосибирск, 1981. I руб. 30 коп.

Методика и результаты геотермических исследований. Новосибирск, 1979. 80 коп.

Заказы направляйте по адресу:

630090, Новосибирск, 90,

Университетский пр. 3,

ИГиГ СО АН СССР, РИО