

**РУКОВОДСТВО
ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ**

ВЕРТИКАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЗОНДИРОВАНИЙ

А.М. ПЫЛАЕВ

—

РУКОВОДСТВО ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

А. М. ПЫЛАЕВ

Издание второе, исправленное



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПЕДРА»
Москва, 1968

Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирования. Пылаев А. М. Издательство «Недра» 1968 г., стр. 148.

В настоящем руководстве рассмотрены основы методики, практические приемы интерпретации кривых вертикального электрического зондирования и альбом палеток трехслойных кривых.

В главе I описаны характер и типы кривых ВЭЗ и принципы их группирования в палетки; подробно рассмотрен вопрос об эквивалентности трехслойных разрезов при разном соотношении сопротивлений и мощностей слоев; даны основные понятия об анизотропии. Описаны графические приемы построения трех- и четырехслойных кривых различных типов. Приведены сведения об электрическом сопротивлении горных пород и влиянии вертикальных и наклонных границ раздела сред с разным сопротивлением на форму кривых ВЭЗ.

Глава II посвящена методике интерпретации кривых ВЭЗ с помощью палеточных кривых. Подробно разобраны случаи интерпретации трех- и четырехслойных кривых различных типов и даны дополнительные диаграммы и кривые; рассмотрены вопросы оценки сопротивлений и коэффициентов анизотропии по данным каротажа, параметрических ВЭЗ и ВЭЗ по профилю и приведены практические примеры интерпретации трехслойных разрезов.

Прилагаемый к книге альбом палеток содержит 31 лист: палетку ρ_2 , трехслойные кривые типов H, Q, K и A, сгруппированные в четыре серии, и палетки LCH, LCA, LCQ и LCK.

Книга рассчитана на инженеров-геофизиков для ознакомления их с основами методики интерпретации кривых ВЭЗ.

Таблиц 4, иллюстраций 64, библиографических названий 32.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Книга Александра Михайловича Пылаева с альбомом палеток теоретических кривых, изданная в 1948 г., явилась первым полным руководством по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Освещение в ней всех основных вопросов, связанных с интерпретацией кривых ВЭЗ, значительно повысило качество электроразведочных работ и надежность их результатов и тем самым обеспечило широкое применение электрических зондирований для решения самых различных геологических задач.

Руководство по интерпретации ВЭЗ, написанное в краткой, но очень четкой и ясной форме, стало настольной книгой многих геофизиков. Весьма ценным является альбом теоретических кривых, составленный А. М. Пылаевым в форме, наиболее удобной для интерпретации практических кривых. Несмотря на то, что с момента составления руководства прошло более 25 лет, основные положения интерпретации ВЭЗ, изложенные в нем, справедливы и в настоящее время.

При подготовке книги ко второму изданию некоторые разделы исключены, так как они в настоящее время устарели; внесены небольшие исправления и обновлен список литературы.

Научный редактор Н. Б. Дортман

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Настоящая работа закончена старшим научным сотрудником Геофизического сектора ВСЕГЕИ Александром Михайловичем Пылаевым в 1940 г., а в 1941 г. была сдана в издательство.

А. М. Пылаев был одним из ведущих геофизиков, способствовавших развитию и широкому внедрению в практику методов электроразведки. С первых дней Великой Отечественной войны Александр Михайлович — командир артиллерийской части на подступах к Ленинграду. Свою жизнь он отдал за Родину, за наше право строить свою свободную и счастливую жизнь.

Всесоюзный научно-исследовательский институт разведочной геофизики, созданный после войны на базе Геофизического сектора ВСЕГЕИ, в лице А. М. Пылаева потерял отличного специалиста, отзывчивого и скромного товарища.

В годы войны, в 1943 г., институт выпустил литографским способом 49 экземпляров публикуемой работы. Большой спрос со стороны специалистов подтверждает ценность данной работы и необходимость выпуска ее в том же виде без изменений.

Дирекция ВИРГ

ВВЕДЕНИЕ

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) широко используется при решении самых разнообразных геологических задач. Электрические зондирования успешно применяются в структурной геологии при работах, связанных с поисками и разведкой нефти, угля, газа, соли, а также при геологической съемке и поисках различных рудных и нерудных полезных ископаемых. Хорошие результаты получены методом ВЭЗ при исследованиях под гидросооружения, тоннели, мостовые переходы, железнодорожные выемки, т. е. при инженерно-геологических изысканиях. Во многих районах вертикальные электрические зондирования широко проводятся в гидрогеологических целях для поисков и разведки пресных и минерализованных вод, исследования вечной мерзлоты, оползней и т. п.

Опыт многочисленных полевых работ методом ВЭЗ показывает, что основным фактором при наличии правильно проведенных измерений, обеспечивающих достоверность и полноценность выводов, следует считать интерпретацию. При интерпретации данных полевых измерений следует рассматривать не только методику оперирования с палетками, но целый ряд вопросов, связанных с геологической расшифровкой полевых данных. Сюда в первую очередь должны быть отнесены вопросы оценки сопротивлений пород, постоянства сопротивлений или закономерности их изменений, учет влияния различных факторов на точность интерпретации и т. п. Кроме того, следует учесть, что возможность получения полноценных полевых материалов находится в прямой связи со своевременной и надежно проведенной предварительной интерпретацией.

Глава I

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЭЗ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ПЕРЕЧЕНЬ ПАЛЕТОК

Задача вычисления потенциала от точечного электрода, расположенного на поверхности земли, принципиально решена для любого числа расположенных на различных глубинах параллельно дневной поверхности изотропных пластов различной проводимости. Задача о вычислении зависимости наблюдаемых значений кажущегося сопротивления в методе ВЭЗ от величины $l = \frac{AB}{2}$ решена для любых соотношений сопротивлений и мощностей пластов.

Решение этой задачи для случая n -слоев представляется в виде бесконечной суммы:

$$\frac{\rho_k}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_1^{\infty} q_n f_n(l),$$

где q_n — функция, зависящая только от соотношений сопротивлений и мощностей различных горизонтов; $f_n(l)$ — функция, зависящая лишь от размеров установки l и от порядкового номера (n) члена суммы.

Двуслойная палетка (в дальнейшем — палетка ρ_2), соответствующая наличию только двуслойной среды, была вычислена и предложена для оценки глубин при интерпретации ВЭЗ еще в первые годы применения метода постоянного тока для разведочных целей.

Для удобства использования при интерпретации эта палетка была предложена в двойном логарифмическом масштабе. Действительно, общий вид решения задачи о распределении потенциала точечного электрода на поверхности земли для любого числа слоев зависит не от абсолютных значений сопротивлений и мощностей этих слоев, а от их соотношений. Вследствие этого палетка легко может быть применена для сопоставления ее с графиками ВЭЗ, вычерченными также в двойном логарифмическом масштабе, при любых абсолютных значениях сопротивлений и мощностей.

Применение палетки ρ_2 для интерпретации двуслойных графиков ВЭЗ давало возможность быстрой и однозначной оценки как сопротивлений (ρ_1 и ρ_2), так и мощности первого слоя.

Попытки использования двуслойной палетки для интерпретации графиков ВЭЗ трехслойного типа указали на ограниченность этих возможностей. Удовлетворительные результаты были получены лишь при относительно больших мощностях второго слоя.

При определении глубины залегания какого-либо опорного горизонта чаще всего встречаются разрезы относительно однородные как по своему геологическому строению, так и по значению физических постоянных. В этом случае от точки к точке, особенно при обследовании небольших площадей, чаще всего меняются соотношения мощностей отдельных горизонтов, составляющих данный разрез, и сопротивление первого поверхностного горизонта. Обратный случай, когда соотношение мощностей каких-то горизонтов остается все время постоянным, а от точки к точке меняется, например, значение сопротивления второго слоя, — встречается очень редко. Это дало повод [22] к систематизации трехслойных палеток по принципу постоянства соотношений сопротивлений и переменных соотношений мощностей, с выделением линии, соответствующей глубине залегания подошвы второго слоя ($h_1 + h_2$).

Все теоретические трехслойные диаграммы представлены в таком виде, чтобы облегчить и упростить их использование для интерпретации многослойных графиков ВЭЗ (непосредственное определение h_2 ; $m_2 = h_1 + h_2$; S_2 ; T_2 и т. п.). Помимо этого уточнены вопросы использования каротажных данных для оценки сопротивлений (оценка влияния анизотропии и т. п.), дано представление о пределах применимости принципа эквивалентности и т. п.

В данной работе сделано обобщение имеющихся материалов по теоретическому и экспериментальному изучению электрических полей для различных условий в таком виде, чтобы интерпретатор мог эффективно их использовать для целей интерпретации ВЭЗ.

Разумеется, что по ряду вопросов вследствие недостаточной их изученности соответствующие рекомендации оказались возможным дать лишь в общем, иногда в схематизированном виде. К таким вопросам относятся, например: приемы интерполяции при построении и интерпретации многослойных кривых, точность оценки средних сопротивлений по данным каротажа и т. п.

В данном руководстве и на палетках приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{array}{l} \rho_1; \rho_2; \rho_3, \dots, \rho_n \text{ — сопротивления соответствующих горизонтов;} \\ h_1; h_2; l_3, \dots, h_n \text{ — мощности соответствующих горизонтов;} \\ \left. \begin{array}{l} m_1 = h_1 \\ m_2 = l_1 + h_2 \\ m_n = l_1 + h_2 + \dots, h_n \end{array} \right\} \text{ — глубины залегания подошвы соответствующих горизонтов;} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{h_1}{\rho_1}; & T_1 &= l_1 \rho_1 \\ S_2 &= \frac{h_2}{\rho_2}; & T_2 &= l_2 \rho_2 \\ S_n &= \frac{h_n}{\rho_n}; & T_n &= h_n \rho_n \end{aligned} \right\} \text{— продольные проводимости и поперечные} \\ \text{сопротивления;}$$

$$\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}; \quad \nu_2 = \frac{h_2}{h_1} \text{— соотношения сопротивлений и мощностей;}$$

ρ_l ; ρ_m ; ρ_n — продольное, среднее и поперечное сопротивления;

$\lambda = \frac{\rho_m}{\rho_l} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ — коэффициент общей анизотропии;

λ_p, λ_m — коэффициент микро- и макроанизотропии.

При систематизации трехслойных диаграмм ВЭЗ в палетки были использованы следующие данные:

- 1) комплект трехслойных диаграмм Шлумберже;
- 2) вычисления ГСГТ (трехслойные диаграммы для $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$ и $\rho_3 = \rho_2^{2/3}$);

3) отдельные кривые (на палетках $H \frac{1}{100}$ и $H \frac{1}{300}$ и др.) из числа рассчитанных и построенных графическим методом во ВСЕГЕИ.

В прилагаемом к настоящему руководству комплекте палеток (см. приложение) теоретические диаграммы систематизированы по принципу постоянства соотношений сопротивлений и переменных соотношений мощностей для каждой палетки.

Для удобства палетки объединены в четыре серии, каждая из которых содержит все кривые, относящиеся к различным возможным комбинациям соотношений между ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 (табл. 1).

Серия Н объединяет все кривые типа $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ с относительно хорошо проводящим промежуточным слоем, который при его достаточной мощности отражается на кривой в виде минимума ρ_k .

Серия Q объединяет все кривые типа $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ с последовательным уменьшением сопротивлений.

Серия К объединяет все кривые типа $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ с относительно плохо проводящим промежуточным слоем, который при его достаточной мощности отражается на кривой в виде максимума ρ_k .

Серия А объединяет все кривые типа $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ с последовательным увеличением сопротивлений.

В индексе каждой палетки, помимо буквы, обозначающей серию палетки, указаны значения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и ρ_3 . Цифры около каждой кривой указывают значение соответствующего $\frac{h_2}{h_1}$.

На палетках даны линии h_1 , h_2 и $m_2 = h_1 + h_2$, которые представляют геометрические места точек пересечения кривых ρ_k с ординатами соответствующих для этих кривых мощностей и глубин.

Таблица 1

№ палетки	Соотношение сопротивлений	Индекс палетки	Значения		
			ρ_1	ρ_2	ρ_3
1	$\rho_1 \geq \rho_2$	Палетка « ρ_2 »	1	0— ∞	—
2	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{2}{3} - \infty$	1	$\frac{2}{3}$	∞
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{3}{7} - \infty$	1	$\frac{3}{7}$	∞
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{4} - \infty$	1	$\frac{1}{4}$	∞
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{9} - \infty$	1	$\frac{1}{9}$	∞
3	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{19} - \infty$	1	$\frac{1}{19}$	∞
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{39} - \infty$	1	$\frac{1}{39}$	∞
4	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{100} - \infty$	1	$\frac{1}{100}$	∞
5	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{300} - \infty$	1	$\frac{1}{300}$	∞
6	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{2}{3} - \rho_1$	1	$\frac{2}{3}$	ρ_1
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{3}{7} - \rho_1$	1	$\frac{3}{7}$	ρ_1
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{4} - \rho_1$	1	$\frac{1}{4}$	ρ_1
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{9} - \rho_1$	1	$\frac{1}{9}$	ρ_1
7	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{19} - \rho_1$	1	$\frac{1}{19}$	ρ_1
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{39} - \rho_1$	1	$\frac{1}{39}$	ρ_1
8	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{2}{3} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{2}{3}$	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{3}{7} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{3}{7}$	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$H - \frac{1}{4} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{1}{4}$	$\sqrt{\rho_2}$

Продолжение табл. 1

№ палетки	Соотношение сопротивлений	Индекс палетки	Значения		
			ρ_1	ρ_2	ρ_3
8	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$\text{H} - \frac{1}{9} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{1}{9}$	$\sqrt{\rho_2}$
9	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$\text{II} - \frac{1}{19} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{1}{19}$	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$	$\text{H} - \frac{1}{39} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{1}{39}$	$\sqrt{\rho_2}$
10	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{2}{3} - 0$	1	$\frac{2}{3}$	0
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{3}{7} - 0$	1	$\frac{3}{7}$	0
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{4} - 0$	1	$\frac{1}{4}$	0
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{9} - 0$	1	$\frac{1}{9}$	0
11	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{19} - 0$	1	$\frac{1}{19}$	0
12	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{39} - 0$	1	$\frac{1}{39}$	0
13	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{2}{3} - \rho_2^2$	1	$\frac{2}{3}$	ρ_2^2
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{3}{7} - \rho_2^2$	1	$\frac{3}{7}$	ρ_2^2
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{4} - \rho_2^2$	1	$\frac{1}{4}$	ρ_2^2
14	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{9} - \rho_2^2$	1	$\frac{1}{9}$	ρ_2^2
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{19} - \rho_2^2$	1	$\frac{1}{19}$	ρ_2^2
15	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{39} - \rho_2^2$	1	$\frac{1}{39}$	ρ_2^2
16	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{2}{3} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{2}{3}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{3}{7} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{3}{7}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$

Продолжение табл. 1

№ палетки	Соотношение сопротивлений	Индекс палетки	Значения		
			ρ_1	ρ_2	ρ_3
16	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{4} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{1}{4}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
17	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{9} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{1}{9}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
18	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{19} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{1}{19}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$	$Q - \frac{1}{39} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{1}{39}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
19	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{3}{2} - 0$	1	$\frac{3}{2}$	0
20	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{7}{3} - 0$	1	$\frac{7}{3}$	0
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 4 - 0$	1	4	0
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 9 - 0$	1	9	0
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 19 - 0$	1	19	0
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 39 - 0$	1	39	0
21	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{3}{2} - \rho_1$	1	$\frac{3}{2}$	ρ_1
22	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{7}{3} - \rho_1$	1	$\frac{7}{3}$	ρ_1
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 4 - \rho_1$	1	4	ρ_1
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 9 - \rho_1$	1	9	ρ_1
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 19 - \rho_1$	1	19	ρ_1
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 39 - \rho_1$	1	39	ρ_1
23	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{3}{2} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{3}{2}$	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - \frac{7}{3} - \sqrt{\rho_2}$	1	$\frac{7}{3}$	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 4 - \sqrt{\rho_2}$	1	4	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K - 9 - \sqrt{\rho_2}$	1	9	$\sqrt{\rho_2}$

Продолжение табл. 1

№ палетки	Соотношение сопротивлений	Индекс палетки	Значения		
			ρ_1	ρ_2	ρ_3
24	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K-19 - \sqrt{\rho_2}$	1	19	$\sqrt{\rho_2}$
	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$	$K-39 - \sqrt{\rho_2}$	1	39	$\sqrt{\rho_2}$
25	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{3}{2} - \infty$	1	$\frac{3}{2}$	∞
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{7}{3} - \infty$	1	$\frac{7}{3}$	∞
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-4 - \infty$	1	4	∞
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-9 - \infty$	1	9	∞
26	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{3}{2} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{3}{2}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{7}{3} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{7}{3}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-4 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	4	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-9 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	9	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
27	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-19 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	19	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-39 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	39	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
28	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{3}{2} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{3}{2}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A - \frac{7}{3} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	$\frac{7}{3}$	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-4 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	4	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-9 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	9	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
29	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-19 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	19	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$	$A-39 - \rho_2^{\frac{3}{2}}$	1	39	$\rho_2^{\frac{3}{2}}$
30	Палетки LCH и LCA				
31	Палетки LCQ и LCK				

Кроме того, на палетках серий Н и А нанесены линии S_2 и $S = S_1 + S_2$, на палетках серии К — линии T_2 и $S = S_1 + S_2$, на палетках серии Q — линии $S = S_1 + S_2$. Соответствующие пояснения будут также приведены ниже. Палетки даны в двойном логарифмическом масштабе с модулем 6,25 см.

§ 2. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ХАРАКТЕРЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ. ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Двуслойные кривые

Рассмотрение палетки ρ_2 (см. приложение) показывает, что для случая $\rho_2 < \rho_1$ соответствующие кривые ρ_k начиная уже с малых разносов питающих электродов $\frac{AB}{2}$ дают резкое понижение и при $\frac{AB}{2}$ не более $10h_1$ значения ρ_k даже для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{99}$ достигают истинных

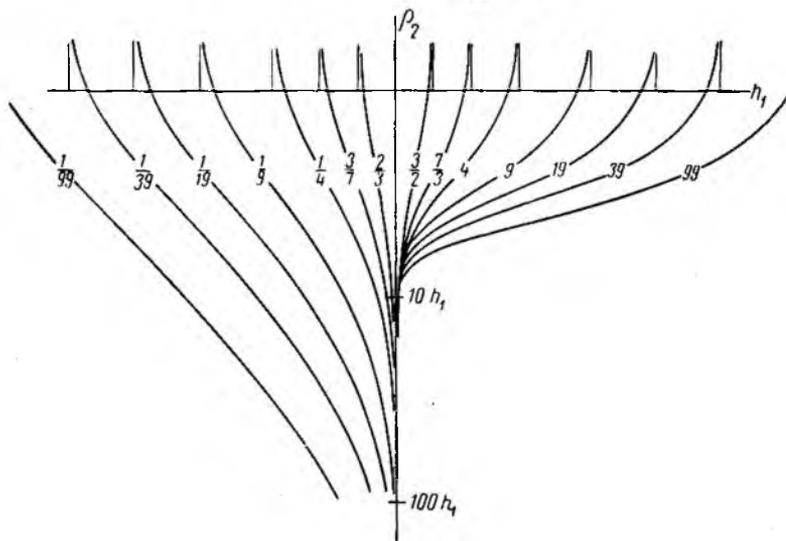


Рис. 1. Двуслойные кривые ВЭЗ при переменном удельном электрическом сопротивлении первого слоя (ρ_1) и постоянном — второго слоя (ρ_2).

Шифр кривых $\frac{\rho_1}{\rho_2}$.

значений ρ_2 . На рис. 1 кривые палетки ρ_2 представлены в другом виде. Здесь значение ρ_2 принято постоянным, а в качестве переменной величины взято ρ_1 .

Обратный случай, когда $\rho_2 > \rho_1$, в этом отношении менее благоприятен и значения ρ_k достигают истинных значений ρ_2 лишь при очень больших $\frac{AB}{2}$. В частности, при $\frac{AB}{2} = 100h_1$ значения ρ_k дости-

гают лишь 88% от истинного $\rho_2 = 19\rho_1$, 72% от истинного $\rho_2 = 39\rho_1$ и 50% от истинного $\rho_2 = 99\rho_1$.

Соответствующее физическое объяснение этого фактора может быть сделано, исходя из элементарных законов о распределении тока в параллельных цепях. Действительно, при достаточно больших по отношению к h_1 разностях AB мы можем рассматривать участок цепи между питающими электродами A и B (исключая соединительный провод и батарею) как два соединенных параллельно проводника в виде двух слоев. Наличие разницы сопротивлений между этими слоями вызывает соответствующее перераспределение тока по сравнению с электрически однородной средой. При этом плотность тока увеличивается в более проводящем и уменьшается в менее проводящем слое. В связи с этим наличие, например, более проводящего второго слоя отмечается на графиках ВЭЗ более четко уже при относительно небольших разностях. Следует отметить также, что направление линий (векторов) тока в более проводящем слое будет приближаться к направлению плоскости контакта, в то время как в менее проводящем слое, наоборот, к направлению, нормальному плоскости контакта. Это положение легко доказывается законом преломления токовых линий на контакте двух сред, согласно которому произведение сопротивления на тангенс угла между направлением тока в данной среде и нормалью к плоскости контакта должно оставаться постоянным для обеих сред.

Кривые типа Н и принцип эквивалентности S_2

Кривые типа Н (приложение, № 2—9) соответствуют случаю, когда проводящий слой заключен между двумя менее проводящими слоями. При малых разностях ($\frac{AB}{2} < 0,7h_1$) значения кажущихся сопротивлений соответствуют сопротивлению первого слоя. После этого при достаточной мощности второго слоя на кривых ВЭЗ отмечается минимум кажущегося сопротивления, вызванный наличием этого проводящего слоя. При постоянном значении v_2 , чем больше мощность второго слоя, тем значение ρ_x в точке минимума больше приближается к истинному сопротивлению второго слоя. Вместе с тем при увеличении мощности второго слоя изменяется характер кривой ρ_x в точке минимума, который при больших значениях h_2 становится более пологим («тупой» минимум). Дальнейшее повышение кажущегося сопротивления (после минимума ρ_x) на кривых типа Н вызывается наличием третьего слоя повышенного сопротивления. Истинное значение сопротивления третьего слоя в трехслойной среде может быть оценено по положению нижней асимптотической ветви кривой при достаточно больших разностях цепи AB , аналогично тому как оценивается ρ_2 по двуслойной палетке.

При незначительной мощности второго слоя минимум ρ_x становится менее четким и соответствующие кривые приближаются к кривым двуслойного типа с модулем $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Рассмотрение и сопоставление кривых ρ_k при одинаковых значениях $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ и различных μ_2 и ν_2 показывает, что характер кривых и, в частности, соответствующий минимум и нижняя ветвь кривой ρ_k зависят не только от соотношений $\nu_2 = \frac{h_2}{h_1}$, но и от $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. При этом оказывается, что увеличение или уменьшение мощности и сопротивления второго слоя (в некоторых пределах) практически совершенно не изменяют кривую ρ_k . Таким образом, разрезы с различными ρ_2 и h_2 при условии сохранения постоянства отношения $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$ эквивалентны между собой в смысле распределения потенциалов на поверхности земли. Это положение, называемое принципом эквивалентности S_2 , имеет чрезвычайно существенное значение для интерпретации ВЭЗ и допускает следующее физическое толкование. При малом сопротивлении второго слоя (по сравнению с ρ_1 и ρ_3) направление токовых линий в нем близко к горизонтальному. Проводимость второго слоя в этом направлении (продольная проводимость) пропорциональна мощности второго слоя и обратно пропорциональна его сопротивлению.

Таким образом, принцип эквивалентности S_2 в области его действия не позволяет проводить однозначную интерпретацию трехслойных кривых типа Н и допускает возможность определения с помощью соответствующих палеток лишь величины продольной проводимости второго слоя $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$.

Понятие продольной проводимости того или иного слоя ($S = \frac{h}{\rho}$) имеет большое значение при интерпретации ВЭЗ. Поэтому остановимся несколько подробнее на данном вопросе.

Пусть мы имеем двуслойный разрез с $\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$ и $\rho_2 = \infty$. Для простоты рассмотрим поле одного точечного источника тока A , находящегося на дневной поверхности ($B \rightarrow \infty$). Так как ток распространяется только в первом слое, то на достаточно большом расстоянии от электрода (по сравнению с h_1) линии тока будут параллельны дневной поверхности и соответствующие эквипотенциальные поверхности будут вследствие симметрии представлять систему концентрически расположенных цилиндров (рис. 2).

По закону Ома падение потенциала между двумя цилиндрами с радиусами L и $L + dL$ равно:

$$dV = \rho_1 \frac{I}{2\pi L h_1} dL,$$

где I — сила тока в цепи AB .

Так как значение ρ_k определяется для случая одного электрода A ($B \rightarrow \infty$) по формуле

$$\rho_k = \frac{2\pi L^2}{dL} \cdot \frac{dV}{I},$$

$$\rho_k = \frac{l\rho_1}{h_1} \text{ или } \frac{L}{\rho_k} = \frac{h_1}{\rho_1}$$

Отметив, что величина L может быть отождествлена с величиной полуразносов для цепи $AMNB$, мы получаем, что отношение длины полуразносов $\frac{AB}{2}$ к соответствующему значению кажущегося сопротивления при достаточно больших AB должно быть постоянно и численно равно продольной проводимости S_1 первого слоя.

Действительно, рассмотрение палетки « ρ_2 » показывает, что для случая $\rho_2 = \infty$ соответствующая кривая ρ_k , начиная с $\frac{AB}{2} = 2h_1$, практически представляется в виде прямой линии, наклонной под углом 45° к координатным осям.

Значение продольной проводимости первого слоя может быть определено по любой точке, взятой на этой прямой линии, называ-

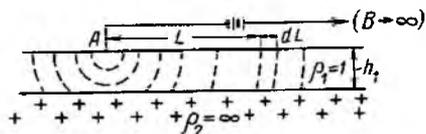


Рис. 2. Характер электрического поля одного точечного источника при двухслойной среде ($\rho_1 = 1 \text{ ом} \cdot \text{м}$ и $\rho_2 = \infty$).

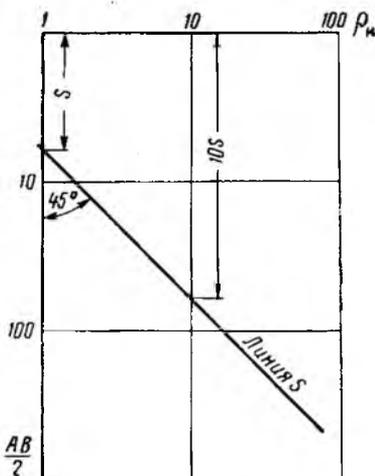


Рис. 3. Графическое определение продольной проводимости S .

емой линией S , в виде отношения ординаты этой точки $\left(\frac{AB}{2}\right)$ к ее абсциссе (ρ_k). Значение S_1 может быть получено так же, как ордината точки пересечения линии S (продолженной вверх) с осью ординат (при значении $\rho_k = 1$). В этом случае (при $\rho_1 = 1$) значение S_1 численно равно мощности первого слоя.

В общем случае, когда ρ_1 не равно единице, значение S определяют по-прежнему, как ординату точки пересечения линии S с осью ординат (при $\rho_k = 1$), а мощность — как ординату точки пересечения линии S с линией, проведенной параллельно оси ординат при $\rho_k = \rho_1$.

Для графического изображения продольной проводимости на бланке графика ВЭЗ необходимо при значении $\rho_k = 1$ отложить по оси ординат величину, численно равную соответствующей величине S , и провести прямую линию под углом 45° к оси ординат (рис. 3).

В том случае, если значение $\rho_k = 1$ находится за пределами чертежа, для построения линии S можно использовать любое значение ρ_k (например, $\rho_k = 10$). В этом случае для получения точки, лежащей на линии S , по оси ординат откладывают соответственно увеличенное в 10 раз значение величины S .

Заметим, что конечная асимптота кривых для случая многослойного разреза при бесконечно большом сопротивлении подстилающего слоя также представляется в виде прямой линии, наклоненной под углом 45° к оси ординат и соответствует линии суммарной продольной проводимости всех слоев, перекрывающих непроводящий горизонт. При этом значение суммарной продольной проводимости равно арифметической сумме продольных проводимостей соответствующих слоев.

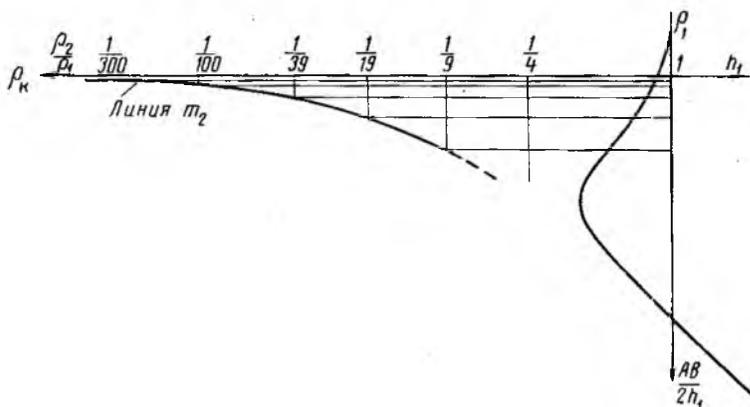


Рис. 4. Определение области эквивалентности трехслойной кривой ВЭЗ типа Н.

Рассмотрим представленную на рис. 4 теоретическую кривую для $\rho_2 = \frac{1}{19}$; $v_2 = \frac{1}{2}$ и $\rho_3 = \infty$ (из палетки Н — $\frac{1}{19} - \infty$). Отметим на бланке точку с абсциссой, равной истинному значению $\rho_2 = \frac{1}{19}$, и ординатой, равной глубине залегания подошвы второго слоя $m_2 = h_1 + h_2 = 1,5$.

Эта кривая хорошо сопоставляется с соответствующими кривыми некоторых других палеток этой же серии. Так, приняв $\rho_2 = \frac{1}{39}$ (палетка Н — $\frac{1}{39} - \infty$), мы можем оценить $m_2 \approx 1,25$; при $\rho_2 = \frac{1}{100}$ (палетка Н — $\frac{1}{100} - \infty$) получим значение $m_2 \approx 1,1$ и т. д.

Если принимать значение ρ_2 большим, чем $\frac{1}{19}$, то, например, при $\rho_2 = \frac{1}{9}$ (палетка Н — $\frac{1}{9} - \infty$) мы получим $m_2 \approx 2,1$, но для

$\rho_2 = \frac{1}{4}$ мы уже не сумеем подобрать кривые (на палетке Н — $\frac{1}{4} - \infty$), достаточно хорошо совмещающиеся с нашей кривой.

Нанеся на диаграмму точки с абсциссами, равными различным принимаемым значениям ρ_2 , и ординатами, равными получаемым при этом значениям m_2 , и соединив эти точки плавной линией, получим кривую для m_2 в зависимости от принимаемых значений ρ_2 .

Глубина залегания третьего слоя для данной кривой в зависимости от принимаемых значений ρ_2 может меняться от $m_2 = h_1$ (при $\rho_2 \rightarrow 0$) и до некоторого предельного значения $m_2 \approx 2,2h_1$ (при $\rho_2 \approx \frac{1}{8}$), Полу-

чаемые при этом предельные значения ρ_2 и h_2 определяют пределы действия принципа эквивалентности S_2 для данной кривой.

Следует отметить, что при определении пределов действия принципа эквивалентности S_2 необходимо задать определенную точность совмещения кривых.

Действительно, если добиваться совмещения кривых с точностью, например до 1% ($\approx 0,3$ мм), то пределы будут значительно сужены.

Однако если мы имеем дело с практическими кривыми, необходимо учитывать, что погрешности полевых измерений достигают 5%; поэтому при установлении пределов применимости принципа эквивалентности мы будем считать кривые практически совмещающимися, если расхождения между ними не превышают 5%.

На рис. 5 совмещены теоретические кривые для постоянных значений $\rho_1 = 1$ и $\rho_3 = \infty$ и переменных ρ_2 и h_2 .

Величина $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$ для всех кривых взята постоянной, равной 9. Рассмотрение этих кривых показывает, что в пределах точности полевых измерений кривые с $\rho_2 \leq \frac{1}{9}$ могут считаться эквивалентными.

Действительно, кривые с $\rho_2 = \frac{1}{39}$; $\frac{1}{100}$ и $\frac{1}{300}$ практически совпадают и могут быть приняты за предельные кривые с $\rho_2 \rightarrow 0$ (при $S_2 = 9$).

Кроме того, оказывается, что наиболее характерным участком кривых, на котором прежде всего отмечается их несовпадение, следует считать минимум ρ_2 .

Поэтому для того чтобы подойти в дальнейшем к определению пределов области действия принципа эквивалентности S_2 , на основании теоретических кривых из соответствующих палеток, нами были составлены в первую очередь диаграммы, представляющие зависимость величины $\frac{\rho_{2\min}}{\rho_1}$ от S_2 для различных $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $v_2 =$

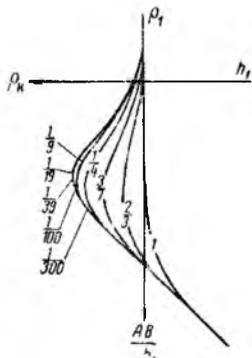


Рис. 5. Трехслойные кривые ВЭЭ типа Н с постоянной величиной продольной проводимости S_2 .

Шифр кривых $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

$= \frac{h_2}{h_1}$. Эти диаграммы составлены для случаев $\rho_3 = \rho_1$ и $\rho_3 = \infty$. Диаграмма для $\rho_3 = \rho_1$ (рис. 6) показывает, что при малых μ_2 и ν_2 соответствующие значения $\frac{\rho_{k\min}}{\rho_1}$ расположены для разных ρ_2 на одной кривой, которую можно принять за предельную кривую ($\rho_2 \rightarrow 0$). Если для какой-либо кривой ρ_k типа Н ($\rho_3 = \rho_1$) величина $\frac{\rho_{k\min}}{\rho_1}$ (при данном S_2) находится на этой предельной линии или отличается от предельного значения не более чем на 5%, то это значит, что заданный разрез может быть заменен эквивалентным разрезом, для которого может быть принято любое сопротивление второго слоя ρ'_2 ($\rho'_2 = \frac{h'_2}{S_2}$), меньше заданного ρ_2 . Если попытаться заданный разрез заменить эквивалентным разрезом, в котором $\rho'_2 > \rho_2$, то окажется, что значение ρ_2 можно увеличить лишь в относительно небольших пределах.

Для получения более четкого представления о тех значениях ρ_2 и h_2 , начиная от которых могут быть получены эквивалентные разрезы при уменьшении сопротивления второго слоя до бесконечно малых значений, нами были построены кривые, изображенные на рис. 7.

Эти кривые представляют геометрические места точек, абсциссы и ординаты которых соответствуют значениям ρ_2 и h_2 трехслойных разрезов типа Н ($\rho_3 = \rho_1$ и $\rho_3 = \infty$), кривые ρ_k для которых отличаются от предельной кривой ($\rho'_2 \rightarrow 0$; $h'_2 \rightarrow 0$; $\frac{h'_2}{\rho'_2} = \text{const}$) не более чем на 5%. Естественно, что при меньших значениях ρ_2 и h_2 соответствующие кривые ρ_k будут отличаться от предельной менее чем на 5%. Уравнение кривых для $\rho_3 = \rho_1$ и $\rho_3 = \infty$ показывает, что с уменьшением ρ_3 пределы применимости принципа эквивалентности уменьшаются. Поэтому, следует полагать, что для значений $\rho_3 < \rho_1$ (но $\rho_3 > \rho_2$) пределы применимости принципа эквивалентности будут еще меньше. К сожалению, мы не имели возможности составить аналогичные диаграммы для случая $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$, так как значения $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ для различных палеток такого типа отличны друг от друга.

Переходя к рассмотрению вопроса о пределах области действия принципа эквивалентности в более общем случае, надлежит определить пределы возможных изменений ρ_2 и h_2 для любого заданного разреза. Для этой цели построена диаграмма, изображенная на рис. 8, которая дает представление о том, насколько можно увеличивать или уменьшать сопротивление второго слоя так, чтобы новые кривые ρ_k отличались (по значениям ρ_k) не более чем на 5% от исходной кривой. Здесь для каждого отношения $\frac{\rho_3}{\rho_1} = \mu_2$, имеющегося на палетках (для $\rho_3 = \rho_1$), вычерчено по две кривые (одна слева, другая справа), которые ограничивают область возможных изменений того исходного сопротивления (ρ_2), к которому относятся эти кривые.

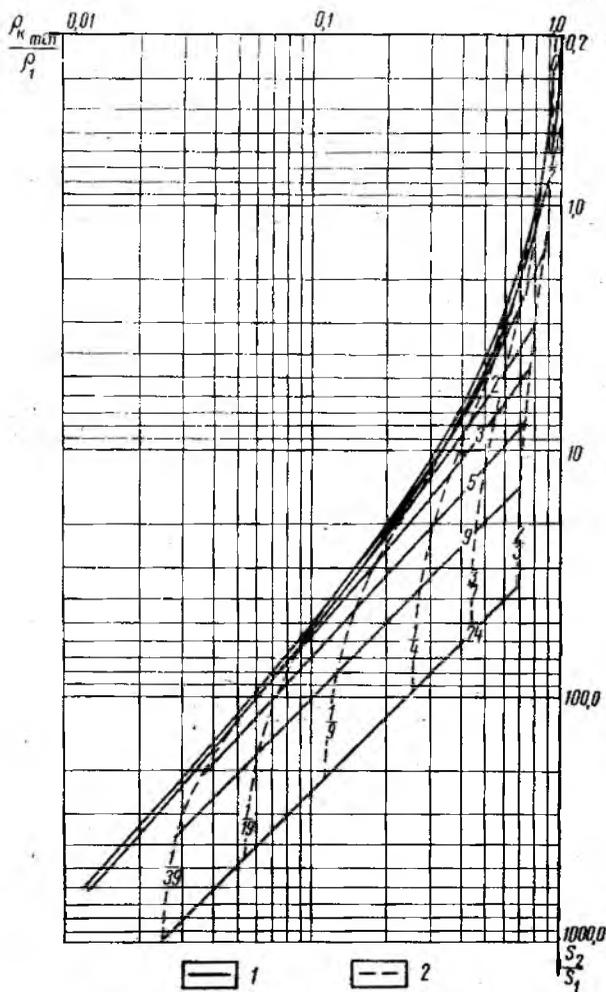


Рис. 6. Диаграмма зависимости $\frac{\rho_{k\min}}{\rho_1}$ от $\frac{S_2}{S_1}$ для трехслойных кривых ВЭЗ типа Н ($\rho_3 = \rho_1$)
 1 — m_2 ; 2 — m_2 .

дает наиболее полное представление о пределах применимости принципа эквивалентности S_2 для кривых типа Н.

Следует заметить, что диаграмма эта может также служить для характеристики той точности, которая может быть получена при

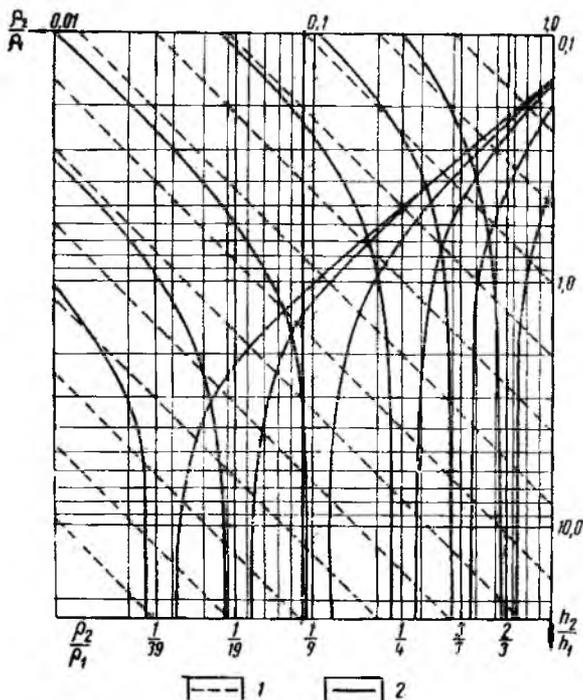


Рис. 8. Диаграмма для оценки пределов эквивалентности трехслойных кривых ВЭЗ типа Н.

1 — линии эквивалентных слоев $\left(\frac{S_2}{S_1}\right)$; 2 — предельные кривые возможных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$.

интерпретации кривых данного типа, если значение истинного ρ_2 неизвестно (например, при интерпретации с помощью номограмм, предложенных А. И. Богдановым) [5].

Кривые типа К и принцип эквивалентности T_2

Кривые данного типа (приложение № 19—24) соответствуют наличию плохо проводящего слоя, заключенного между двумя более проводящими слоями. При малых разностях $\left(\frac{AB}{2} < 0,7 h_1\right)$ значения кажущихся сопротивлений соответствуют сопротивлению первого

слоя. После этого при достаточной мощности второго слоя на кривых ВЭЗ отмечается максимум кажущегося сопротивления, отражающий наличие этого плохо проводящего слоя.

При постоянном значении ρ_2 , чем больше мощность второго слоя, тем больше значение ρ_k в точке максимума приближается к истинному сопротивлению второго слоя. Вместе с тем при увеличении мощности второго слоя изменяется характер кривой кажущегося сопротивления в точке максимума Н,

который становится более пологим («тупой» максимум).

Следует отметить, что сопоставление соответствующих палеток типов Н и К (рис. 9) показывает, что при одинаковых ν_2 значение ρ_k в точке минимума значительно ближе к истинному ρ_2 , по сравнению со значением ρ_k в точке максимума.

Дальнейшее понижение ρ_k (после максимума) на кривых типа К вызывается наличием третьего слоя пониженного сопротивления. Истинное значение его сопротивления (ρ_3), по сравнению с кривыми типа Н, здесь может быть определено при меньших разностях.

При очень малой мощности второго слоя максимум становится менее четким и соответствующие кривые приближаются к кривым двухслойного типа.

Сопоставление кривых ρ_k при одинаковых значениях $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и раз-

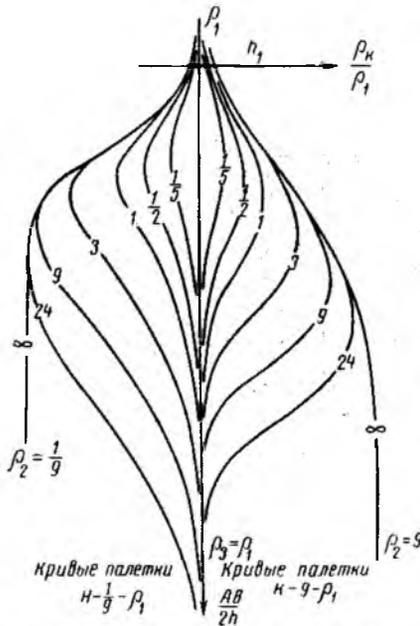


Рис. 9. Сопоставление трехслойных кривых ВЭЗ типа Н и К.

Шифр кривых $\frac{h_2}{h_1}$.

личных μ_2 и ν_2 показывает, что характер кривых и, в частности, соответствующих максимумов и нижних ветвей кривых зависит не только от соотношений ν_2 , но и μ_2 . При этом оказывается, что одновременное уменьшение (или увеличение) мощности второго слоя и увеличение (или уменьшение) его сопротивления (в некоторых пределах) практически совершенно не изменяет кривой.

Таким образом, различные разрезы (различные ρ_2 и h_2) при условии сохранения постоянства произведения $h_2 \cdot \rho_2$, называемого поперечным сопротивлением второго слоя T_2 , эквивалентны между собой в смысле распределения потенциалов на дневной поверхности.

Это положение, называемое принципом эквивалентности T_2 , аналогичное принципу эквивалентности S_2 , также имеет чрезвычайно существенное значение для интерпретации ВЭЗ и допускает следующее физическое толкование.

При высоком сопротивлении второго слоя (по сравнению с ρ_1 и ρ_3), небольшой его мощности v_2 и достаточно больших разностях направлении токовых линий во втором слое будет приближаться к направлению, перпендикулярному границам раздела. Сопротивление, оказываемое прохождению тока через второй слой в этом направлении (поперечное сопротивление), пропорционально мощности второго слоя и его сопротивлению. Поэтому одновременное и одинаковое уменьшение мощности и увеличение сопротивления второго слоя (или увеличение мощности и уменьшение сопротивления), не изменяя его поперечного сопротивления, не отражается в виде соответствующего изменения потенциала на дневной поверхности, а следовательно, и не изменяет форму кривой ρ_* .

Таким образом, принцип эквивалентности T_2 в пределах его действия не позволяет проводить однозначную интерпретацию трехслойных кривых типа К и допускает возможность определения с помощью соответствующих палеток лишь величины поперечного сопротивления второго слоя $T_2 = h_2 \cdot \rho_2$. Для определения глубины залегания третьего слоя необходимо знать сопротивление второго слоя.

Величину T_2 также принято изображать графически.

Если рассматривать двуслойный разрез, в котором второй слой обладает бесконечно малым сопротивлением, то оказывается, что здесь мы не имеем возможности просто и точно определить положение конечной асимптоты кривой ρ_* , как это было для случая $\rho_2 = \infty$. Для случая бесконечно малого сопротивления подстилающего слоя определение поперечного сопротивления перекрывающего слоя (или двух слоев) может быть произведено только с помощью палеток. В частности, для двуслойной среды поперечное сопротивление T определяется как произведение величин h_1 и ρ_1 , определенных с помощью палетки ρ_2 , и для трехслойной среды — как сумма произведений величин $h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2$, определенных с помощью соответствующих палеток типа К.

Тем не менее графическое изображение поперечного сопротивления на бланке графиков ВЭЗ имеет определенный смысл и будет необходимо как для графических построений кривых ρ_* , так и для их интерпретации.

Так как поперечное сопротивление $T = h\rho$, то линия T будет представлять геометрическое место точек, произведение абсцисс ρ которых на их ординаты h постоянно и численно равно T . Для построения линии T достаточно определить положение точки T с абсциссой $\rho = 1$ и ординатой, численно равной T , и провести через нее прямую линию под углом 135° к оси ординат (рис. 10). Произведение абсциссы ρ на ординату h для любой точки, лежащей на этой линии T , дает численное значение величины T .

Нетрудно видеть, что для построения линии T можно использовать точки со значением абсциссы, увеличенной (или уменьшенной) в несколько раз. В этом случае ордината точки, лежащей на линии T , должна равняться численному значению T , уменьшенному (или увеличенному) во столько же раз.

Для получения представления о пределах действия принципа эквивалентности T_2 , рассмотрим представленную на рис. 11 палетку СН — 21 — S [18], на которой собраны кривые для постоянных значений $h = 1$; $\rho_1 = \rho_3 = 1$ и $T_2 = h_2 \rho_2 = 12$. Кривые для весьма

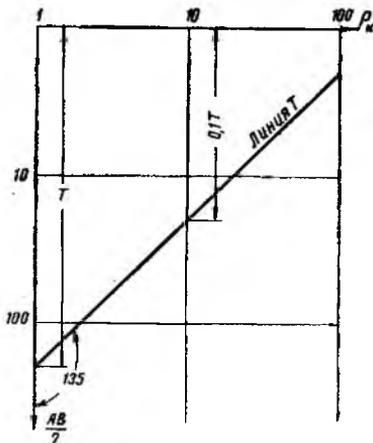


Рис. 10. Графическое определение поперечного сопротивления T .

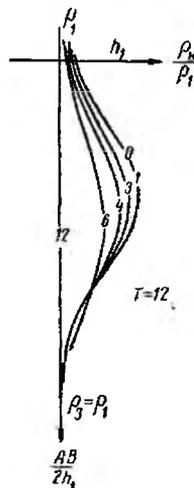


Рис. 11. Трехслойные кривые ВЭЗ типа К с постоянным T .

Шифр кривых $\frac{h_2}{h_1}$.

малых значений ν_2 ($\mu_2 \rightarrow \infty$) и до $\nu_2 = 1$ ($\mu_2 = 12\rho_2$) оказываются практически одинаковыми, т. е. расхождение между значениями ρ_x в точках максимумов не превышает 5%. При дальнейшем увеличении мощности и уменьшении сопротивления второго слоя соответствующие кривые уже значительно отличаются от предельной кривой ($\nu_2 \rightarrow 0$; $\mu_2 \rightarrow \infty$; $T_2 = 12$).

Так как наибольшие расхождения кривых ρ_x отмечаются на участках максимумов, то для изучения вопроса о пределах действия принципа эквивалентности T_2 были составлены диаграммы зависимости $\frac{\rho_{x \max}}{\rho_1}$ от T_2 для различных значений μ_2 и ν_2 (аналогичные соответствующим диаграммам для кривых типа Н).

Пользуясь этими диаграммами, можно построить соответствующие кривые, определяющие пределы действия принципа эквивалентности T_2 для кривых типа К (при $\rho_3 = \rho_1$), которые и приводятся

на рис. 12 и 13. Кривые дают геометрические места точек, абсциссы и ординаты которых соответствуют значениям ρ_2 и h_2 трехслойных разрезов типа К ($\rho_3 = \rho_1$ и 0). Соответствующие кривые ρ_2 отличаются от предельной кривой на 5%. При меньших же значениях ρ_2 и h_2 соответствующие кривые ρ_2 будут, естественно, отличаться от предельной меньше, чем на 5%. Составление предельных кривых для $\rho_3 = 0$ и $\rho_3 = \rho_1$ показывает, что с увеличением ρ_3 пределы принципа эквивалентности T_2 уменьшаются. Сравнение же предельных кривых для принципов эквивалентности S и T_2 показывает, что последний применим в более широких пределах.

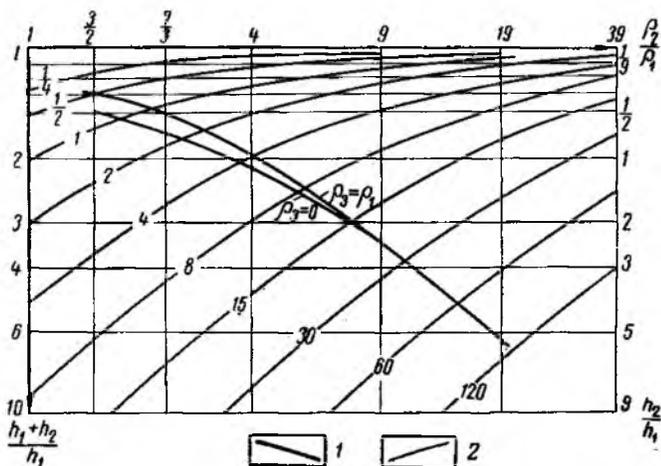


Рис. 12. Характеристика области эквивалентности трехслойного разреза типа К.

1 — предельная кривая для принципа эквивалентности T_2 ; 2 — линии равных T_2 . Шифр кривых $\frac{T_2}{T_1}$.

Кривые, представленные на рис. 13, позволяют оценить, насколько можно увеличивать или уменьшать сопротивление второго слоя (по соответствующей линии T_2) так, чтобы расхождение кривых ρ_2 для минимально и максимально возможных ρ_2 и исходной кривой не превышало 5%.

Пользоваться этой диаграммой нужно так же, как это было уже описано выше, при рассмотрении подобной диаграммы для кривых типа Н. Например, если мы имеем кривую ρ_2 для $\mu_2 = 4$ и $\nu_2 = 2$, то, согласно диаграмме на рис. 13, мы можем сопротивление ρ_2 увеличить до $6,2\rho_1$, уменьшая при этом h_2 до $1,3h_1$, или уменьшать ρ_2 до $3\rho_1$, увеличивая h_2 до $2,7h_1$. При этом кривые для этих предельных значений ρ_2 будут отличаться от исходной кривой не более чем на 5%.

Заметим, что эта диаграмма также может служить для оценки точности интерпретации кривых типа К, когда истинное значение ρ_2 неизвестно.

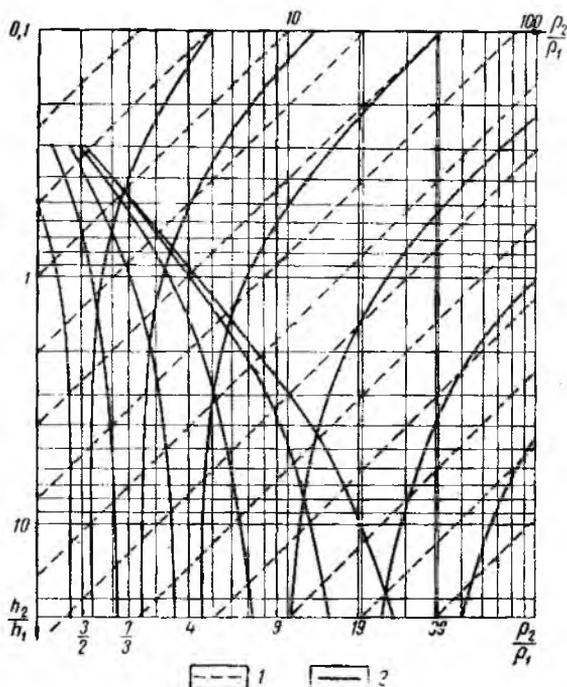


Рис. 13. Диаграмма для оценки пределов эквивалентности трехслойных кривых ВЭЗ типа К.
1 — линии эквивалентных слоев (T_2); 2 — предельные кривые возможных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$.

Кривые типа Q и принцип эквивалентности T_2

Кривые данного типа (приложение № 10—18) соответствуют наличию в разрезе постепенно уменьшающихся с глубиной сопротивлений ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$).

Значения кажущихся сопротивлений при $\frac{AB}{2} < 0,2h_1$ здесь также соответствуют сопротивлению первого слоя. Дальнейшее понижение кажущегося сопротивления определяется влиянием второго слоя, и при достаточно большой его мощности ($v_2 = 24; 9; 5$) на кривой ρ_k имеется характерный участок ее перегиба, при значениях ρ_k близких к истинному ρ_2 .

После этого перегиба кривая ρ_k уже при сравнительно небольших AB приближается асимптотически к ρ_3 . Чем меньше мощность вто-

рого слоя, тем перегиб, характеризующий наличие этого слоя, становится менее четким, и при $h_2 < h_1$ соответствующие кривые (особенно при малых μ_2) почти не отличимы от двуслойной кривой (для случая $h_2 = 0$). Действительно, представленная на рис. 14 трехслойная кривая данного типа (из палетки $Q - \frac{1}{9} - \rho_2^2$), несмотря на то, что мощность второго слоя в два раза больше мощности первого слоя, по внешнему виду очень похожа на кривую двуслойного типа (при $\rho_1 = 1$ и $\rho_2 = \frac{1}{81}$), и лишь непосредственное сопоставление палетки ρ_2 с этой кривой дает возможность утверждать наличие второго слоя с промежуточным значением сопротивления. Если совмещать палетку ρ_2 с верхней частью данной кривой, то окажется, что нижняя ветвь последней будет расположена ниже и правее соответствующей двуслойной кривой (верхняя пунктирная кривая). Если же добиваться совмещения палетки ρ_2 с нижней частью кривой, то окажется, что верхняя ветвь последней будет расположена левее и выше соответствующей двуслойной кривой (нижняя пунктирная кривая). Такое сопоставление, дающее возможность обнаружить наличие слоя с промежуточным значением сопротивления при небольшой его мощности, широко применяется в практике интерпретации.

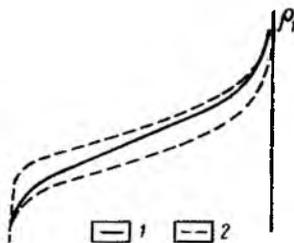


Рис. 14. Трехслойная кривая ВЭЗ типа Q.

1 — кривая типа Q для $\mu = \frac{1}{9}$
и $\nu = 2$, $\rho_2 = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2$; 2 — двуслойные кривые ВЭЗ.

Взаимное сопоставление трехслойных кривых данного типа (для $\rho_3 = 0$) показало, что принцип эквивалентности в том виде, как это давалось выше для кривых типа Н и К, к данным кривым не применим. Кроме того, оказалось, что характерные участки кривых, на которых последние начинают различаться между собой, соответствуют различным ординатам $\frac{AB}{2h_1}$ в зависимости от μ_2 и ν_2 .

Поэтому, для получения представления о пределах области действия принципа эквивалентности для кривых типа Q и о характере взаимной связи между одновременными изменениями μ_2 и ν_2 для эквивалентных слоев были построены диаграммы одинаковых значений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ (для ряда значений $\frac{AB}{2h_1}$) в зависимости от μ_2 и ν_2 , при $\rho_3 = 0$.

Далее, на основании этих диаграмм были получены кривые (рис. 15), дающие необходимые представления о принципе эквивалентности для кривых типа Q и пределах его применимости.

Кривые эквивалентных слоев на рис. 15 дают примерное представление о том, как нужно одновременно изменять ρ_2 и h_2 , чтобы разрезы оставались эквивалентными. Рассмотрение этих кривых

показывает, что для кривых типа Q с некоторым приближением применим принцип эквивалентности T_2 . При этом оказалось, что для получения практически одинаковых кривых необходимо при изменении ρ_2 изменять одновременно h_2 в несколько меньшее число раз. При больших величинах отношения $\frac{h_2}{h_1}$, наоборот, мощность h_2 должна изменяться в несколько большее число раз, по сравнению с изменением ρ_2 .

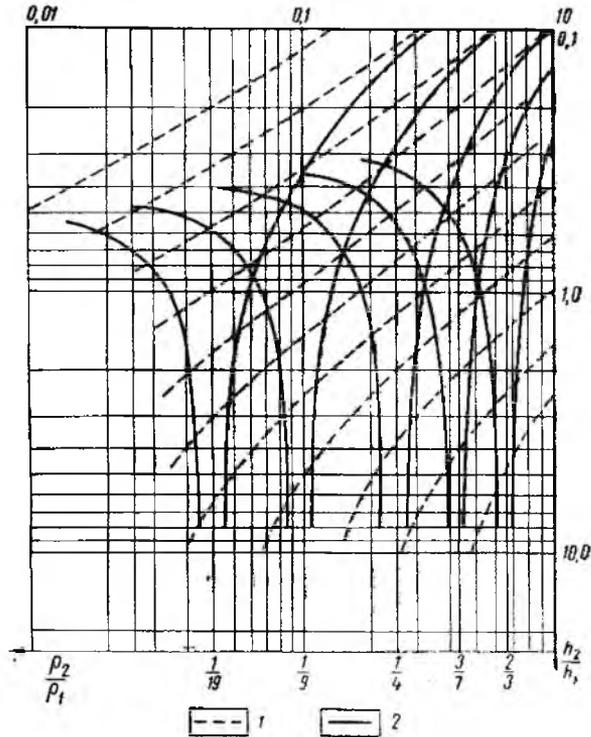


Рис. 15. Диаграмма для оценки пределов эквивалентности трехслойных кривых ВЗЗ типа Q.

1 — линии эквивалентных слоев; 2 — предельные кривые возможных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$.

Разумеется, что такие изменения сопротивления и мощности второго слоя (в соответствии с кривыми эквивалентных слоев) можно производить только в пределах области действия принципа эквивалентности.

Для получения представления об этих пределах на рис. 15 даны, кроме того, кривые возможных изменений ρ_2 для значений

$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{19}; \frac{1}{9}; \frac{1}{4}; \frac{3}{7}; \frac{2}{3}$ и для различных $\frac{h_2}{h_1}$. Эти кривые также не должны расходиться с исходной кривой по значениям ρ_x не более чем на 5%.

Например, пользуясь этими предельными кривыми, можно установить, что если взять разрез с $\mu_2 = \frac{1}{9} \approx 0,11$ и $\nu_2 = \frac{3}{2}$, то можно уменьшать ρ_2 до $0,09\rho_1$, увеличивая при этом, согласно кривой эквивалентного слоя, h_2 до $1,8h_1$, или увеличивать ρ_2 до $0,13\rho_1$, уменьшая h_2 до $1,25h_1$. Кривые ρ_x для этих предельных значений ρ_2 и h_2 будут отличаться от исходной кривой не более чем на 5%.

Из рассмотрения этих предельных кривых видно, что область действия принципа эквивалентности для кривых типа Q значительно меньше, чем для кривых типа H и K. Действительно, здесь кривые ρ_x становятся мало отличимыми друг от друга лишь при очень малых значениях ν_2 , когда они становятся одновременно мало отличимыми от соответствующих двуслойных кривых. Лишь в этом случае изменение ρ_2 в больших пределах дает кривые, совпадающие с исходной кривой с точностью до 5%. При несколько больших ν_2 кривые ρ_x будут различаться уже больше, чем на 5%, даже при небольших изменениях ρ_2 .

При помощи данной диаграммы можно также оценивать погрешность при интерпретации кривых типа Q, если не известно истинное значение ρ_2 .

Кривые типа A и принцип эквивалентности S_2

Кривые данного типа (приложение 2, листы 25—29) соответствуют наличию в разрезе постепенно увеличивающихся с глубиной сопротивлений ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$).

При $\frac{AB}{2} < 0,7h_1$ значения ρ_x соответствуют значению ρ_1 . Дальнейшее повышение кажущегося сопротивления соответствует влиянию второго слоя, и при достаточно большой его мощности ($\nu_2 = 24$) на кривой ρ_x имеется характерный участок ее «перегиба» при значениях, близких к истинному ρ_2 . Дальнейшее увеличение ρ_x (после перегиба) характеризует уже влияние третьего слоя высокого сопротивления. Однако кривая ρ_x достигает истинных значений ρ_3 лишь при достаточно больших разносах. Чем меньше мощность второго слоя, тем перегиб, характеризующий наличие этого слоя, становится менее четким, и при $h_2 < 2h_1$ соответствующие кривые почти не отличаются от двуслойной кривой (с модулем $\frac{\rho_2}{\rho_1}$). В ряде случаев (при больших μ_2 и малых ν_2), несмотря на внешнее сходство кривых рассматриваемого типа с двуслойными кривыми, сопоставление с палеткой ρ_2 позволяет установить наличие промежуточного слоя. Сопоставление кривых этого типа с кривыми типа Q (рис. 16) показывает, что при одинаковых значениях ν_2 «перегибы» на кривых типа Q выражены значительно более четко, чем на кривых типа A.

Это обстоятельство позволяет отнести разрезы типа Q в общем случае к более благоприятным для применения электроразведки, по сравнению с разрезами типа A. Выше мы указывали, что при большом сопротивлении подстилающего слоя (по отношению к ρ_1 и ρ_2) положение нижней асимптоты многослойной кривой зависит от величины суммарной продольной проводимости перекрывающих

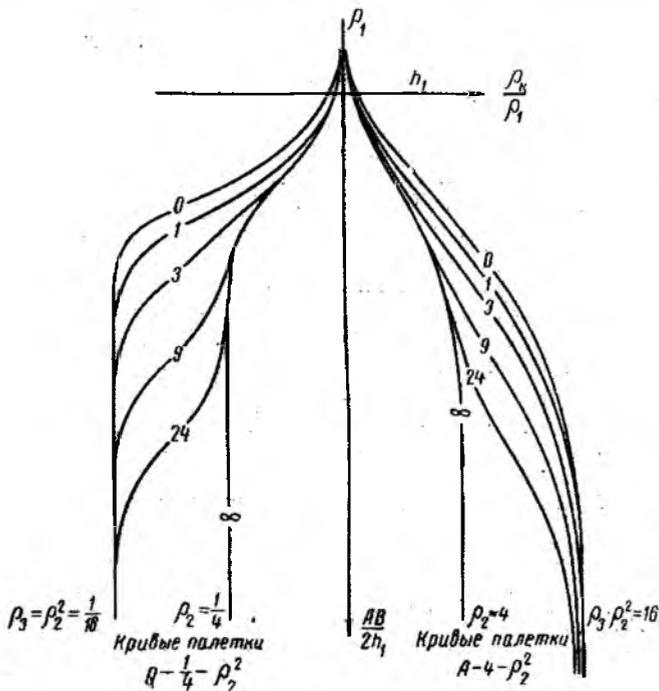


Рис. 16. Сооставление трехслойных кривых ВЭЗ типа Q и A.

Шифр кривых $\frac{h_2}{h_1}$.

слесов и, в частности, при бесконечно большом сопротивлении подстилающего слоя нижняя асимптота просто соответствует линии $S_{1,2}$.

Это правило относится и к разрезам данного типа. Поэтому, говоря о принципе эквивалентности для кривых типа A, следует сразу отметить, что практически одинаковые кривые могут быть получены лишь при условии постоянства ρ_1 , h_1 и ρ_3 и продольной проводимости второго слоя $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$. Эмпирические исследования кривых данного типа, выполненные нами для случая $\rho_2 = \infty$, позволили составить аналогичную рассмотренным выше диаграмму, характеризующую пределы применимости для них принципа экви-

валентности (рис. 17). Линиями эквивалентных слоев здесь являются линии продольных проводимостей S_2 ; значения которых и определяют взаимные изменения ρ_2 и h_2 .

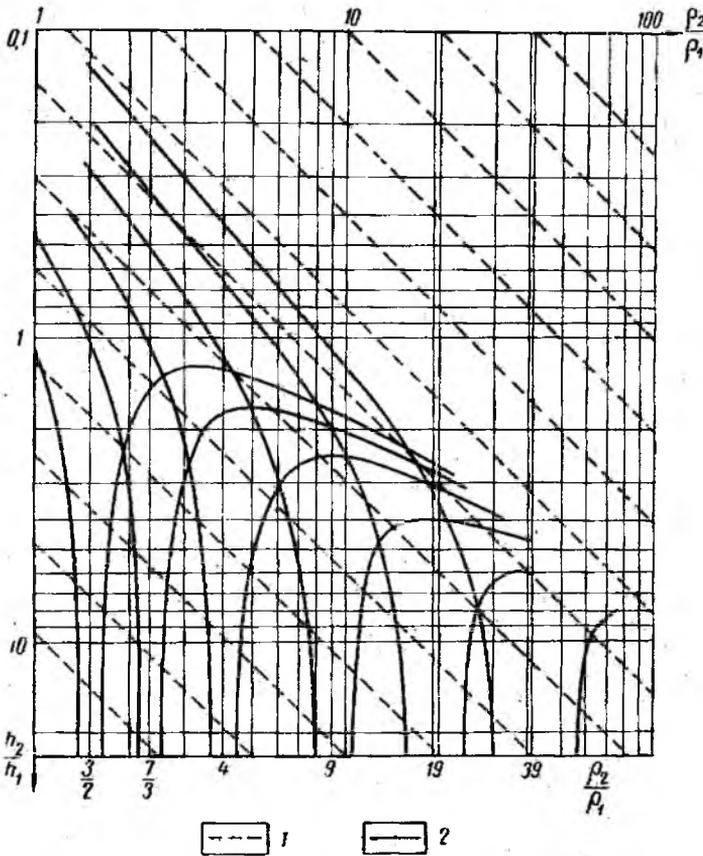


Рис. 17. Диаграмма для оценки пределов эквивалентности трех-
слойных кривых ВЭЗ типа А.

1 — линии эквивалентных слоев $\left(\frac{S_2}{S_1}\right)$; 2 — предельные кривые возмож-
ных изменений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{h_2}{h_1}$.

Например, если задан разрез типа А с $\mu_2 = 9$ и $\nu_2 = 2$, то, согласно соответствующим предельным кривым, можно установить, что в пределах применимости принципа эквивалентности можно (вдоль линии $\frac{S_2}{S_1} = 0,22$) уменьшать ρ_2 до $2,3 \rho_1$ с одновременным уменьшением h_2 до $0,5 h_1$, или увеличивать ρ_2 до $19 \rho_1$ с увеличением h_2 до $4 h_1$. При этом новые кривые ρ_2 для $\rho_2 = 2,3 \rho_1$ и $\rho_2 = 19 \rho_1$

(при $S = 0,22$) будут отличаться от заданной кривой по значениям ρ_x не более чем на 5%.

Рассмотрение этой диаграммы показывает, что чем больше сопротивление второго слоя и чем меньше его продольная проводимость, тем область возможных изменений ρ_2 и h_2 , соответствующая области применимости принципа эквивалентности, становится больше.

Следует отметить, что эта диаграмма, подобно рассмотренным выше, может служить также для характеристики той точности, которая может быть получена при интерпретации кривых данного типа, если значение истинного ρ_2 нам неизвестно.

Общие понятия об эквивалентных разрезах

В данном разделе была дана характеристика принципа эквивалентности для кривых трехслойного типа. При этом, говоря об эквивалентных разрезах, мы подразумевали, что ρ_1 , h_1 и ρ_3 остаются неизменными, а происходит лишь одновременное изменение сопротивления и мощности второго слоя.

Эквивалентность трехслойных разрезов с точки зрения возможности изменения других параметров (например ρ_3) мы не рассматривали, поскольку она является условной. Действительно, если взять

достаточно большие размеры установки $\left(\frac{AB}{2h_1}\right)$, то нижние асимптотические ветви кривой ρ_x , по крайней мере при конечных значениях ρ_3 , будут во всех случаях достаточно четко характеризовать ρ_3 .

В этом отношении несколько больший интерес представляет, например, определение пределов применимости соответствующих принципов эквивалентности в зависимости от отношения продольной проводимости второго слоя — S_2 (или T_2), к продольной проводимости первого слоя — S_1 (или T_1). В частности, трехслойные разрезы при малых S_2 (или T_2) по сравнению с S_1 (или T_1) становятся эквивалентными двуслойным разрезам, т. е. соответствующие трехслойные кривые в этом случае совпадают с двуслойными кривыми с модулем, равным $\frac{\rho_3}{\rho_1}$. Такой подход к оценке применимости принципа эквивалентности целесообразно применить и для четырехслойных и многослойных кривых.

Ниже будут показаны некоторые другие примеры эквивалентных разрезов как двуслойных, так и многослойных (замена анизотропного слоя эквивалентным ему изотропным слоем и т. п.).

В связи с этим понятие о принципе эквивалентности может быть дано в более общем виде, и описанные в настоящем разделе принципы эквивалентности S_2 и T_2 следует рассматривать как один из частных случаев эквивалентности трехслойных разрезов, где только второй слой заменяется другим, эквивалентным ему слоем. Поэтому в общем случае эквивалентными разрезами следует называть такие разрезы,

которые дают практически одинаковые кривые ρ_{Σ} (с точностью до 5%) вне зависимости от того, какие параметры в этих разрезах отличаются между собой.

§ 3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО АНИЗОТРОПИИ

Основные определения

При расчете теоретических диаграмм ВЭЗ принято, что отдельные слои, слагающие разрез, по своему удельному сопротивлению однородны и изотропны. Однако в процессе проведения полевых работ электроразведчику, особенно при работе в условиях развития осадочных пород, очень часто приходится иметь дело с анизотропными образованиями, представленными в виде чередующихся однородных и изотропных пластов, относительно небольшой мощности и различного сопротивления. При этом целая свита таких пластов отражается иногда на кривых ВЭЗ в виде лишь одного электрического горизонта.

Наиболее характерная особенность анизотропных пород, которую необходимо учитывать при интерпретации материалов электроразведки, — это различие сопротивлений таких пород в зависимости от направления прохождения тока. Сопротивление таких пород при прохождении тока вдоль плоскости напластования (продольное сопротивление) всегда меньше сопротивления току, проходящему вкост напластования (поперечное сопротивление). В качестве электрической характеристики анизотропной породы, помимо продольного ρ_l и поперечного ρ_n сопротивлений, даются обычно среднее квадратичное сопротивление ρ_m и коэффициент анизотропии λ , связанные между собой следующими соотношениями:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_n}$$

и

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}} = \frac{\rho_n}{\rho_m} = \frac{\rho_m}{\rho_l}$$

Представим себе анизотропную среду в виде свиты, состоящей из двух чередующихся однородных изотропных пропластков с сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 и мощностями Δh_1 и Δh_2 . Вырежем в этой свите прямоугольный параллелепипед с площадью, равной единице, и высотой, равной $h_1 + h_2 = \Sigma \Delta h_1 + \Sigma \Delta h_2$, так, чтобы боковые грани его были перпендикулярны плоскостям напластования. Тогда удельное продольное сопротивление свиты определится, исходя из закона Кирхгофа для параллельных проводников:

$$\rho_l = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}$$

Аналогично, используя закон Кирхгофа для последовательно соединенных проводников, можно определить удельное поперечное сопротивление этой анизотропной среды:

$$\rho_n = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2}.$$

Отсюда могут быть определены коэффициент анизотропии:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} = \sqrt{\frac{(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2) \left(\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \right)}{h_1 + h_2}},$$

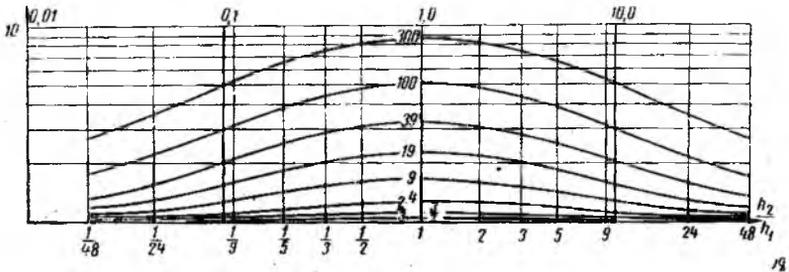


Рис. 18. Значения коэффициентов анизотропии для различных v_2 и μ_2 .

и среднее квадратичное сопротивление этой среды:

$$\rho_m = \sqrt{\frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}}.$$

На рис. 18 даны вычисленные по этим формулам для анизотропной среды, состоящей из чередующихся между собой двух пород, значения коэффициента анизотропии в зависимости от $v_2 = \frac{h_2}{h_1}$. Индексы, стоящие у каждой кривой, соответствуют значениям $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$, постоянным для каждой кривой.

Рассмотрение этой диаграммы показывает, что при постоянном значении μ_2 величина λ во всех случаях достигает максимального значения при $v_2 = 1$, и она не меняется при замене v_2 на $\frac{1}{v_2}$. При постоянных же значениях v_2 величина коэффициента анизотропии увеличивается с увеличением μ_2 . Нетрудно показать также, что при постоянном v_2 замена μ_2 на $\frac{1}{\mu_2}$ также не изменяет значения λ .

Аналогичная методика определения ρ_t , ρ_n , ρ_m и λ может быть применена к анизотропной свите, представленной целым рядом различных по сопротивлению изотропных и анизотропных пластов, чередующихся между собой.

Примеры анизотропных образований

Под микроанизотропией породы обычно принимают анизотропию, связанную с чередованием весьма маломощных пластов различного сопротивления (сланцы, мергели и т. п.). В частности, в условиях проведения электроразведочных работ методом ВЭЗ понятие микроанизотропии мы будем относить к анизотропным породам, представленным чередованием пастолько маломощных пластов различного сопротивления, что каждый из них не отмечается ни на графике ВЭЗ, ни на соответствующей каротажной диаграмме кажущегося сопротивления (КС), снятой стандартным зондом в масштабе 1 : 200 и мельче. Вся порода по сопротивлению отмечается на этой диаграмме как электрически однородная среда.

Понятие макроанизотропии относится обычно к свите, представленной в виде чередующихся изотропных пластов различного сопротивления и такой мощности, что на соответствующей диаграмме выделяются пласты, а на диаграмме ВЭЗ вся свита отражается в виде лишь одного электрического горизонта. Последнее условие зависит от глубины залегания свиты. Пласты, не выделяющиеся на большой глубине, при неглубоком залегании свиты могут быть отмечены и выявлены по графику ВЭЗ как самостоятельные электрические горизонты и введение поправки за макроанизотропию в этом случае не требуется.

Для определения средних сопротивлений и величин, характеризующих свойства макроанизотропии свиты, необходимо знать мощности и сопротивления отдельных пластов, составляющих эту свиту. Аналогично тому, как это делалось выше для случая чередования двух пород, для определения среднего для свиты продольного сопротивления необходимо сначала просуммировать продольные проводимости для каждого пласта:

$$\sum_1^n S_i = \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}$$

Средняя для свиты продольная проводимость может быть получена как отношение суммы продольных проводимостей всех пластов к их суммарной мощности. Величина, обратная средней продольной проводимости, будет соответствовать среднему для свиты продольному сопротивлению:

$$\rho_f = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}}$$

Аналогичным образом среднее для свиты поперечное сопротивление определяется как отношение суммы поперечных сопротивлений всех пластов к суммарной их мощности:

$$\rho_n = \frac{\sum_1^n h_i \rho_i}{\sum_1^n h_i}.$$

Отсюда могут быть найдены значения среднего квадратичного сопротивления (ρ_m) свиты и коэффициента макроанизотропии λ_m .

$$\rho_m = \sqrt{\frac{\sum_1^n h_i \rho_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}}}; \quad \lambda_m = \frac{\sqrt{\sum_1^n h_i \rho_i \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}}}{\sum_1^n h_i}.$$

В случае если каждый пласт, входящий в анизотропную свиту со свойствами макроанизотропии, обладает, кроме того, собственной микроанизотропией, вводится понятие общей анизотропии. Для получения характеристики свиты, обладающей свойствами общей анизотропии, также требуется предварительное определение суммарных продольной проводимости и поперечного сопротивления свиты. При этом вследствие наличия собственной микроанизотропии в выражение для $\sum_1^n S_i$ и $\sum_1^n T_i$ должны подставляться соответственно значения продольного и поперечного сопротивлений для каждого пласта:

$$\sum_1^n S_i = \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{i_i}}; \quad \sum_1^n T_i = \sum_1^n h_i \rho_{n_i};$$

отсюда определяются средние для свиты ρ_n и ρ_i :

$$\rho_i = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{i_i}}}; \quad \rho_n = \frac{\sum_1^n h_i \rho_{n_i}}{\sum_1^n h_i}$$

и, наконец, среднее для свиты значение ρ и коэффициента общей анизотропии λ :

$$\rho_m = \sqrt{\frac{\sum_1^n h_i \rho_{n_i}}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{i_i}}}};$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{\sum_1^n h_i \rho_{m_i} \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{t_i}}}}{\sum_1^n h_i} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{\sqrt{\sum_1^n h_i \rho_m \lambda_{\mu_i} \sum_1^n \frac{h_i \lambda_{\nu_i}}{\rho_{m_i}}}}{\sum_1^n h_i}.$$

В частном случае, если коэффициенты микроанизотропии для всех пластов могут быть приняты одинаковыми, вынося последние за знак суммы, получим:

$$\lambda = \lambda_{\mu} \frac{\sqrt{\sum_1^n h_i \rho_{m_i} \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{m_i}}}}{\sum_1^n h_i}.$$

Замечая, что дробь, стоящая в правой части этого уравнения, соответствует значению коэффициента анизотропии для рассмотренного выше случая макроанизотропии, получим, что коэффициент общей анизотропии равен произведению коэффициентов микроанизотропии и макроанизотропии $\lambda = \lambda_{\mu} \lambda_m$.

В общем случае, когда коэффициенты микроанизотропии для различных пластов не постоянны, можно ввести понятие о среднем для всей свиты коэффициенте микроанизотропии и определять его как отношение общей анизотропии к макроанизотропии.

Таким образом, для определения всех величин, характеризующих общую анизотропию свиты, необходимо знать мощность, среднее квадратичное сопротивление (или ρ_i или ρ_m), коэффициенты микроанизотропии для всех пластов, составляющих данную свиту, и коэффициент макроанизотропии свиты.

Парадокс анизотропии

Теоретические исследования электрического поля при прохождении тока в анизотропной среде [32, 33] показывают, что при измерении сопротивления обычной четырехэлектродной установкой, расположенной параллельно плоскости напластований, величина получаемого кажущегося продольного сопротивления равна среднему сопротивлению ρ_m этой среды. В том же случае, если четырехэлектродная установка расположена перпендикулярно плоскости напластований, величина получаемого кажущегося сопротивления ρ_{μ} равна удельному продольному сопротивлению ρ_i анизотропной среды. Таким образом, при измерении сопротивления анизотропной среды потенциальным методом величина кажущегося поперечного сопротивления в λ раз меньше кажущегося продольного сопротивления, в то время как истинное поперечное сопротивление в λ^2 раз больше истинного продольного сопротивления. Этот вывод, носящий

название парадокса анизотропии, имеет чрезвычайно важное значение для интерпретации данных электроразведки и хорошо подтверждается на практике.

Соответствующее физическое объяснение явления парадокса анизотропии может быть дано в следующем виде: пусть мы имеем анизотропную свиту, представленную чередованием весьма маломощных (по сравнению с размерами установки AB) пластов различного сопротивления, причем плоскости напластований перпендикулярны дневной поверхности, а установка расположена перпендикулярно плоскостям напластования. Вследствие того, что истинное сопротивление анизотропной среды всегда меньше истинного поперечного сопротивления, распределение тока вокруг точечного электрода будет отличо от распределения тока для случая изотропной среды. В частности, плотность тока увеличится в направлении напластований и уменьшится в направлении, перпендикулярном плоскости напластований (например, в центре установки). Уменьшение плотности тока в центре установки и связанное с ним уменьшение градиента потенциала вызовут уменьшение кажущегося сопротивления, замеренного в направлении, перпендикулярном напластованию ρ_{κ_1} , и увеличение его при замере в направлении, параллельном плоскости напластования ρ_{κ_2} .

Следует отметить также еще один весьма важный вывод из теоретических исследований, касающийся возможности использования палеток, рассчитанных для изотропных слоев, при работе в условиях развития анизотропных пород. Так, если в двуслойном разрезе первый слой представлен анизотропными породами с горизонтальным напластованием, то, согласно парадоксу анизотропии, значения ρ_{κ} при малых разносах будут соответствовать среднему квадратичному сопротивлению первого слоя.

При оценке же мощности первого слоя с помощью палетки ρ_2 оказывается, что мы получим некоторую фиктивную мощность, равную произведению истинной мощности первого слоя на его коэффициент анизотропии. Это обстоятельство позволяет указать на простой метод определения коэффициента анизотропии как отношения фиктивной мощности первого слоя (по данным ВЭЗ) к истинной его мощности (по данным буровой скважины). Это правило распространяемо и на многослойные разрезы с анизотропными слоями. При этом, если с помощью соответствующих палеток может быть произведена однозначная оценка ρ и h анизотропного слоя, то оказывается, что мы и здесь получим среднее квадратичное сопротивление данного слоя и его истинную мощность, увеличенную на коэффициент анизотропии.

Треугольник анизотропии

Выше были даны понятия о продольной проводимости изотропного пласта, его поперечном сопротивлении и о способе графического изображения этих величин.

Если для изотропного пласта значения $S = \frac{h}{\rho}$ и $T = h\rho$ известны, то совместным решением этих двух уравнений могут быть определены значения ρ и h в зависимости от S и T :

$$\rho = \sqrt{\frac{T}{S}} \quad \text{и} \quad h = \sqrt{TS}.$$

Значения ρ и h могут быть найдены также графически методом соответственно как абсцисса и ордината точки пересечения линии S и T , так как эта точка и определяет те значения ρ и h , при которых уравнения для S и T решаются совместно.

Разберем теперь случай наличия двух изотропных слоев с сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 и мощностями соответственно h_1 и h_2 (простейший случай анизотропии). Как известно, суммарная продольная проводимость этих двух слоев определится как

$$S_{1,2} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}$$

и суммарное поперечное сопротивление:

$$T_{1,2} = h_1\rho_1 + h_2\rho_2.$$

Из этих уравнений определяются средние для этих двух слоев продольное и поперечное сопротивления:

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} = \frac{h_1 + h_2}{S_{1,2}}$$

и

$$\rho_n = \frac{h_1\rho_1 + h_2\rho_2}{h_1 + h_2} = \frac{T_{1,2}}{h_1 + h_2},$$

а также среднее квадратичное сопротивление и коэффициент анизотропии:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} = \sqrt{\frac{T_{1,2}}{S_{1,2}}}$$

и

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} = \frac{\sqrt{T_{1,2} S_{1,2}}}{h_1 + h_2}$$

или

$$\lambda(h_1 + h_2) = \sqrt{T_{1,2} S_{1,2}}.$$

Таким образом, совместное решение уравнений для $S_{1,2}$ и $T_{1,2}$ дает возможность в случае двух слоев определить среднее (квадратичное) их сопротивление ρ_m и произведение их суммарной мощности на коэффициент анизотропии.

При графическом решении уравнений (рис. 19) точку A пересечения линий $S_{1,2}$ и $T_{1,2}$ называют точкой анизотропии. Абсцисса

этой точки A будет соответствовать величине ρ_m и ордината — величине $(h_1 + h_2) \lambda$.

Для определения ρ_i и ρ_n могут быть использованы соответствующие уравнения, дающие значения ρ_i в зависимости от $S_{1,2}$ и $h_1 + h_2$ и ρ_n в зависимости от $T_{1,2}$ и $h_1 + h_2$. Если на рис. 19 провести линию $h_1 + h_2$, то значение среднего продольного сопротивления ρ_n будет получено как абсцисса точки H пересечения линий $S_{1,2}$ и $h_1 + h_2$ и значение среднего поперечного сопротивления ρ_n как абсцисса точки пересечения линий $T_{1,2}$ и $h_1 + h_2$.

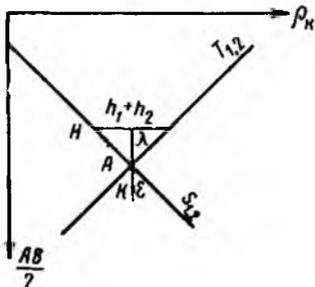


Рис. 19. Графическое определение точки анизотропии A .

Величина коэффициента анизотропии может быть получена как отношение ординаты точки A к ординате, равной $h_1 + h_2$, или, так как график дается в логарифмическом масштабе, непосредственно, как высота равнобедренного треугольника, образованного линиями $S_{1,2}$, $T_{1,2}$ и $h_1 + h_2$. Этот треугольник носит название треугольника анизотропии. Такая же методика аналитического и графического определения величин ρ_n , ρ_i , ρ_m и λ может быть применена к свите, представленной чередованием многих слоев различного сопротивления и мощности. При этом, если отдельные слои обладают, кроме того, свойствами микроанизотропии, при суммировании продольных проводимостей и поперечных сопротивлений отдельных слоев должны быть взяты соответственно значения продольного и поперечного сопротивлений для каждого слоя:

$$\sum_1^n S = \sum_1^n \frac{h_i}{\rho_{i_i}} \text{ и } \sum_1^n T = \sum_1^n h_i \rho_{n_i}$$

§ 4. ПРИЕМЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ

Общие положения

Построение трехслойных, а также многослойных кривых графическим методом сводится к весьма несложным операциям, в то время как получение этих кривых расчетным путем требует применения счетных машин. В то же время сравнение кривых, рассчитанных и построенных графически, показывает, что погрешности при графических построениях могут достигать иногда на отдельных участках кривой 5—10%. Учитывая, что в практической работе нам приходится иметь дело с кривыми ВЭЗ, полученными примерно с такими же погрешностями, следует считать, что графические приемы построений могут найти широкое применение в практике интерпретации полевых данных, для выяснения применимости метода ВЭЗ в тех или иных условиях и т. п. Кроме того, приемы графических

построений представляют большую практическую ценность в том отношении, что позволяют более обоснованно подойти к вопросу интерпретации многослойных кривых с помощью трехслойных палеток.

В связи с этим, для каждого электроразведчика, производящего самостоятельно полевые работы, необходимо знать приемы графических построений. Этим объясняется и та детальность, с которой описываются ниже приемы графических построений.

Рассмотрение теоретических трехслойных кривых показывает, что начальная (верхняя) и конечная (нижняя) асимптоты могут быть легко совмещены с соответствующими кривыми палетки ρ_2 . Это дало повод, с одной стороны, к попытке использования палетки ρ_2 для интерпретации многослойных кривых и, с другой стороны, — к разработке приемов упрощенного построения трехслойных кривых с помощью палетки ρ_2 . Приемы графических построений трехслойных кривых слагаются из следующих операций.

1. Построение верхней ветви с помощью палетки ρ_2 (при соответствующем модуле μ_2). При этом пренебрегают влиянием третьего слоя, т. е. считают мощность второго слоя бесконечно большой.

2. Замена первого и второго слоев некоторым одним эквивалентным слоем и построение с помощью палетки ρ_2 конечной ветви кривой. При этом величины h_1 и ρ_1 палетки ρ_2 будут соответствовать мощности и сопротивлению эквивалентного слоя, а ρ_2 — сопротивлению третьего слоя бесконечно большой мощности.

3. Построение промежуточной части кривой (соединение начальной и конечной ветви). Последняя операция, дающая в результате искомую кривую, представляет иногда значительные затруднения, так как на участке слияния двух предельных кривых характер графика зависит от всех трех слоев.

Следует заметить, что в настоящее время наличие большого числа рассчитанных трехслойных кривых позволяет во многих случаях свести построение трехслойной кривой к интерполяции между имеющимися на палетках рассчитанными кривыми.

Общие для всех типов кривых приемы такого построения трехслойной кривой сводятся к следующему: заданные параметры ρ_2 и ν_2 второго слоя заменяют, согласно соответствующему принципу эквивалентности, новыми значениями μ_2^* и ν_2^* так, чтобы μ_2^* соответствовало ближайшему (например, большему по отношению к заданному μ_2) значению, имеющемуся на палетках. Подобрал палетку с модулем, равным μ_2^* , переносят с нее на бланк кривую для соотношения мощностей, равного ν_2^* . Если такой кривой на палетке не окажется, то необходимо проинтерполировать между двумя кривыми с ближайшими значениями параметра ν_2 . Далее, вновь заменяют заданные параметры μ_2 и ν_2 в соответствии с принципом эквивалентности на μ_2^* и ν_2^* так, чтобы μ_2^* соответствовало ближайшему (теперь уже меньшему по отношению к заданному μ_2) значению, имеющемуся на палетках. Как и в первом случае, с палетки с модулем μ_2^* наносят на бланк путем интерполяции кривую для ν_2^* .

Интерполирую между нанесенными на бланк кривыми для v_2' , получают искомую кривую для заданного v_2 и μ_2 .

Заметим, что если указанные кривые, между которыми должна заключаться искомая кривая, будут почти совпадать друг с другом, это значит, что для данного разреза принцип эквивалентности применим в широких пределах. Если же окажется, что нанесенные на бланк кривые будут отстоять друг от друга на довольно большом расстоянии, это значит, что принцип эквивалентности применим лишь в небольших пределах и интерполировать при этом придется уже на более широком интервале. Оценка пределов применимости принципа эквивалентности для некоторых частных случаев может быть произведена на основании диаграмм, описанных выше (рис. 8, 13, 15 и 17).

Для уточнения интерполяции следует использовать также двуслойные кривые — начальную и конечную асимптоты искомой кривой, которые наносятся приемами, описанными ниже.

Если окажется, что заданное ρ_3 не будет соответствовать ни одному из ρ_3 , принятых на палетках, вышеуказанную операцию следует повторить дважды, принимая ρ_3 в одном случае больше, в другом случае меньше заданного. При этом естественно, что, помимо интерполяции по параметру v_2 , необходимо будет осуществить интерполяцию также по параметру ρ_3 .

Построение трехслойных кривых типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$).

Точка Н

Теоретические кривые такого типа характеризуются наличием минимума ρ_x , отражающего присутствие в разрезе хорошо проводящего второго слоя менее проводящими слоями. Выше было отмечено, что для разреза с бесконечно большим сопротивлением подстилающего слоя положение конечной асимптоты многослойной кривой определяется суммарной продольной проводимостью $\sum S$ всех перекрывающихся слоев и что конечная асимптота соответствует в этом случае линии $\sum S$. В более общей форме это правило, данное Гуммелем, относится также и к многослойным разрезам с конечным сопротивлением подстилающего слоя, если сопротивление последнего выше сопротивления перекрывающего слоя. Согласно этому правилу, положение конечной асимптоты многослойной кривой для данного случая определяется суммарной продольной проводимостью всех слоев, перекрывающих слой высокого сопротивления.

Для получения конечной асимптоты по правилу Гуммеля все перекрывающие слои следует заменить одним эквивалентным слоем с мощностью, равной суммарной их мощности

$$\sum_1^n h_i = h_1 + h_2 + \dots + h_n$$

и сопротивлением, равным их среднему продольному сопротивлению

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n h_i}{\sum_1^n \frac{h_i}{\rho_i}}$$

Покажем на примере приемы графического построения трехслойных кривых типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$).

Пусть

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = \frac{1}{10}; \quad \rho_3 = 3;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 1; \quad h_3 = \infty.$$

Отметим на бланке с двойным логарифмическим масштабом точку с абсциссой $\rho_x = \rho_1 = 1$ и ординатой $\frac{AB}{2} = h_1 = 1$ и совместим с этой точкой крест палетки ρ_2 , расположив саму палетку в соответствии с положением координатных осей на бланке (параллельность соответствующих осей палетки и бланка). После этого перенесем на бланк кривую палетки ρ_2 с модулем $\mu_2 = \frac{1}{10}$ (рис. 20), осуществляя при этом интерполяцию между двумя кривыми с ближайшими значениями модулей $\mu_2 = \frac{1}{9}$ и $\mu_2 = \frac{1}{19}$. Полученная кривая будет соответствовать начальной ветви искомой кривой, на которой еще не сказывается влияние третьего слоя.

Для построения конечной асимптоты искомой кривой заменим первый и второй слой одним эквивалентным слоем, мощность которого, согласно правилу Гуммеля, будет равна:

$$h_{1,2} = h_1 + h_2 = 2,$$

а его сопротивление будет равно среднему продольному сопротивлению заменяемых слоев:

$$\rho_{1,2} = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} = \frac{2}{1 + 10} = \frac{2}{11} \approx 0,18.$$

Перенесем на бланк точку с абсциссой $\rho_{1,2} = \frac{2}{11}$ и ординатой $h_1 + h_2 = 2$ и совместим с ней крест палетки ρ_3 . После этого на бланк переносится двуслойная кривая с модулем $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_{1,2}} = 3 : \frac{2}{11} = 16,5$. Очевидно, что и в этом случае ввиду отсутствия на палетке ρ_3 кривой для значения $\rho_2 = 16,5$ необходимо проинтерполировать между кривыми с $\rho_2 = 9$ и $\rho_2 = 19$.

Нанесенные на бланк двуслойные кривые, определяя положение верхней и нижней части искомой кривой, не дают материала для нанесения промежуточной части кривой (минимум ρ_x), где сказывается наличие всех трех слоев.

Для уточнения положения минимума искомой кривой необходимо использовать трехслойные палетки типа *H*.

Так как заданное $\mu_2 = \frac{1}{10}$, а на палетках приняты $\mu_2 = \frac{1}{9}$ и $\mu_2 = \frac{1}{19}$, то пользуясь принципом эквивалентности S_2 заменим

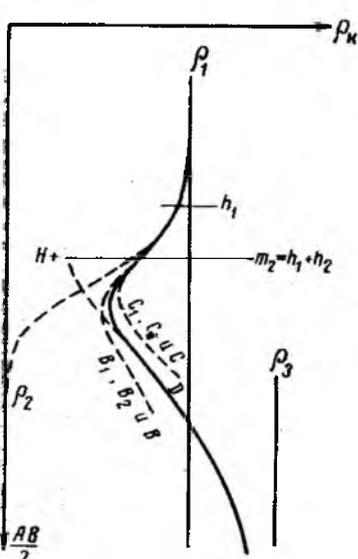


Рис. 20. Графическое построение трехслойной кривой ВЭЗ типа *H*.

μ_2 сначала на $\mu'_2 = \frac{1}{9}$ и, так как

$$S_2 = \frac{v_2}{\mu_2} = \frac{v'_2}{\mu'_2},$$

то при заданном $\mu_2 = \frac{1}{10}$ будем иметь:

$$v'_2 = S_2 \mu'_2 = 10 \cdot \frac{1}{9} \approx 1,1.$$

Беря палетку *H* — $\frac{1}{9}$ — ρ_1 , наносим с нее на бланк кривую (B_1) для v_2 , осуществляя одновременно интерполирование между кривыми с $v_2 = 1$ и $v_2 = 2$. При этом палетку данной серии необходимо прикладывать так, чтобы крест палетки совмещался на бланке с точкой пересечения линий ρ_1 и h_1 .

Далее аналогичным образом заменим заданное μ_2 на $\mu''_2 = \frac{1}{19}$, при этом

$$v''_2 = S_2 \mu''_2 = 10 \cdot \frac{1}{19} = 0,52.$$

Беря палетку *H* — $\frac{1}{19}$ — ρ_1 и накладывая ее так, чтобы линии ρ_1 и h_1 палетки совмещались соответственно с линиями ρ_1 и h_1 на бланке, наносим на бланк кривую B_2 для $v''_2 = 0,52$, интерполируя при этом между кривыми с $v_2 = \frac{1}{2}$ и $v_2 = 1$. Можно, впрочем, без особой погрешности принять, что $v''_2 = 0,52 \approx \frac{1}{2}$, и тогда никакой интерполяции не нужно.

В результате интерполяции между двумя нанесенными на бланк кривыми для v'_2 (B_1) и v''_2 (B_2) мы получим положение минимума

трехслойной кривой B для заданного v_2 . Как видно из чертежа, все три кривые сливаются в одну, что говорит о применимости принципа эквивалентности S_2 к заданному разрезу. Но, так как это положение минимума определено для случая $\rho_3 = \rho_1$, в то время как заданное $\rho_3 = 3\rho_1$, то, очевидно, вышеуказанные операции необходимо повторить еще раз с таким расчетом, чтобы получить кривую для заданного v_2 , но уже при большем значении $\rho_3 = \infty$.

Напомним только, что с увеличением ρ_3 пределы применимости принципа эквивалентности становятся еще более широкими и, следовательно, если в результате проделанных выше построений две кривые слились в одну, то тем более они сольются (кривые C_1 , C_2 и C), если принять $\rho_3 = \infty$. Поэтому достаточно нанести только одну кривую для $\mu_2 = \frac{1}{9}$ (ближайшего к заданному), которая будет соответствовать кривой C для заданных параметров, но при $\rho_3 = \infty$. Искомая трехслойная кривая D для заданного разреза, совпадая в верхней и нижней части с двухслойными кривыми, в промежуточной части (положение минимума ρ_x) проводится интерполяцией между кривыми B и C .

Нетрудно также видеть, что положение на бланке точки с абсциссой и ординатой, равными численным значениям сопротивления и мощности эквивалентного слоя, может быть получено графическим методом, как точка пересечения линии $S_{1,2} = S_1 + S_2$ и линии $h_1 + h_2$. Действительно, при рассмотрении треугольника анизотропии мы видели, что абсцисса этой точки H соответствует среднему продольному сопротивлению этих двух слоев и ордината — их суммарной мощности.

В целях более быстрого определения положения точки H в зависимости от μ_2 и v_2 (ρ_1 и h_1 приняты равными единице) может быть использована палетка LCH (приложение). На ней нанесены системы кривых, определяющих положение абсциссы $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ и ординаты $h_1 + h_2$ соответствующего эквивалентного слоя (точки H) для постоянных значений μ_2 и переменных v_2 , а также для постоянных значений v_2 и переменных μ_2 . Интерполяцией между этими кривыми можно определить положение абсциссы и ординаты точки для любого μ_2 (в пределах от $\mu_2 = \frac{1}{199}$ до $\mu_2 = 1$) и v_2 (в пределах от $v_2 = 0$ до $v_2 = 99$). Практически для определения положения точки необходимо:

1) совместить крест палетки LCH с точкой на бланке, абсцисса которой равна заданному значению ρ_1 , а ордината — заданному значению h_1 ;

2) перенести на бланк линию, соответствующую заданному μ_2 .

Пересечение этой линии с ординатой, равной $h_1 + h_2$, определит положение точки H .

Построение трехслойных кривых типа Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$). Точка Q

Значение мощности и сопротивления слоя, эквивалентного первым двум слоям, может быть получено для такого разреза только эмпирически, путем сопоставления палетки ρ_2 с нижними ветвями соответствующих кривых из трехслойных палеток. При этом оказывается, что для получения удовлетворительного совмещения крест палетки ρ_2 должен быть помещен в точку с ординатой, меньшей, чем $h_1 + h_2$. Другими словами, мощность эквивалентного слоя, заменяющего первый и второй слой, должна быть взята меньше их истинной суммарной мощности.

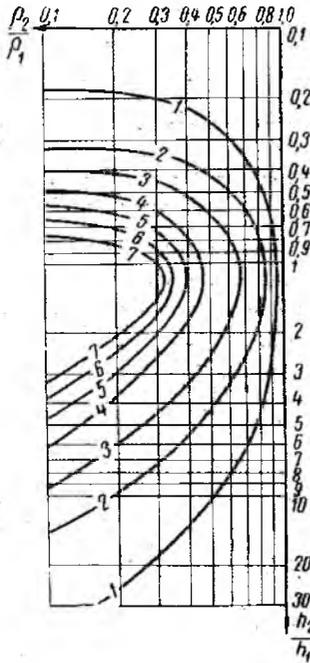


Рис. 21. Вспомогательная диаграмма для графического построения трехслойной кривой ВЭЗ типа Q (по М. Мартэну).

Для определения положения точки Q, которая характеризует сопротивление и мощность эквивалентного слоя М. Мартэн [18] рекомендует следующее, установленное эмпирическим способом, правило: точка Q должна быть расположена на линии $S_{1,2}$, причем она смещена от точки H вверх (в сторону меньших $\frac{AB}{2}$) на некоторую величину.

Величина этого смещения, выраженная в миллиметрах (для логарифмического масштаба с модулем 6,25 см), может быть определена, в зависимости от μ_2 и ν_2 , по предложенной М. Мартэном диаграмме (рис. 21). На этой диаграмме по оси абсцисс отложены значения μ_2 , по оси ординат — значения ν_2 . Индексы кривых соответствуют величинам смещения точки Q от точки H в миллиметрах.

Для определения положения точки Q необходимо построить линии $S_{1,2}$ и $h_1 + h_2$ и от точки их пересечения H отложить по линии $S_{1,2}$ вверх отрезок, величина которого в миллиметрах определяется по указанной диаграмме.

Практически, для определения координат точки Q как при графических построениях, так и при интерпретации, можно воспользоваться палеткой LCQ (приложение, № 31), на которой даны в виде кривых геометрические места положения точек Q (по отношению к h_1 и ρ_1) для постоянных μ_2 и переменных ν_2 , а также для постоянных ν_2 и переменных μ_2 . Интерполируя, в случае необходимости, между имеющимися на палетке значениями μ_2 и ν_2 , можно опреде-

лить положение точки Q по отношению к точке с координатами ρ_1 и h_1 .

Рассмотрим пример построения трехслойной кривой типа Q . Пусть задан следующий разрез:

$$\rho_1 = 45; \quad \rho_2 = 6; \quad \rho_3 = 1,5;$$

$$h_1 = 2; \quad h_2 = 3; \quad h_3 = \infty.$$

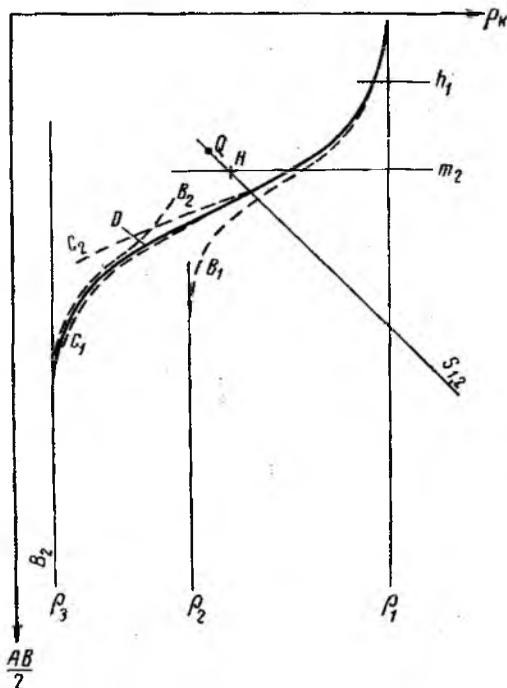


Рис. 22. Графическое построение трехслойной кривой ВЭЗ типа Q .

Для построения верхней ветви трехслойной кривой помещаем крест палетки ρ_2 в точку на бланке с $\rho = 45$ и $\frac{AB}{2} = 2$ и наносим на бланк двуслойную кривую (B_1) для модуля $\mu_2 = \frac{6}{45} = \frac{1}{7,5}$ (рис. 22). Проведем линии $S_{1,2} = \frac{2}{45} + \frac{3}{6} = 0,54$ и $h_1 + h_2 = 5$, пересечение которых даст точку H .

Далее находим величину смещения точки Q , абсцисса которой определяет сопротивление $\rho = 7,5$ и ордината — мощность $h = = 4,1$ эквивалентного слоя.

Положение точки Q может быть определено также с помощью палетки LCQ. Для этой цели крест палетки LCQ надо совместить

с точкой на бланке, абсцисса и ордината которой соответствуют сопротивлению и мощности первого слоя ($\rho = 45$; $h = 2$). Интерполируя между соответствующими кривыми палетки LCQ для различных значений μ_2 и ν_2 , можно определить положение точки Q и перенести ее на бланк.

После этого, совмещая крест палетки ρ_2 с найденной точкой Q , переносим на бланк двуслойную кривую (B_2) для модуля $\mu_2 = \frac{1,5}{7,5} = \frac{1}{5}$, соответствующую нижней ветви искомой трехслойной кривой.

Для уточнения положения промежуточного участка искомой кривой обратимся к диаграмме, изображенной на рис. 15. Отметив на диаграмме точку с заданными координатами $\mu_2 = 0,133$ и $\nu_2 = 1,5$, мы видим, что в пределах применимости принципа эквивалентности можно заданные μ_2 и ν_2 изменить по линии эквивалентных слоев на $\mu'_2 = \frac{1}{9}$ и $\nu'_2 = 1,6$. Беря палетку $Q - \frac{1}{9} - \rho^{1/2}$ и прикладывая ее так, чтобы линии ρ_1 и h_1 палетки совместились с линиями ρ_1 и h_1 на бланке, наносим путем интерполяции кривую C_1 для $\mu'_2 = \frac{1}{9}$ и $\nu'_2 = 1,6$. Очевидно, что в данном случае не имеет смысла, как это мы делали в примере построения кривой типа H , наносить еще вторую кривую для μ''_2 , большего по отношению к заданному μ_2 значения, так как из диаграммы видно, что нанесенная на бланк кривая будет отличаться от искомой не больше, чем на 5%.

Следовательно, нам остается аналогичным образом нанести на бланк кривую C_2 для этого же эквивалентного слоя ($\mu'_2 = \frac{1}{9}$ и $\nu'_2 = 1,6$), но уже для $\rho_3 = \rho_2^2$. Интерполяцией между двумя кривыми при разных значениях ρ_3 фиксируем местоположение промежуточной части искомой кривой D . При этом следует учесть, что заданное ρ_3 больше приближается к $\rho_3 = \rho^{1/2}$.

Построение трехслойных кривых типа A ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$). Точка A

Поиски точек, при совмещении с которыми креста палетки ρ_2 получается наилучшее совпадение ее с нижними ветвями трехслойных кривых данного типа, показали, что эти точки всегда располагаются на линии $S_{1,2}$. Другими словами, продольная проводимость эквивалентного слоя должна равняться сумме продольных проводимостей первого и второго слоев. При этом для бесконечно большого сопротивления третьего слоя нижняя ветвь кривой соответствует линии $S_{1,2}$. Этот вывод вполне согласуется с рассуждениями, приведенными выше, при введении понятия о продольной проводимости.

Положение точки на линии $S_{1,2}$, дающее наиболее полное совмещение палетки ρ_2 с нижними ветвями трехслойных кривых, непостоянно и зависит от соотношений $\nu_2 = \frac{h_2}{h_1}$, $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\mu_3 =$

$= \frac{\rho_3}{\rho_2}$. Однако практика показала, что если эту точку поместить в точку анизотропии A (пересечение линий $S_{1,2}$ и $T_{1,2}$), то совмещение получается достаточно удовлетворительным для любых соотношений ν_2 и μ_2 и для любого $\rho_3 > \rho_2$.

Таким образом, для разрезов данного типа суммарные продольная проводимость и поперечное сопротивление эквивалентного слоя могут быть приняты равными соответственно сумме продольных проводимостей и сумме поперечных сопротивлений заменяемых двух слоев. Из рассмотрения треугольника анизотропии мы знаем, что этому условию удовлетворяет слой с сопротивлением, равным среднему квадратичному сопротивлению двух слоев, и мощностью, равной сумме мощностей первого и второго слоев, увеличенной на коэффициент анизотропии совокужности этих слоев.

В связи с этим кривые ρ_x данного типа ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), для графического построения которых используется точка анизотропии A , названы кривыми типа A , а семейства кривых, систематизированных в палетки, — палетками серии A .

Рассмотрим пример графического построения кривой типа A . Пусть мы имеем:

$$\rho_1 = 2; \quad \rho_2 = 9; \quad \rho_3 = 50;$$

$$h_1 = 3; \quad h_2 = 9; \quad h_3 = \infty.$$

Отсюда определяем:

$$\mu_2 = 4,5 \text{ и } \nu_2 = 3;$$

$$S_1 = 1,5; \quad S_2 = 1,0; \quad S_{1,2} = 2,5;$$

$$T_1 = 6; \quad T_2 = 81; \quad T_{1,2} = 87.$$

Нанесем на бланк точку с абсциссой $\rho_1 = 2$ и ординатой $h_1 = 3$.

Совмещая с этой точкой крест палетки ρ_2 , построим на бланке кривую ρ_x (B_1), соответствующую $\mu_2 = 4,5$ (рис. 23).

Для определения положения точки A нанесем на бланк линии $S_{1,2}$ и $T_{1,2}$. Пересечение линий $S_{1,2}$ и $T_{1,2}$ дает положение точки A , координаты которой определяют сопротивление $\rho_{1,2} \approx 5,9$ и мощность $h_{1,2} \approx 1,5$ эквивалентного слоя. Далее, совмещая крест палетки ρ_2 с точкой A , перенесем на бланк кривую B_2 с μ_2 , соответствующим $\frac{\rho_{1,2}}{\rho_3} = \frac{5,9}{50} \approx 8,5$.

Для нанесения промежуточного участка искомой кривой заменим заданное $\mu_2 = 4,5$ на ближайшее, имеющееся на палетке значение $\mu'_2 = 4$. В соответствии с этим заданный параметр ν_2 в силу

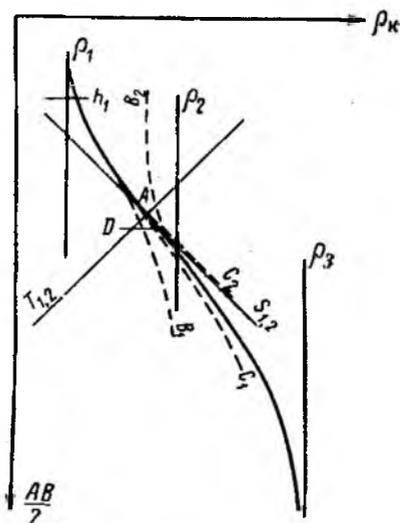


Рис. 23. Графическое построение трехслойной кривой ВЭЗ типа A .

справедливости для разрезов данного типа принципа эквивалентности S_2 примет новое значение:

$$v_2 = \frac{\mu_2'}{S_2} \approx 2,7.$$

Обращаясь к диаграмме (рис. 17), где даны предельные кривые для возможных изменений ρ_2 и h_2 , мы видим, что кривая с новыми координатами (μ_2' и v_2') не будет отличаться от искомой больше, чем на 5%.

Не имея палеток для заданного отношения $\frac{\rho_3}{\rho_2}$, для уточнения положения промежуточной ветви мы вынуждены использовать палетки для ближайших имеющихся значений $\rho_3 = \frac{\rho_2'}{\rho_1}$ и $\rho_3 = \infty$. Беря палетку $A-4-\rho_2^2$ и совмещая линии ρ_1 и h_1 палетки с линиями ρ_1 и h_1 на бланке, наносим путем интерполяции кривую C_1 для v_2' .

Далее с палетки $A-4-\infty$ аналогичным образом наносим на бланк кривую C_2 для v_2' и $\rho_3 = \infty$. Интерполируя между этими двумя кривыми, находим местоположение искомой кривой для заданных параметров $\mu_2 = 4,5$; $v_2 = 3$ и $\rho_3 = 50$.

Заканчивая рассмотрение примера, заметим, что координаты точки A , которые в данном примере мы находим графическим методом, могут быть получены непосредственно путем расчета по известным уже нам формулам:

$$\rho_{1,2m} = \sqrt{\frac{T_1 + T_2}{S_1 + S_2}}$$

и

$$(h_1 + h_2) \lambda = \sqrt{(T_1 + T_2) (S_1 + S_2)}.$$

Кроме того, для возможности быстрого нахождения координат точки A может быть использована палетка LCA (приложение, № 30), построенная на основании вычислений по этим формулам, для различных μ_2 и v_2 . На этой палетке даны кривые, соответствующие геометрическим местам точек A как для определенных постоянных значений μ_2 (при разных v_2), так и для постоянных значений v_2 (при разных μ_2). Совмещая крест палетки LCA с точкой на бланке, абсцисса которой равна ρ_1 и ордината h_1 , можно сразу определить положение точки A путем интерполяции между кривыми для разных μ_2 и v_2 .

Построение грехелойных кривых типа K ($\rho_1 < \rho_3 > \rho_2$). Точка K

Теоретические кривые для разрезов этого типа характеризуются наличием максимума ρ_2 , отражающего наличие в разрезе плохо проводящего второго слоя.

Поиски точек наилучшего совмещения кривых палетки ρ_2 с нижними ветвями рассчитанных трехслойных кривых показали [18], что удовлетворительное совпадение может быть получено при помещении креста палетки ρ_2 в точку с абсциссой $\rho = \rho_{1,2m}$ и ординатой

$$\frac{AB}{2} = (h_1 + h_2)\lambda_{1,2\epsilon}.$$

Величина ϵ в первом приближении зависит от величины коэффициента анизотропии совокупности первого и второго слоев и увеличивается при увеличении λ . На рис. 24 представлена предложенная М. Мартэном кривая, дающая возможность определить величину ϵ в зависимости от λ . Начальная ветвь этой кривой исправлена в связи с неточностью допущенной М. Мартэном. Действительно, зная,

что для случая двух слоев значение $\lambda = \frac{\sqrt{(1 + \nu_2 \mu_2) \left(1 + \frac{\nu_2}{\mu_2}\right)}}{1 + \nu_2}$ может

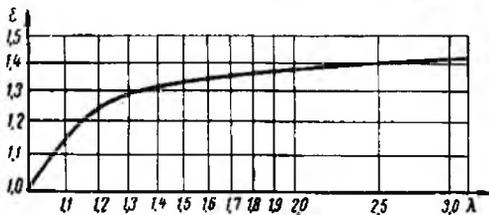


Рис. 24. Вспомогательная кривая для построения трехслойной кривой ВЭЗ типа К (по М. Мартэну).

равняться единице лишь при $\mu_2 = 1$ (для любого ν_2) или при $\nu_2 = 0$ и $\nu_2 = \infty$ (при конечном значении μ_2). Оба эти случая соответствуют фактически наличию лишь одного слоя (вместо двух). Практически, определение точки, координаты которой соответствуют сопротивлению и мощности слоя, эквивалентного первому и второму слоям, производится следующим образом: в соответствии с заданными значениями ρ_1 ; ρ_2 ; h_1 и h_2 строят треугольник анизотропии, составленный линиями $S_{1,2}$; $T_{1,2}$ и $h_1 + h_2$ (см. рис. 19). После этого определяют коэффициент анизотропии, равный высоте треугольника и, согласно графику на рис. 24, величину поправки ϵ . Откладывая эту величину ϵ от точки А вниз, мы получаем положение новой точки, характеризующей сопротивление $\rho_{1,2m}$ и мощность $h_1 + h_2$ эквивалентного слоя. Этой точке, исправленной по отношению к точке анизотропии, присвоено название точки К. В соответствии с этим разрезы типа $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, кривые ρ_x для таких разрезов и семейства таких кривых, объединенных в палетки, названы, соответственно разрезами, кривыми и палетками типа (или серии) К.

Следует отметить, что если поместить крест палетки ρ_2 в точку К, предложенную М. Мартэном, то мы получим удовлетворительное совпадение соответствующей двухслойной кривой лишь с самой

нижней ветвью трехслойной кривой. Для того чтобы получить совмещение двуслойной кривой с большей частью нижней асимптоты трехслойной кривой, нами были предприняты поиски новых положений точки K . При этом оказалось, что такие положения, дающие наиболее полное совмещение, могут быть найдены, но они зависят не только от μ_2 и ν_2 , но и от $\frac{\rho_3}{\rho_2}$, что без сомнения является усложняющим фактором. Расчеты кривых типа K для случая $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$, произведенные ГСГТ, дали возможность подойти к оценке применимости различных положений точки K для значений $\rho_3 > \rho_1$. При этом оказалось, что полученные нами точки K , определяемые по М. Мартэну, не могут быть применены как для случаев $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$, так и для предельного случая $\rho_3 = \rho_2$.

В результате этих исследований мы предлагаем ввести новую точку K , смещенную по отношению к точке A (и точке H) вниз по линии $S_{1,2}$ на некоторый отрезок, величина которого в миллиметрах (для модуля 6,25 см) может быть определена в зависимости от μ_2 и ν_2 по специальной диаграмме (рис. 25).

Эта новая точка K пригодна для графических построений и интерпретации трехслойных кривых типа K при любых значениях $\rho_3 < \rho_2$.

Определение ее положения даже несколько проще, чем для точки K по М. Мартэну. Кроме того, применение новой точки K облегчает графические построения и интерпретацию многослойных кривых, так как при этом отпадает необходимость введения специальных поправок в изменение мощности последующего слоя*.

Таким образом, при графических построениях кривых для разрезов типа K , так же как и для кривых других серий, мы будем заменять два слоя одним эквивалентным слоем, суммарная продольная проводимость которого равна сумме продольных проводимостей первого и второго слоев.

Рассмотрим пример построения трехслойной кривой типа K . Пусть нам задано:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 15; \quad \rho_3 = 1,5;$$

$$k_1 = 1; \quad k_2 = 1,5; \quad k_3 = \infty.$$

Для построения верхней части искомой кривой помещаем крест палетки ρ_2 в точку с абсциссой, равной сопротивлению ($\rho_1 = 1$), и ординатой, равной мощности ($h_1 = 1$) первого слоя, и переносим на бланк двуслойную кривую A для $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 15$ (рис. 26).

* Е. Н. Каленов, анализируя кривые типа K [16], приходит к выводу, что метод построения точки K способом А. М. Пылаева, дает менее точные результаты. Построение многих кривых способом А. М. Пылаева, выполненное нами, показало простоту этого способа и достаточную точность для практических целей. По-видимому, могут быть рекомендованы оба способа построения точки K . — (Прим. ред.)

Построим линии

$$S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{1,5}{15} = 1,1 \text{ и } h_{1,2} = 1 + 1,5 = 2,5.$$

Пересечение этих линий дает положение точки H . Далее, по диаграмме (см. рис. 25) определяем для $\mu_2 = 15$ и $\nu_2 = 1,5$ величину смещения точки K от точки H в 40 мм и, откладывая это расстояние от точки H по линии $S_{1,2}$, определяем положение точки K .

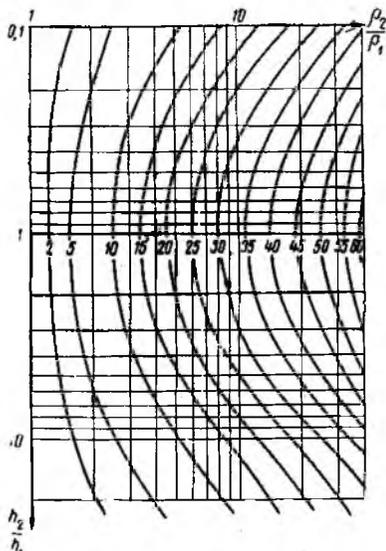


Рис. 25. Диаграмма для определения смещения точки K трехслойных кривых ВЭЗ. Шифр кривых — смещение точки K от точки H (в мм) по линии $S_{1,2}$ (для модуля 6,25 см).

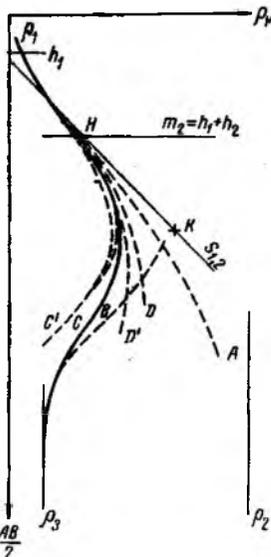


Рис. 26. Графическое построение трехслойной кривой ВЭЗ типа К.

характеризующей сопротивлением ($\rho = 6,5\rho_2$) и мощностью ($h = 7,3h_1$) слоя, эквивалентного первым двум слоям. Положение точки K может быть определено также и с помощью палетки ЛСК (приложение, № 34), пользование которой аналогично описанным выше приемам использования палеток ЛСН, LCQ и LCA. Однако при малых значениях μ_2 определение положения точки K по диаграмме на рис. 25 оказывается более удобным.

Совмещая крест палетки ρ_2 с найденной точкой K , перенесем на бланк двуслойную кривую B с модулем, равным отношению заданного ρ_2 к сопротивлению эквивалентного слоя, т. е. $\mu_2 = \frac{1,5}{6,5} = \frac{1}{4,3}$.

Для уточнения промежуточной части кривой (в точке максимума ρ_2) следует перенести на бланк трехслойные кривые для ближайших, имеющихся на палетках, значений $\mu'_2 = 19$ и $\mu''_2 = 9$. Кроме того, так как заданное значение $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ не подходит к значениям $\frac{\rho_3}{\rho_1}$, имеющимся на палетках, то для возможности интерполяции необходимо перенесение соответствующих кривых как для $\rho_3 = \rho_2$, так и для $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$.

По принципу эквивалентности T_2 , при изменении сопротивления второго слоя, его мощность должна быть изменена таким образом, чтобы величина $T_2 = h_2 \rho_2 = 15 \cdot 1,5 = 22,5$ оставалась постоянной.

Отсюда при $\mu'_2 = 19$

$$v'_2 = \frac{22,5}{19} = 1,2$$

и при $\mu''_2 = 9$

$$v''_2 = \frac{22,5}{9} = 2,5.$$

Совмещая крест палетки К — 19 — ρ_1 с пересечением линий ρ_1 и h_1 на бланке, переносим на бланк кривую C для $v'_2 = 1,2$, осуществляя при этом интерполирование между кривыми для $v_2 = 1$ и $v_2 = 2$. Таким же образом наносится кривая C' из палетки К—9— ρ_1 для $v''_2 = 2,5$.

Для данного примера эти кривые отличаются между собой незначительно. Аналогичным образом наносятся кривые D из палетки К—19— $\sqrt{\rho_2}$ для $v'_2 = 1,2$ и кривые D' из палетки К—9— $\sqrt{\rho_2}$ для $v''_2 = 2,5$.

Искомая трехслойная кривая проводится в верхней своей части по двуслойной кривой A , в средней части — путем интерполяции между кривыми C и D и, наконец, в нижней части она сливается с двуслойной кривой B . На рис. 26 искомая кривая показана сплошной линией.

Таким образом, построение трехслойных кривых любого типа может быть осуществлено достаточно просто, имея в виду наличие большого числа рассчитанных трехслойных палеток, которые могут быть использованы для уточнения промежуточной (средней) ветви кривой.

§ 5. ПРИЕМЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВЫХ

Общие положения

Для графических построений четырехслойных кривых используются рассчитанные трехслойные и двуслойные кривые палеток*.

* В настоящее время имеется большое число рассчитанных палеток четырехслойных кривых [16], применение которых упрощает и повышает точность графического построения четырехслойных и многослойных кривых. Приемы графического построения кривых ВЭЗ по четырехслойным палеткам аналогичны таковым при работе с трехслойными палетками. При отсутствии необходимых четырехслойных палеток построение кривых должно производиться по палеткам трехслойных кривых приемами, описанными в данном параграфе. (Прим. ред.)

Приемы построения четырехслойных кривых аналогичны описанным выше приемам построения трехслойных кривых. Сначала мощность третьего слоя h_3 условно принимается бесконечно большой, т. е. пренебрегают влиянием четвертого слоя, который, естественно, не должен отражаться на начальной ветви искомой кривой ρ_2 (при сравнительно небольших AB). Другими словами, можно считать, что верхняя часть искомой четырехслойной кривой должна совпадать с трехслойной кривой, соответствующей верхней части четырехслойного разреза при условии, что h_3 принято бесконечно большим. После построения этой трехслойной кривой первые два слоя заменяются одним эквивалентным слоем по правилам, изложенным выше. Эта замена дает возможность свести четырехслойный разрез к трехслойному, в котором первый слой соответствует слою, эквивалентному первым двум слоям искомого разреза, а второй слой — третьему слою искомого и третий слой — четвертому слою искомого разреза.

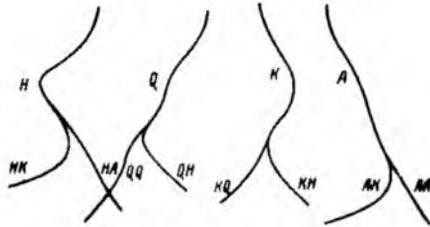


Рис. 27. Типы четырехслойных кривых ВЭЗ.

Построение трехслойной кривой для этого разреза дает возможность определить положение нижней ветви искомой четырехслойной кривой. Аналогично тому, как это делалось при графических построениях трехслойных кривых, для уточнения нижней ветви искомой четырехслойной кривой обычно необходимо заменить первые три слоя одним эквивалентным слоем и нанести двуслойную кривую для модуля $\frac{\rho_4}{\rho_{1,2,3}}$, равного отношению сопротивлений четвертого слоя и слоя, эквивалентного первым трем слоям.

При наличии четырехслойной структуры вследствие появления нового параметра ρ_4 число возможных комбинаций соотношений сопротивлений увеличивается до 8.

Действительно, если для трехслойных разрезов мы имели четыре возможные комбинации соотношений сопротивлений (разрезы типов H, Q, K и A), то для четырехслойных разрезов число это увеличивается вдвое, так как сопротивление четвертого слоя сможет быть либо больше, либо меньше сопротивления третьего слоя.

Порядок условных обозначений, принятый для трехслойных разрезов, может быть сохранен и для четырехслойных разрезов, которые можно обозначать индексом из двух букв. При этом первая буква по-прежнему будет характеризовать соотношения сопротивлений для первых трех слоев и вторая — соотношения сопротивлений для последних трех слоев, обозначаемых по тому же принципу и теми же буквами, как и для трехслойных разрезов. Возможные варианты соотношений сопротивлений четырехслойных разрезов и соответствующие им индексы приведены на рис. 27.

Построение четырехслойной кривой типа НК ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)

Рассмотрим пример построения кривых такого типа.
Пусть задан следующий разрез:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = \frac{1}{9}; \quad \rho_3 = 1; \quad \rho_4 = 0;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 2; \quad h_3 = 12; \quad h_4 = \infty.$$

Допустим, что $h_3 = \infty$. Тогда, для нанесения верхней части

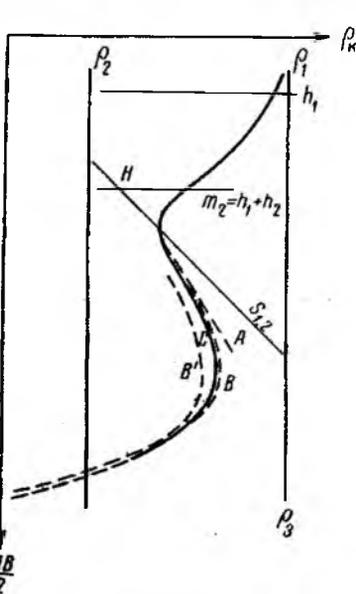


Рис. 28. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа НК.

из палетки $H - \frac{1}{9} - \rho_1$. Совмещая крест палетки $H - \frac{1}{9} - \rho_1$ с пересечением линий ρ_1 и h_1 на бланке, переносим кривую A для $v_2 = 2$ (рис. 28).

Заменяем теперь первые два слоя эквивалентным. Тогда H , координаты которой характеризуются сопротивлением $\rho_{1,2}$ и мощностью $h_{1,2}$ этого эквивалентного слоя, определится пересечением линии $S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{2}{\frac{1}{9}} = 19$ с линией

$h_1 + h_2 = 3$. Выполнив это построение, получим $\rho_{1,2} = 0,155$. Теперь необходимо построить трехслойную кривую, соответствующую нижней ветви искомой кривой. Для этой кривой первым слоем будет слой, эквивалентный первым двум слоям искомого разреза, вторым слоем — третий слой искомого разреза и третьим слоем — четвертый слой искомого разреза, т. е.:

$$\rho_1 = 0,155; \quad \rho_2 = 1; \quad \rho_3 = 0;$$

$$h_1 = 3; \quad h_2 = 12; \quad h_3 = \infty.$$

Для таких соотношений сопротивлений необходимо использовать кривые палеток K для $\rho_3 = 0$.

Для нанесения трехслойной кривой необходимо взять ближайшие из имеющихся на палетках $\mu'_2 = 9$ и $\mu''_2 = 4$. По принципу эквивалентности T_2 для этих значений μ_2 мы должны взять кривые из палеток для таких значений v_2 , чтобы $T_2 = \mu_2 v_2 = 6,4 \cdot 4 = = 25,6$ оставалось постоянным.

Отсюда при $\mu'_2 = 9$

$$v'_2 = \frac{25,6}{3} = 2,85$$

и при $\mu''_2 = 4$

$$v''_2 = \frac{25,6}{4} = 6,4.$$

Совмещая крест палетки К-9-0 с точкой H , переносим путем интерполяции между кривыми для $v_2 = 2$ и $v_2 = 3$ кривую B для $v'_2 = 2,85$.

Таким же образом путем интерполяции между кривыми для $v_2 = 5$ и $v_2 = 9$ переносим на бланк кривую B для $v''_2 = 6,4$ из палетки К-4-0. В точке максимума ρ_2 эти кривые довольно заметно расходятся между собой, что говорит о незначительной области действия принципа эквивалентности для данных значений μ_2 и v_2 . Обращаясь к диаграмме на рис. 13 и имея в виду, что с уменьшением ρ_2 область действия принципа эквивалентности T_2 увеличивается, мы видим, что, заменив $\mu_2 = 6,4$ и $v_2 = 4$ на $\mu'_2 = 9$ и $v'_2 = 2,85$, мы получим кривую B , не отличающуюся от искомой кривой более, чем на 5%, в то время как заменой данных параметров на $\mu''_2 = 4$ и $v''_2 = 6,4$ мы выходим за пределы действия принципа эквивалентности T_2 и, следовательно, получаем кривую B' , отличную от искомой кривой более чем на 5%. Поэтому при интерполяции между нанесенными на бланк кривыми следует отдать предпочтение кривой B для $\mu'_2 = 9$ и $v'_2 = 2,85$.

На чертеже (см. рис. 28) искомая четырехслойная кривая C нанесена (сплошной линией) по расчетным данным, что дает возможность судить о точности, которую можно получить при графических построениях.

В данном примере построение четырехслойной кривой было сравнительно облегчено совпадением заданных величины $\rho_2 = \frac{1}{9}$; $v_2 = 2$ и $\rho_3 = 1$ со значениями, принятыми на палетках. При отсутствии такого совпадения для построения верхней трехслойной кривой пришлось бы осуществить интерполяцию приемами, описанными в разделе построения трехслойных кривых. Если бы также значение ρ_4 не соответствовало ни одному из имеющихся на палетках значений ρ_3 , то при построении нижней трехслойной кривой необходимо было бы уточнить положение ее конечной асимптоты с помощью палетки ρ_2 . Для этой цели слой, эквивалентный первым двум слоям заданного разреза ($\rho_1 \approx 0,155$; $h_1 = 3$), и третий слой заданного разреза ($\rho_2 = 1$, $h_2 = 12$) необходимо заменить по правилу точки K новым слоем. Для построения точки K надо нанести новые линии $S_{1,2,3} = \frac{3}{0,155} + \frac{12}{1} = 31$ и $h_{1,2,3} = 3 + 12 = 15$ и от точки H их пересечения отложить отрезок, величина которого для $\mu_2 = 6,4$ и $v_2 = 4$ по диаграмме (см. рис. 25) будет равна 20 мм.

Прикладывая крест палетки ρ_2 к найденной точке K , мы переносим на бланк кривую для модуля μ_2 , равного отношению ρ_4 к абсциссе точки K . Эта кривая и определит положение конечной асимптоты искомой четырехслойной кривой для заданного ρ_4 .

Построение четырехслойной кривой типа НА
($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)

Пусть нам задан следующий разрез:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = \frac{1}{8}; \quad \rho_3 = 1; \quad \rho_4 = 10;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 1,5; \quad h_3 = 6; \quad h_4 = \infty.$$

Первые три слоя дают разрез типа H при $\rho_3 = \rho_1$. Для построения верхней трехслойной кривой необходимо использовать палетки для ближайших значений

$$\mu'_2 = \frac{1}{9} \quad \text{и} \quad \mu''_2 = \frac{1}{4}.$$

т. е.

$$H - \frac{1}{9} - \rho_1 \quad \text{и} \quad H - \frac{1}{4} - \rho_1.$$

Тогда в соответствии с принципом эквивалентности S_2 будем иметь:

при $\mu'_2 = \frac{1}{9}$

$$v'_2 = \mu'_2 S_2 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1,5}{\frac{1}{4}} \approx 1,33$$

и при $\mu''_2 = \frac{1}{4}$

$$v''_2 = \mu''_2 S_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1,5}{\frac{1}{4}} = 3,0.$$

Совмещая крест палетки $H - \frac{1}{9} - \rho_1$ с пересечением на бланке линий $\rho_1 = 1$ и $h_1 = 1$, переносим кривую A для $v'_2 = 1,33$, интерполируя при этом между кривыми для $v_2 = 1$ и $v_2 = 2$ (рис. 29). Далее, аналогичным образом переносим на бланк кривую A для $v_2 = 3$ из палетки $H - \frac{1}{4} - \rho_1$.

Учитывая, что значение заданного $\mu_2 = \frac{1}{8}$ ближе подходит к $\mu'_2 = \frac{1}{9}$, а также, что при уменьшении мощности при постоянных

значениях S_2 область действия принципа эквивалентности становится большей, следует при интерполировании между полученными кривыми искомую кривую проводить ближе к кривой для $\mu_2 = \frac{1}{9}$ и $\nu_2' = 1,33$.

Для построения нижней трехслойной кривой заменим первые два слоя одним эквивалентным, пользуясь правилом построения точки H . Абсцисса точки H даст $\rho_{1,2} = 0,19$. Теперь остается построить трехслойную кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 0,19; \quad \rho_2 = 1;$$

$$\rho_3 = 10; \quad h_1 = 2,5;$$

$$h_2 = 6; \quad h_3 = \infty.$$

Этот разрез относится к типу А при $\mu_2 \approx 5,3$; $\nu_2 = 2,4$ и $\rho_2^2 < \rho_3 < \infty$. Отсюда видно, что для построения соответствующей трехслойной кривой необходимо взять следующие палетки: А—4— ∞ и А—9— ∞ и, кроме того, А—4— ρ_2^2 и А—9— ρ_2^2 . Однако рассмотрение диаграммы (см. рис. 17) показывает, что достаточная точность может быть получена и при одной замене $\mu_2 = 5,3$ (при $\nu_2 = 2,4$) на $\mu_2' = 4$. При этом по линии эквивалентных слоев (для $S_{1,2} = 0,45$) мощность третьего слоя должна быть уменьшена до $1,8h_1$.

Совмещая крест палетки А—4— ∞ с точкой H на бланке, переносим кривую В для $\nu_2' = 1,8$. Аналогичным образом переносим на бланк кривую В' для $\nu_2' = 1,8$ из палетки А—4— ρ_2^2 . В данном примере сопротивление подстилающего слоя оказалось отличным от значений ρ_2 , принятых на палетках, использованных нами при построении нижней трехслойной кривой. В связи с этим для уточнения положения самой нижней асимптоты четырехслойной кривой необходимо использовать соответствующую двуслойную кривую. Для этого эквивалентный первым двум слоям заданного разреза слой с $\rho_1 = 0,19$ и $h_1 = 2,5$ и слой с $\rho_2 = 1$ и $h_2 = 6$ (третий слой заданного разреза) мы должны заменить новым эквивалентным слоем

по правилу точки А. Проведем линии $S_{1,2,3} = \frac{2,5}{0,19} + \frac{6}{1} \approx 19,2$

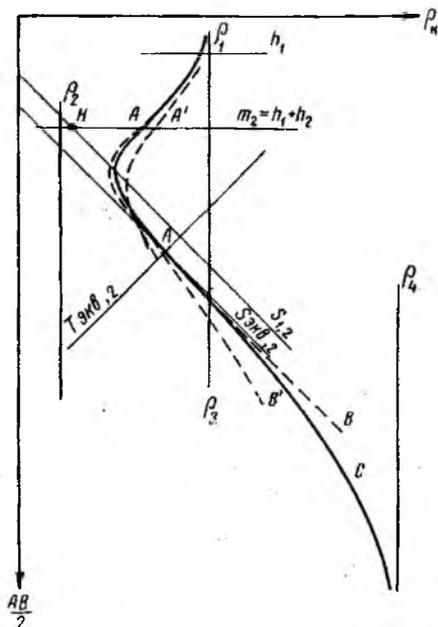


Рис. 29. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа НА.

и $T_{1,2,3} = 0,19 \cdot 2,5 + 1,6 \approx 6,5$. Пересечение этих прямых дает точку A , координаты которой характеризуют сопротивление $S_{1,2,3} \approx 0,59$ и мощность $h_{1,2,3} = 11,2$ нового эквивалентного слоя.

Совмещая крест палетки ρ_2 с точкой A , переносим на бланк двухслойную кривую C с модулем $\mu_2 = \frac{10}{0,59} \approx 17$.

Искомую четырехслойную кривую проводим в верхней части вблизи от кривой A , затем между кривыми B и B' и, наконец, в нижней части выводим ее на двухслойную кривую C .

Построение четырехслойной кривой типа QH

$$(\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4)$$

Построим кривую для следующего четырехслойного разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 0,176; \quad \rho_3 = 0,0588; \quad \rho_4 = \infty;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 3; \quad h_3 = 20; \quad h_4 = \infty.$$

Первые три слоя представляют собой разрез типа Q со значениями $\mu_2 = \frac{1}{5,7}$; $v_2 = 3$ и $\frac{\rho_2^{3/2}}{\rho_1} > \rho_3 > \frac{\rho_2^2}{\rho_1}$. Заданное $\mu_2 = \frac{1}{5,7}$ заменяем на ближайšie, имеющиеся на палетках значения $\mu_2' = \frac{1}{9}$ и $\mu_2'' = \frac{1}{4}$. Для $\mu_2' = \frac{1}{9}$ мы можем использовать соответствующие кривые из палеток для значения $\rho_3 = \rho_2^2 = 0,0124$ и $\rho_3 = \rho_2^{3/2} = 0,037$; аналогично и при $\mu_2'' = \frac{1}{4}$ — из палеток для значений $\rho_3 = \rho_2^2 = 0,0625$ и $\rho_3 = \rho_2^{3/2} = 0,125$. Сопоставление получаемых значений ρ_3 с заданным позволяет ограничить число кривых, наносимых на бланк для интерполяции, всего двумя кривыми (вместо четырех), из которых одна наносится с палетки $Q - \frac{1}{9} - \rho_2^{3/2}$ и другая — с палетки $Q - \frac{1}{4} - \rho_2^2$. Приближенные значения v_2' и v_2'' , которые мы должны принять при замене μ_2 на μ_2' и μ_2'' , определяются по линии эквивалентных слоев (см. рис. 15), проходящей через точку с заданными μ_2 и v_2 .

В данном случае при $\mu_2' = \frac{1}{9}$ $v_2' \approx 5,4$, при $\mu_2'' = \frac{1}{4}$ $v_2'' \approx 2,1$.

Совмещая крест палетки $Q - \frac{1}{9} - \rho_2^{3/2}$ с соответствующей точкой ($\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$) на бланке, переносим кривую A для $v_2' = 5,4$ (рис. 30). Аналогичным образом переносим и кривую A для $v_2'' = 2,1$ из палетки $Q - \frac{1}{4} - \rho_2^2$.

Далее, заменим первые два слоя эквивалентным слоем по праву точки Q . Для этой цели проведем на бланке линии $S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{3}{0,176} = 18$ и $h_{1,2} = 1 + 3 = 4$. Пересечение этих линий

даст точку H . Откладывая от этой точки H по линии $S_{1,2}$ вверх отрезок, равный для заданных μ_2 и ν_2 (согласно рис. 21) 5,5 мм, получим точку Q , координаты которой характеризуют сопротивление (0,19) и мощность (3,4) эквивалентного слоя.

Теперь необходимо построить трехслойную кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 0,19; \quad \rho_2 = 0,0588; \quad \rho_3 = \infty;$$

$$h_1 = 3,4; \quad h_2 = 20; \quad h_3 = \infty.$$

Этот разрез относится к типу H для $\rho_3 = \infty$.

Так как при этом:

$$\mu_2 = \frac{0,0588}{0,19} \approx \frac{1}{3,24}$$

$$\text{и } \nu_2 = \frac{20}{3,4} \approx 5,9,$$

то для построения соответствующей кривой необходимо воспользоваться палетками $H - \frac{1}{4} - \infty$ и $H - \frac{3}{7} - \infty$. Согласно принципу эквивалентности S_2 , необходимо принято:

$$\text{при } \mu_2' = \frac{1}{4}$$

$$\nu_2' = \mu_2' \frac{\nu_2}{\mu_2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{5,9}{\frac{1}{3,24}} \approx 4,8;$$

$$\text{при } \mu_2'' = \frac{3}{7}$$

$$\nu_2'' = \mu_2'' \frac{\nu_2}{\mu_2} = \frac{3}{7} \cdot \frac{5,9}{\frac{1}{3,24}} \approx 8,2.$$

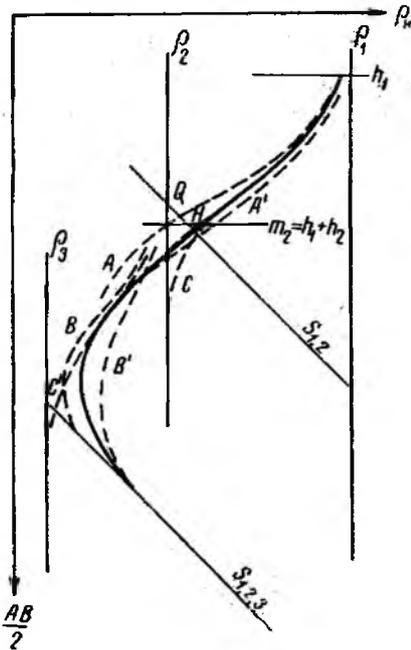


Рис. 30. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа QH .

Совмещая последовательно кресты палеток $H - \frac{1}{4} - \infty$ и $H - \frac{3}{7} - \infty$ с точкой Q , переносим на бланк соответствующие кривые B и B' . Искомая кривая (сплошная) проводится между двумя верхними и двумя нижними трехслойными кривыми. Для уточнения ее местоположения в данном случае целесообразно перенести на бланк дополнительно две двуслойные кривые: верхнюю C для $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \approx \frac{0,176}{1} \approx \frac{1}{5,9}$ и нижнюю C' для $\mu_2 = \frac{\rho_3}{\rho_{1,2}} = \frac{0,0588}{0,19} \approx \frac{1}{3,3}$. Сплошная кривая, изображенная на рис. 30, соответствует рассчитанной для заданного разреза кривой, что позволяет сделать

оценку точности, которая может быть получена при графических построениях.

Заметим, кроме того, что при конечном ρ_3 для уточнения положения самой нижней ветви искомой кривой нужно было бы построить дополнительно двуслойную кривую, для которой первым слоем служил бы слой, эквивалентный первым трем слоям заданного разреза, и вторым слоем — четвертый слой заданного разреза. Для этого построения необходимо найти положение точки H , характеризующей сопротивление и мощность нового эквивалентного слоя. Положение этой точки H в данном случае определится пересечением линий:

$$S_{1,2,3} = \frac{3,4}{0,19} + \frac{20}{0,0588} = 17,9 + 340 = 358$$

и

$$h_{1,2,3} = 3,4 + 20 = 23,4.$$

Совмещая крест палетки ρ_2 с точкой H , следует нанести на бланк кривую с модулем, равным отношению заданного ρ_4 к абсциссе точки H . Эта кривая и будет соответствовать самой нижней асимптоте искомой четырехслойной кривой.

В рассматриваемом примере, когда $\rho_4 = \infty$, положение этой конечной асимптоты соответствует линии $S_{1,2,3}$, нанесение которой на бланк облегчает построение кривых B и B' , так как при совмещении креста палеток $H - \frac{1}{4} - \infty$ и $H - \frac{3}{7} - \infty$ с точкой Q на бланк можно сразу переносить такие кривые, конечная асимптота которых совпадает с линией $S_{1,2,3} = 358$.

Построение четырехслойной кривой типа QQ

$$(\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4)$$

Построим четырехслойную кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 0,176; \quad \rho_3 = 0,0588; \quad \rho_4 = 0;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 3; \quad h_3 = 5; \quad h_4 = \infty.$$

Разрез для первых трех слоев относится к типу Q при значении $\mu_2 = \frac{0,176}{1} \approx \frac{1}{5,7}$; $\nu_2 = 3$ и $\frac{\rho_2^{2/3}}{\rho_1} < \rho_3 < \frac{\rho_2^3}{\rho_1}$. Поэтому для нанесения верхней трехслойной кривой необходимо взять палетки серии Q с $\mu_2 = \frac{1}{4}$ и $\frac{1}{9}$. При $\mu_2' = \frac{1}{9}$ можно использовать палетки для $\rho_2 = \rho_2^2 = \left(\frac{1}{9}\right)^2 \approx 0,0124$ и $\rho_3 = \rho_2^{2/3} = \sqrt{\left(\frac{1}{9}\right)^2} \approx 0,037$; при $\mu_2' = \frac{1}{4}$ — палетки для $\rho_2 = \rho_2^2 = 0,063$ и $\rho_3 = \rho_2^{2/3} = 0,125$. В соответствии с этим для построения верхней трехслойной кривой целе-

сообразнее использовать палетки $Q - \frac{1}{4} - \rho_2^{3/4}$ и $Q - \frac{1}{4} - \rho_2^3$, где значение ρ_3 ближе к заданному $\rho_3 = 0,0588$.

Согласно диаграмме на рис. 15 определяем, что при замене слоя с $\mu_2 = 0,176$ и $\nu_2 = 3$ на слой с $\mu_2 = \frac{1}{9}$ примерное значение ν_2' должно быть равно 5,4, соответственно при $\mu_2' = \frac{1}{4} - \nu_2'$ составит приблизительно 2,1.

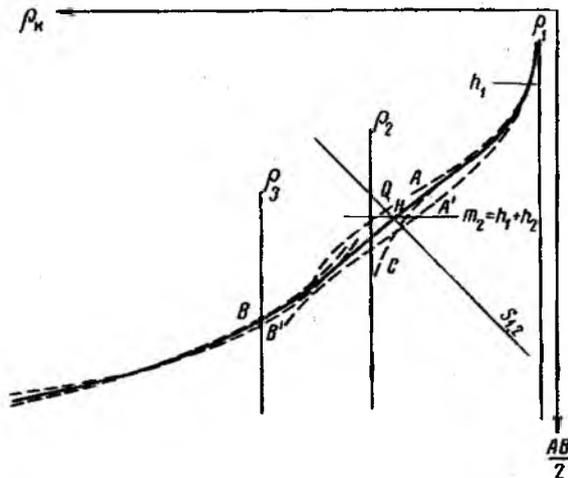


Рис. 31. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа QQ.

Прикладывая крест палетки $Q - \frac{1}{9} - \rho_2^{5/4}$ к соответствующей точке ($\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$) на бланке, переносим кривую A для $\nu_2' = 5,4$ (рис. 31). После этого аналогичным образом переносим кривую A' для $\nu_2' = 2,1$ из палетки $Q - \frac{1}{4} - \rho_2^3$.

Для построения нижней части трехслойной кривой заменяем по правилу точки Q первые два слоя одним эквивалентным слоем. Имеем:

$$S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{3}{0,176} \approx 18$$

и

$$h_1 + h_2 = 1 + 3 = 4.$$

Пересечение этих линий на бланке дает точку H (см. рис. 31), откладывая от которой вверх по линии $S_{1,2}$ отрезок, равный 5,5 мм (для $\mu_2 = 0,176$ и $\nu_2 = 3$), получим точку Q.

Теперь наш заданный разрез сведен к следующему трехслойному разрезу:

$$\rho_1 = 0,19; \quad \rho_2 = 0,0588; \quad \rho_3 = 0;$$

$$h_1 = 3,4; \quad h_2 = 5; \quad h_3 = \infty.$$

Разрез этот относится также к типу Q , но уже с $\mu_2 \approx 0,31 \approx \frac{1}{3,2}$ и $v_2 = 1,47$. Так как $\rho_3 = 0$, то для нанесения соответствующих трехслойных кривых необходимо использовать палетки $Q - \frac{1}{4} - 0$ и $Q - \frac{3}{7} - 0$. Согласно той же диаграмме (рис. 15) будем иметь:

при

$$\mu'_2 = \frac{1}{4}$$

$$v'_2 \approx \frac{1}{9}$$

и при

$$\mu''_2 = \frac{3}{7}$$

$$v''_2 \approx 1,1.$$

Совмещая кресты палеток $Q - \frac{1}{4} - 0$ и $Q - \frac{3}{7} - 0$ с точкой Q на бланке, наносим последовательно кривые B и B' для соответствующих значений v'_2 и v''_2 . Верхняя часть искомой четырехслойной кривой проводится путем интерполяции между кривыми A и A' ; для уточнения ее положения здесь также целесообразно перенести на бланк двухслойную кривую C с модулем $\mu_2 = \frac{0,176}{1} \approx \frac{1}{5,9}$. Для получения нижней части искомой кривой необходимо осуществить интерполяцию между кривыми B и B' . Искомая кривая, изображенная на рис. 31 сплошной линией, соответствует также рассчитанной для данного разреза кривой.

В случае, если $\rho_3 \neq 0$, для уточнения положения самой нижней асимптоты искомой кривой необходимо было бы слой, эквивалентный первым двум слоям заданного разреза, и третий слой заменить новым эквивалентным слоем по правилу точки Q . Последняя была бы смещена от точки H вверх по линии $S_{1,2,3}$ на величину, равную (по диаграмме на рис. 21) для $\mu_2 = 0,31$ и $v_2 \approx 1,477$ мм.

Прикладывая к этой новой точке Q крест палетки ρ_2 , мы должны были бы перенести на бланк кривую, конечная асимптота которой соответствует заданному ρ_4 .

Построение четырехслойной кривой типа КН

$$(\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4)$$

Построим кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 5,67; \quad \rho_3 = 1,89; \quad \rho_4 = \infty;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 3; \quad h_3 = 20; \quad h_4 = \infty.$$

Верхняя часть заданного разреза (при $h_3 = \infty$) относится к типу К для $\mu_2 = 5,67$ и $v_2 = 3$. Поэтому для построения верхней трехслойной кривой следует воспользоваться палетками серии К для $\mu_2' = 9$ и $\mu_2'' = 4$. Кроме того, так как значение заданного ρ_3 находится между $\rho_3 = \rho_1$ и $\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$, для построения должны быть использованы палетки К-9- ρ_1 , К-4- ρ_1 , К-9- $\sqrt{\rho_1}$ и К-4- $\sqrt{\rho_1}$.

По принципу эквивалентности T_2 , заданное $\mu_2 = 5,67$ заменяем на $\mu_2' = 9$, при этом

$$v_2' = \frac{T_2}{\mu_2'} = \frac{5,67 \cdot 3}{9} \approx 1,9$$

и на $\mu_2'' = 4$, при этом

$$v_2'' = \frac{T_2}{\mu_2''} = \frac{5,67 \cdot 3}{4} \approx 4,2.$$

Совмещая затем крест палетки К-9- ρ_1 с пересечением на бланке линий $\rho_1 = 1$ и $h_2 = 1$, переносим кривую А для $v_2 = 1,9$ (рис. 32). Аналогичным образом переносим также кривые из палеток: К-4- ρ_1 для $v_2' = 4,2$, К-9- $\sqrt{\rho_2}$ для $v_2' = 1,9$ и К-4- $\sqrt{\rho_2}$ для $v_2'' = 4,2$ (кривые А, В и В'). Заметим, что в данном случае можно было бы ограничиться перенесением на бланк только двух кривых В и В', которые в достаточной мере определяют положение верхней части искомой четырехслойной кривой.

Для построения трехслойной кривой, соответствующей нижней части искомой четырехслойной кривой, заменим первые два слоя

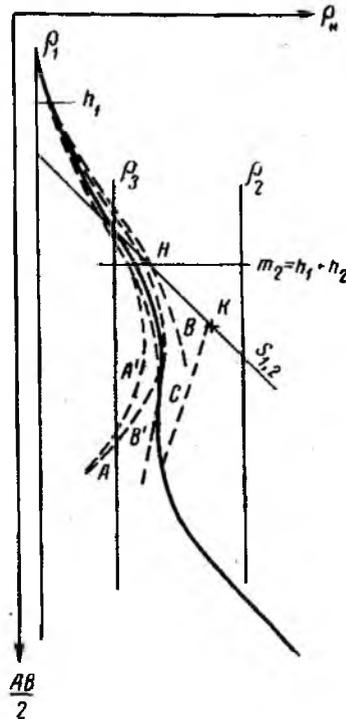


Рис. 32. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа КН.

эквивалентным слоем по правилу точки К. Для этой цели построим линии:

$$S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{3}{5,67} \approx 1,53$$

и

$$h_1 + h_2 = 1 + 3 = 4.$$

От точки пересечения этих линий откладываем вниз по линии $S_{1,2}$ отрезок, равный для $\mu_2 = 5,67$ и $\nu_2 = 3$ (см. рис. 25) 20 мм. Это будет точка К, характеризующая сопротивление и мощность эквивалентного слоя.

Теперь следует построить кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 4,4; \quad \rho_2 = 1,89; \quad \rho_3 = \infty;$$

$$h_1 = 6,8; \quad h_2 = 20; \quad h_3 = \infty.$$

Этот разрез относится к типу Н с $\mu_2 = \frac{1,89}{4,4} \approx \frac{1}{2,33}$ и $\nu_2 = \frac{20}{6,8} \approx 2,95$, при $\rho_3 = \infty$.

В данном случае значение μ_2 соответствует имеющемуся на палетке $\mu_2 = \frac{3}{7}$, и поэтому, совмещая палетку Н— $\frac{3}{7}$ — ∞ с точкой К, можно сразу нанести кривую С для $\nu_2 = 3$.

Искомая четырехслойная кривая проводится в верхней части путем интерполяции между кривыми А и А' и В и В' и затем плавно выводится на кривую С.

Кривая на рис. 32, проведенная сплошной линией, соответствует также рассчитанной для данного разреза кривой.

В случае $\rho_4 \neq \infty$ необходимо было бы построить конечную ветвь, пользуясь палеткой ρ_2 . При этом слои с $\rho_{1,2} = 4,4$ и $h_{1,2} = 6,8$ и слой с $\rho_3 = 1,89$ и $h_3 = 20$ следовало бы заменить новым эквивалентным слоем по правилу точки Н.

Построение четырехслойной кривой типа КQ

$$(\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4)$$

Построим четырехслойную кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 9; \quad \rho_3 = 1; \quad \rho_4 = 0;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 1; \quad h_3 = 2; \quad h_4 = \infty.$$

Разрез для первых трех слоев (при $h_4 = \infty$) относится к типу К при $\mu_2 = 9$, $\nu_2 = 1$ и $\rho_3 = \rho_1$. Поэтому для построения верхней трехслойной кривой можно взять палетку К—9— ρ_1 . Прикладывая крест этой палетки к точке пересечения на бланке линий $\rho_1 = 1$ и $h_2 = 1$, переносим кривую А для $\nu_2 = 1$ (рис. 33).

точностью, исходя только из нанесенных кривых А и В. Поэтому нанесем на бланк дополнительно трехслойную кривую С в предположении, что в четырехслойном разрезе совершенно отсутствует третий слой. Очевидно, что эта трехслойная кривая С (из палетки К—9—0 для $\nu_2 = 1$) может быть использована как предельная кривая, которая проходит на чертеже слева от искомой четырехслойной кривой. Последняя соответствует кривой, специально рассчитанной нами для данного четырехслойного разреза. В верхней и средней своей части она проходит между трехслойными кривыми А и С и внизу, постепенно приближаясь к кривой В, сливается с ней при больших разностях.

И, наконец, вследствие относительно небольшой мощности третьего слоя в данном примере можно было бы его заменить, по принципу эквивалентности T_2 слоем с $\rho'_3 = 9$ и $h'_3 = \frac{h_3 \rho_3}{\rho'_3} = 0,22$. Тогда мы свели бы заданный разрез к трехслойному с

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 9;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 1,22;$$

$$\rho_3 = 0; \quad h_3 = \infty.$$

Действительно, если взять кривую из палетки К—9—0 для $\nu_2 = 1,22$, то окажется, что она почти совпадает с искомой четырехслойной кривой.

Построение четырехслойной кривой типа АА

$$(\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4)$$

Построим кривую для следующего четырехслойного разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 4; \quad \rho_3 = 16; \quad \rho_4 = \infty;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 2; \quad h_3 = 6; \quad h_4 = \infty.$$

Верхняя часть этого разреза, если принять $h_3 = \infty$, соответствует трехслойному разрезу типа А при $\mu_2 = 4$, $\nu_2 = 2$ и $\rho_3 = \rho_2^2$. Поэтому для построения трехслойной кривой, соответствующей верхней части искомой кривой используем сразу кривую А для $\nu_2 = 2$ из палетки А—4— ρ_2^2 (рис. 34). Далее, заменим первые два слоя эквивалентным слоем по правилу точки А. Для этого проведем линии:

$$S_{1,2} = \frac{1}{1} + \frac{2}{4} = 1,5$$

и

$$T_{1,2} = 1 \cdot 1 + 2 \cdot 4 = 9.$$

Пересечение этих линий и даст положение точки А. Теперь остается построить трехслойную кривую для следующего разреза:

$$\rho_1 = 2,5; \quad \rho_2 = 16; \quad \rho_3 = \infty;$$

$$h_1 = 3,7; \quad h_2 = 6; \quad h_3 = \infty.$$

Этот разрез относится к типу А при $\mu_2 = 6,4$, $\nu_2 = 1,62$ и $\rho_2 = \infty$. Для того чтобы использовать кривые из палеток, заменим μ_2 и ν_2 по принципу эквивалентности S_2 на $\mu_2' = 9$ и $\nu_2' = 2,3$ и на $\mu_2'' = 4$ и $\nu_2'' \approx 1$. Совмещая затем кресты соответствующих палеток с точкой А, переносим на бланк кривую В для $S_2 = 2,3$ из палетки А—9— ∞ и кривую В' для $\nu_2'' = 1,0$ из палетки А—4— ∞ . Эти кривые почти сливаются, фиксируя, таким образом, достаточно точно положение нижней ветви искомой четырехслойной кривой.

В случае если $\rho_3 \neq \infty$, необходимо по правилу точки А найти новый слой, эквивалентный первому, ранее найденному эквивалентному слою ($\rho_1 = 2,5$; $h_1 = 3,7$) и третьему слою заданного разреза ($\rho_2 = 16$; $h_2 = 6$).

Для определения координат новой точки А следует найти точку пересечения линий:

$$S_{1,2,3} = \frac{3,7}{2,5} + \frac{6}{16} = 1,85$$

$$T_{1,2,3} = 2,5 \cdot 3,7 + 16 \cdot 6 = 105.$$

Сведя, таким образом, заданный разрез к двуслойному разрезу, уточнение конечной асимптоты искомой четырехслойной кривой осуществляется при помощи палетки ρ_3 .

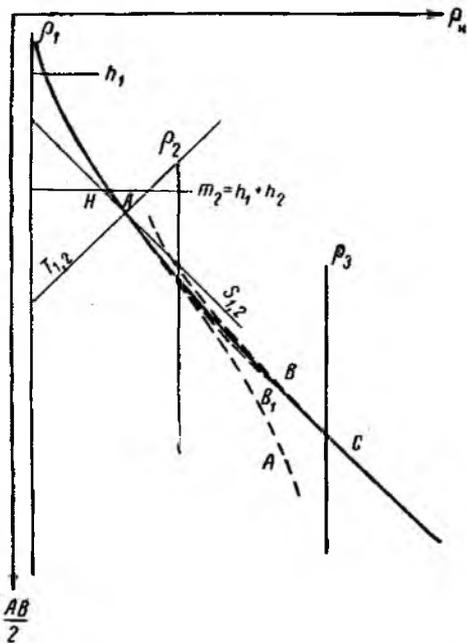


Рис. 34. Графическое построение четырехслойной кривой ВЭЗ типа АА.

Совмещая поочередно кресты палеток К—4—0 и К—9—0 с точкой A , переносим на бланк кривую B для $v'_2 = 2,7$ из палетки К—4—0 и кривую B' для $v''_2 = 1,2$ из палетки К—9—0. Искомая кривая C при интерполяции между кривыми B и B' практически сольется с кривой B . Следовательно, можно было бы ограничиться использованием только одной палетки К—4—0, так как μ'_2 и v'_2 мало отличаются от заданных величин $\mu_2 = 4,7$ и $v_2 = 2,3$. Если бы заданное $\rho_2 \neq 0$, то следовало бы положение конечной асимптоты искомой кривой уточнить при помощи палетки ρ_2 , заменив предварительно первый эквивалентный слой и третий слой заданного разреза новым эквивалентным слоем по правилу точки K .

Построение многослойных кривых различных типов

Приемы графического построения многослойных кривых по существу ничем не отличаются от описанных выше приемов построения трех- и четырехслойных кривых.

После того как будет построена четырехслойная кривая, соответствующая первым четырем слоям заданного разреза, необходимо слой, эквивалентный первым двум слоям, и третий слой заменить новым эквивалентным слоем по правилу соответствующей точки. Тогда пятислойный разрез сведется к трехслойному, в котором вторым слоем будет четвертый слой заданного разреза и третьим слоем — пятый слой разреза. Эта замена позволит нанести третью трехслойную кривую и т. д.

Отметим, что при графических построениях кривых для любых разрезов продольная проводимость S слоя, эквивалентного n -слоям разреза, во всех случаях будет равна сумме продольных проводимостей всех заменяемых слоев $\sum_1^n S$, так как все точки H , Q , K и A , определяющие сопротивления и мощности эквивалентных слоев, расположены на соответствующих линиях S .

Поперечное же сопротивление слоя, эквивалентного n -слоям разреза, определяется (при нахождении положения точек A) как сумма поперечного сопротивления n -слоя ($\rho_n h_n$) и поперечного сопротивления слоя, эквивалентного перекрывающим ($n - 1$) слоям. Для характеристики точности приемов графических построений многослойных кривых можно указать, что сопоставление двух семислойных кривых, рассчитанных, а также построенных графически, для одного и того же разреза, дало вполне удовлетворительные результаты [14].

§ 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Общие сведения

Электроразведчику как при проектировании работ, так и при интерпретации полевых материалов совершенно необходимо иметь правильное представление о соотношениях удельных электрических

сопротивлений пород, по крайней мере для исследуемого участка. Естественно, что для этой цели важно иметь представление не только об абсолютных или хотя бы об относительных значениях электрических сопротивлений тех или иных пород, но и о выдержанности этих сопротивлений на определенной площади. Иными словами, необходимо знать, в какой мере и какие именно факторы влияют на электрическое сопротивление пород.

Удельное электрическое сопротивление пород зависит в основном от следующих факторов:

- 1) удельного электрического сопротивления минералов, слагающих породы, и взаимосвязи зерен проводящих минералов;
- 2) водонасыщенности пород и сопротивления вод;
- 3) температуры.

Удельное сопротивление минералов

Главнейшие породообразующие минералы — кварц, полевой шпат, слюда, кальцит и т. п., а также каменная соль, гипс, ангидрит даже в условиях естественного их залегания, когда они в некоторой мере водонасыщены, обладают обычно очень высокими удельными сопротивлениями. Рудные минералы, за редкими исключениями, наоборот, обладают резко пониженными сопротивлениями по отношению к породообразующим минералам. При наличии непрерывной связи между зернами проводящих минералов (графита, магнетита и др.) даже при их небольшом процентном содержании, сопротивление пород резко понижается [27].

Пористость пород

Пористость породы выражают в виде отношения объема пор к объему всей породы, выраженного в процентах. Согласно многочисленным определениям, выполненным различными авторами, по значениям пористости могут быть намечены три группы пород.

1. Изверженные и метаморфические породы (габбро, гранит, диабаз, диорит, перидотит), кварцит, мрамор, кристаллическая соль. Значение пористости для пород этой группы колеблется от долей до 2—3% и лишь в редких случаях достигает 7—8%.

2. Известняки органогенные, доломиты, песчаники, сланцы, гипс, ангидрит, мел. Пористость для пород этой группы изменяется в более широких пределах, чаще всего от 1—2 до 15—25% и реже до 30—35%.

3. Глины, мергели, пески, торф и почва составляют третью группу пород, пористость которых достигает значений от 20 до 50%, а для торфа — 80%. Относительные изменения пористости для различных пород последней группы незначительны, т. е. предельные максимальное и минимальное значения пористости сравнительно мало отличаются от среднего значения пористости по ряду определений.

Очень важно отметить, что изменения пористости пород в большой мере определяют и изменение их плотности [20]. Одновременность изменения этих свойств (например, для песчаников, сланцев и известняков) представляет интерес при сопоставлении материалов электроразведки и гравиметрии.

Влагоемкость и водонасыщенность пород

Влагоемкость пород тесно связана с их пористостью и в большинстве случаев пропорциональна ей. На рис. 36 представлены графики зависимости влагоемкости ω песчаников и известняков от их пористости k_n по данным лабораторных определений. Значения влагоемкости определялись методом медленного погружения, в связи с чем, особенно при малых значениях пористости, истинная влагоемкость, вероятно, должна быть несколько больше.

Водонасыщенность породы зависит от ее влагоемкости, трещиноватости, а также от тех гидрогеологических условий, в которых находится данная порода. В частности, большую роль играет положение породы относительно зеркала грунтовых вод и водопроницаемость перекрывающих пород. В некоторых случаях, особенно при относительно крупных размерах пор, можно считать, что вода, которая может находиться в породе, будет заполнять все поры целиком. Сопротивление вод, насыщающих породы, обычно значительно ниже сопротивления сухой породы, так как последняя состоит из ряда породообразующих минералов очень большого сопротивления. Поэтому естественно, что наличие в породе воды является фактором, не только значительно уменьшающим сопротивление породы, но в основном — фактором, определяющим это сопротивление. Чем больше пористость и водонасыщенность породы, тем меньше ее сопротивление.

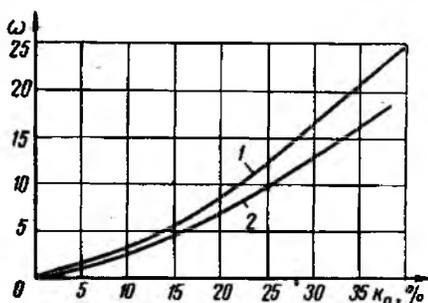


Рис. 36. Зависимость влагоемкости известняков (1) и песчаников (2) от их пористости.

Удельное сопротивление воды

Сопротивление самой воды, насыщающей породы, может быть также различно. При этом вполне понятно, что чем меньше сопротивление воды, тем в большей мере ее присутствие в породе будет уменьшать сопротивление последней.

В тех случаях, когда породы насыщены какой-либо плохо проводящей жидкостью (например, нефтью) или газом, сопротивление породы, наоборот, будет больше.

Сопротивление воды в основном определяется количеством растворенных в ней минеральных солей.

На рис. 37 приведены две диаграммы (для температуры 0 и 18° С), дающие зависимости между сопротивлением воды и количеством растворенной в ней соли (NaCl). Диаграммы даны в двойном логарифмическом масштабе.

Из рассмотрения диаграммы следует, что сопротивление раствора уменьшается пропорционально увеличению концентрации соли. Некоторое отклонение от этой пропорциональности отмечается только для растворов сильной концентрации.

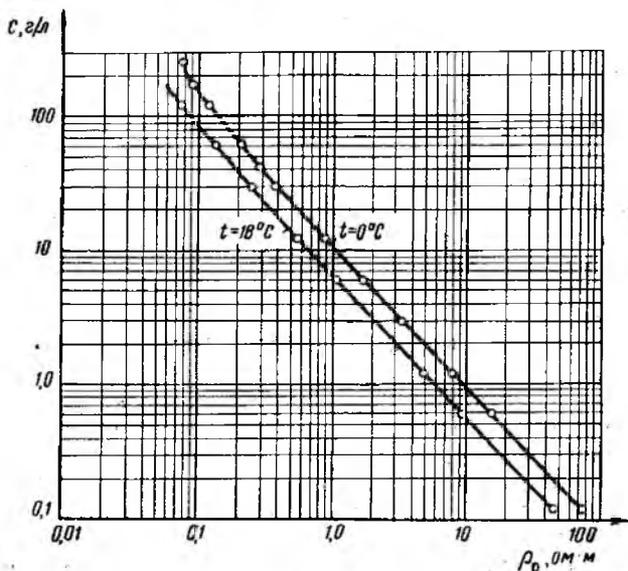


Рис. 37. Зависимость удельного электрического сопротивления воды от содержания соли (NaCl).

Известно, что сопротивления растворов других солей (например MgCl_2 , CaSO_4 , CaCO_3) близки к значениям сопротивлений раствора NaCl. В связи с этим приведенную диаграмму можно использовать с достаточной для практики точностью для определения сопротивления любых растворов, тем более, что в природных водах, по сравнению с другими солями, преобладает обычно NaCl.

Природные воды в зависимости от содержания минеральных солей обладают различными сопротивлениями. Сопротивление речных вод, по данным многочисленных определений, колеблется в пределах 60—400 Ом·м, что соответствует содержанию минеральных солей менее 0,1 г/л. Такие же значения сопротивлений отмечаются и для относительно пресных грунтовых вод.

Сопротивление глубинных вод достигает иногда очень небольших величин — 0,1 *ом·м* и менее, что соответствует сопротивлению сильно концентрированного раствора.

Сопротивление морской воды составляет 0,5—0,7 *ом·м*, что соответствует содержанию солей около 15—20 *г/л*.

И наконец, сопротивление дождевой воды вследствие незначительного содержания в ней минеральных примесей достигает 400—1500 *ом·м*. Именно в связи с этим сопротивления речных вод иногда превышают отмеченное выше предельное значение сопротивления в 400 *ом·м*.

Влияние температуры на сопротивление

При повышении температуры сопротивление раствора уменьшается. Например, сопротивление раствора при 27° С примерно в 2 раза, а при 80° С примерно в 4 раза меньше сопротивления этого же раствора при 0° С. При понижении температуры ниже 0° С, по мере того как все большая часть раствора превращается в лед, сопротивление раствора резко увеличивается.

Влияние формы и расположения пор на сопротивление

Выше было отмечено, что сопротивление главнейших породообразующих минералов велико и сопротивление горных пород определяется главным образом не их минералогическим составом, а количеством и составом насыщающей воды, обычно более низкого сопротивления. В общем случае, чем больше водонасыщенность (влажность) породы и чем больше минерализация насыщающих вод, тем сопротивление породы должно быть меньше.

В связи с тем, что влагоемкость породы, а при ее нахождении ниже зеркала грунтовых вод и влажность, зависит в большой мере от пористости породы, представляется интересным выразить зависимость отношения $\frac{\rho_{п}}{\rho_{в}}$ от пористости данной породы.

Если представить себе, что порода сложена из непроводящих минералов сферической формы, промежутки между которыми заполнены водой с сопротивлением ρ , то в зависимости от системы укладки отношение $\frac{\rho_{п}}{\rho_{в}}$ меняется. Результаты вычислений этого отношения представлены в табл. 2.

Пористость такой породы в зависимости от системы укладки будет изменяться от 26% для гексагональной до 43% для кубической укладки.

Представление о строении породы в достаточной мере схематично и в природных условиях такие значения пористости наблюдаются лишь для достаточно рыхлых пород. Кроме того, даже и в этом случае, если порода состоит из зерен различной крупности, то вследствие заполнения мелкими зернами промежутков между более

Таблица 2

Система укладки сфер	$\frac{\rho_{\pi}}{\rho_{\text{в}}}$	Примечание
Кубическая укладка	2,64	В зависимости от направления тока
Ромбическая укладка	3,38—4,4	
Гексагональная укладка	5,8	

крупными зернами значения пористости могут оказаться меньше указываемых здесь пределов. И наконец, некоторая часть мелких пор, особенно в плотных породах, бывает заполнена воздухом, что еще больше усложняет вопрос о взаимосвязи сопротивления породы и сопротивления воды в зависимости от пористости породы.

Электрическое сопротивление пород

Выше отмечалось, что пористость изверженных пород, как правило, незначительная. Если учесть, кроме того, обычно слабую минерализацию вод, насыщающих эти породы, то последние должны, очевидно, характеризоваться высокими значениями сопротивлений. Это положение хорошо подтверждается практикой, отмечающей сопротивления изверженных пород в 1000—10 000 *ом·м*, а иногда и более. Участки более трещиноватых пород, при условии их водонасыщенности, а также оруденелые изверженные породы при соответствующей структуре вкрапленности рудных минералов могут отличаться пониженными сопротивлениями по сравнению с плотными и неоруденелыми породами. Однако естественно, что сухие разрушенные трещиноватые породы будут характеризоваться очень большими сопротивлениями. Большие сопротивления отмечаются также для плотных кварцитов, мраморов, кристаллической каменной соли, а также для гипсов и ангидритов.

Сопротивления известняков, доломитов, песчаников, глинистых сланцев и т. п. обычно значительно ниже сопротивлений изверженных пород вследствие как их большей пористости, так и вследствие обычно большей минерализации вод, их насыщающих. При этом естественно, что интервалы возможных изменений сопротивления для пород этой группы вследствие больших интервалов возможных изменений пористости могут быть значительными.

И наконец, сопротивления пород последней группы, к которой были отнесены глины, мергели, пески и т. п., достигают, особенно в условиях относительно сильной минерализации насыщающих их вод, весьма низких значений, доходящих иногда до долей *ом·м*.

При оценке сопротивлений пород этой группы, особенно в связи с минерализацией насыщающих вод, необходимо различать хорошо

водопроницаемые породы (пески, галечники) и практически водонепроницаемые (глины, суглинки, отчасти мергели и т. п.). В последних вследствие отсутствия фильтрации грунтовых вод или малой ее величины воды соприкасаются с породами весьма продолжительное время и, растворяя минеральные вещества, содержат их в большем количестве, чем хорошо фильтрующие пески, галечники и т. п. Именно в связи с этим сопротивление песков и галечников, особенно при условии насыщения их атмосферными, относительно пресными водами, обычно намного превышает сопротивление глин, суглинков и даже известняков, доломитов и т. п. При условии же насыщения песков минерализованными водами сопротивление их, как и сопротивление глин, достигает также небольших величин.

Следует отметить также, что глины, суглинки, мергели и т. п. вследствие относительного постоянства их пористости могут быть отнесены к породам, сопротивление которых выдерживается или мало изменяется на больших площадях. В связи с этим определение мощности таких пород по данным ВЭЗ при прочих равных условиях может быть произведено с большей точностью, так как определенные по отдельным точкам значения сопротивлений могут быть приняты постоянными на больших площадях.

При понижении температуры пород ниже 0°C их сопротивление вследствие замерзания части воды резко увеличивается. При этом, как показал опыт ряда работ в районах вечной мерзлоты при температуре породы $5-10^{\circ}\text{C}$ ниже нуля часть воды продолжает оставаться еще в жидкой фазе, поэтому сопротивление, например рыхлых наносов, увеличивается лишь в $20-50$ раз (по отношению к их сопротивлению при $10-20^{\circ}\text{C}$).

Форма и размеры пор в породе при закономерной их ориентированности в каком-либо направлении и заполнении их водой определяют увеличение электропроводности породы в данном направлении (микроанизотропия).

В заключение данного раздела необходимо подчеркнуть особую важность, с точки зрения облегчения и увеличения достоверности интерпретации, подбора соответствующих геологических и гидрогеологических материалов. Это относится как к старым материалам проведенных ранее геологических работ, используемым при проектировании геофизических работ, так и к материалам текущих полевых работ. При подборе материалов, учитывая сказанное выше, необходимо обращать внимание не только на литологический состав, но и на пористость пород, их водонасыщенность, минерализацию насыщающих вод и т. п. Внимательное изучение геологических и гидрогеологических условий позволяет не только подойти к вопросу примерной оценки сопротивлений пород, но и предвидеть заранее возможность тех или иных изменений сопротивлений в пределах исследуемого участка.

§ 7. ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ρ_*

Общие положения

Описанные выше теоретические кривые ВЭЗ, систематизированные в соответствующие палетки, вычислены для случая параллельных дневной поверхности плоскостей раздела между слоями. Строго говоря, в таких условиях полевые работы проводятся очень редко. Обычно же электроразведочные работы, и в частности ВЭЗ, проводятся для определения глубины залегания того или иного горизонта, кровля которого лишь в первом приближении вблизи каждой отдельно взятой точки ВЭЗ может быть принята близкой к горизонтальной.

В связи с этим представляет большой интерес определение тех искажений формы графика ВЭЗ, которые могут быть вызваны наклонными, по отношению к дневной поверхности плоскостями раздела (контактами).

Вертикальная граница раздела двух сред

Пусть центр O установки ВЭЗ расположен над однородной и изотропной средой с сопротивлением $\rho_1 = 1$ и на расстоянии D от центра установки находится вертикальный контакт этой среды с другой также изотропной средой с сопротивлением ρ_2 .

На рис. 38 представлена палетка $CV-3-S$, вычисленная для ВЭЗ с направлением разносов, перпендикулярным к плоскости вертикального контакта двух сред с различными $\frac{\rho_2}{\rho_1}$. По оси абсцисс отложена величина $\frac{\rho_*}{\rho_1}$, а по оси ординат — величина $\frac{AB}{2}$, отнесенная к расстоянию от центра установки до контакта, т. е. $\frac{AB}{2D}$. Палетка дана в двойном логарифмическом масштабе с модулем 3,125 см.

Расчет этой палетки был произведен для бесконечно малого MN , поэтому при практическом ее использовании нужно иметь в виду, что электроды M и N во всяком случае не должны выходить за пределы первой среды ρ_1 . Рассмотрение этой палетки показывает, что влияние вертикального контакта начинает сказываться на измерениях при $\frac{AB}{2} \approx 0,5-0,6D$. Максимальные искажения формы графика, который при отсутствии второй среды (или $\rho_2 = \rho_1$) изображается прямой линией с постоянным $\rho_* = \rho_1$, наблюдается при переходе питающего электрода через контакт ($\frac{AB}{2} = D$). При $\rho_2 < \rho_1$ — значение ρ_* при $\frac{AB}{2} = D$ меньше ρ_1 и при $\rho_2 > \rho_1$ — соответствующее значение ρ_* больше ρ_1 . Минимальные значения $\frac{\rho_*}{\rho_1}$

достигают при $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 0$ величины 0,54 и максимальные значения $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ при $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \infty$ величины 1,45. При дальнейшем увеличении разносов значение ρ_x асимптотически стремится к ρ_1 .

На рис. 39 изображена палетка CV-2-S, представляющая кривые ВЭЗ с разносами, параллельными вертикальному контакту двух сред. Масштаб палетки и обозначения на ней аналогичны описанным выше для палетки CV-3-S.

Рассмотрение этой палетки показывает, что наличие вертикального контакта начинает сказываться в этом случае при разносах, несколько больших $\frac{AB}{2} \approx \approx 0,8 - 1,0D$. При дальнейшем увеличении разносов ρ_x несколько увеличивается для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ и стремится к асимптотическому значению ρ_x , которое для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \infty$ соответствует $2\rho_1$. Асимптотические значения ρ_x могут быть вычислены по формуле

$$\left(\frac{\rho_x}{\rho_1}\right)_{\frac{AB}{2} \rightarrow \infty} = \frac{2\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \rho_1.$$

При увеличении разносов для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$ значения ρ_x резко уменьшаются, достигая в соответствии с этой

формулой асимптотических значений: $\rho_x \approx \frac{1}{50,5} \rho_1$ для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{100}$, $\rho_x \approx \frac{1}{25,5}$ для $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{50}$ и т. д.

Кривые этой палетки внешне напоминают соответствующие кривые палетки ρ_2 . Однако их взаимное сопоставление показывает, что если совмещать соответствующие значения $\rho_x = 1$ и асимптотические ветви кривых на этих палетках, то промежуточные ветви кривых палетки CV-2-S окажутся смещенными вправо от соответствующих ветвей палетки ρ_2 . Сопоставление с палетками для горизонтальных слоев могло бы иметь место лишь при условии предпо-

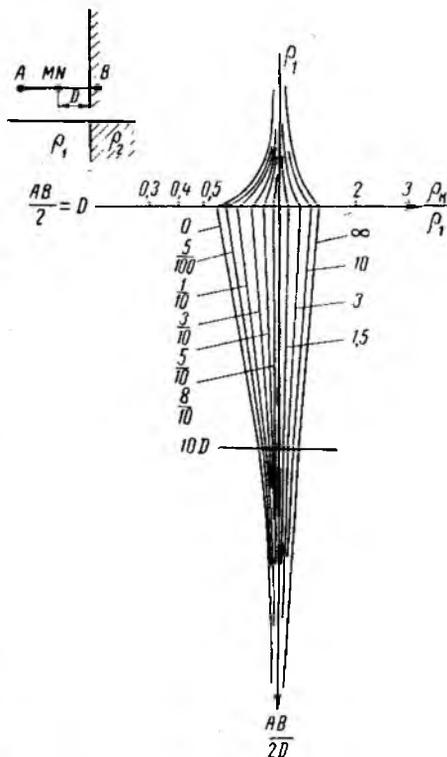


Рис. 38. Палетка CV-3-S.

ложения о наличии трехслойной структуры и применения палеток типа $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ (при $\rho_3 > \rho_1$) для кривых палетки CV-2-S с $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ и типа $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ для кривых палетки CV-2-S с $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$.

Таким образом оказывается, что вертикальный контакт двух сред, даже при условии, что электроды *M* и *N* не переходят

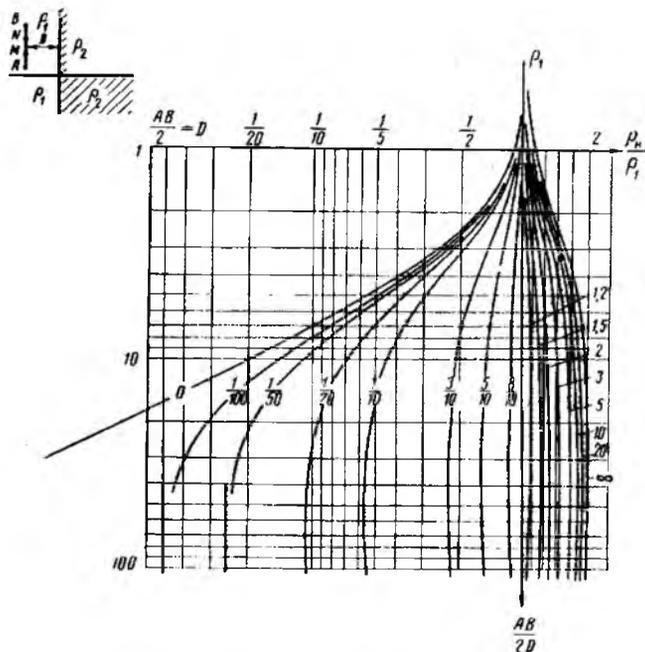


Рис. 39. Палетка CV — 2 — S.

через контакт, может довольно резко отразиться на результатах измерений, особенно при направлении разносов, параллельном контакту при $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$.

Физический смысл этого явления заключается в следующем: при достаточно больших разносах $\frac{AB}{2D}$, направление которых перпендикулярно контакту, направление токовых линий близко к перпендикулярному к плоскости контакта, а эквипотенциальные поверхности почти совпадают с плоскостью контакта. Поэтому при разносах, перпендикулярных контакту, относительно небольшое искажение графика ρ_x должно отмечаться лишь при переходе питающего электрода через контакт.

Аналогичные рассуждения для случая, когда направление разностей параллельно плоскости вертикального контакта, приводят к выводу, что увеличение разностей не может в этом случае уменьшить искажающее влияние, связанное с наличием этого контакта. Значительная часть тока будет стремиться пройти по хорошо проводящему второму слою (явление обтекания), находящемуся в стороне от центра установки. Вследствие этого плотность тока в центре установки будет уменьшена, по сравнению со случаем отсутствия второй среды. Уменьшение это будет тем больше, чем меньше отношение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Естественно, что уменьшение плотности тока вызовет уменьшение градиента потенциала в центре установки и, следовательно, соответственно уменьшит получаемое значение ρ_x .

Таким образом, на основании рассмотрения этих палеток следует считать, что особенно резкое искажение результатов измерений будет иметь место при наличии хорошо проводящей среды (или тела), находящейся вблизи от центра установки, разности которой параллельны контакту. При этом влияние этой среды практически незаметно лишь при $\frac{AB}{2D}$, не превышающем расстояния D от центра этой установки до контакта. Если сопротивление второй среды больше сопротивления первой среды, в пределах которой находится измерительная установка, то эти искажения будут значительно меньше. Однако при больших $\frac{AB}{2D}$ асимптотическое значение ρ_x будет все же отлично от ρ_1 . При расположении установки перпендикулярно контакту, если электроды M и N остаются в пределах первой среды, искажение результатов измерений будет иметь место лишь при переходе питающего электрода через контакт.

При дальнейшем увеличении $\frac{AB}{2D}$ асимптотическое значение ρ_x , вне зависимости от $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, стремится к ρ_1 .

Предположим теперь, что среда с сопротивлением ρ_2 на некотором расстоянии от контакта сменяется вновь средой с сопротивлением ρ_1 , иными словами мы имеем вертикальный пласт ρ_2 , заключенный в среде ρ_1 ($\rho_2 > \rho_1$). В этом случае на кривой ВЭЗ при подходе питающего электрода к пласту мы будем наблюдать сначала соответствующее увеличение ρ_x . В дальнейшем, при перемещении электрода в пределах пласта (подход ко второй границе раздела) значение ρ_x будет соответственно уменьшаться (до величин, меньших ρ_1). Наконец, при выходе электрода из пласта вновь в среду с сопротивлением ρ_1 значение ρ_x будет опять увеличиваться и асимптотически приближаться к ρ_1 .

В заключение следует заметить, что если при вертикальном зондировании вблизи контакта необходимо в соответствии с поставленными задачами получить надежную асимптотическую ветвь кривой ρ_x (при $AB > 2D$), то следует, безусловно, отдать предпочтение установке с перпендикулярным к плоскости контакта направлением

разносов, если электроды M и N остаются в пределах первой среды. Для получения же надежной кривой с малыми AB ($AB > < 2D$) целесообразнее использовать установку с разносами, параллельными контакту.

В ряде случаев, хотя бы для приближенного учета подобных искажений, целесообразно проводить измерения с несколькими направлениями разносов.

Наклонная граница раздела двух сред

Рассмотрим более общий случай бокового влияния, когда угол наклона границы раздела двух сред заключается между 0 и 90° .

Этот случай, несмотря на то, что боковые влияния здесь будут значительно меньше, чем для случая вертикального контакта, представляет большой практический интерес. Действительно, при проведении полевых работ чаще всего приходится иметь дело именно с наклонными в той или иной мере границами раздела. Поэтому весьма важно знать, какие искажения формы графика ВЭЗ могут быть отнесены за счет влияния наклона границы раздела и какие ошибки в интерпретации могут быть получены, если пренебрегать боковым влиянием.

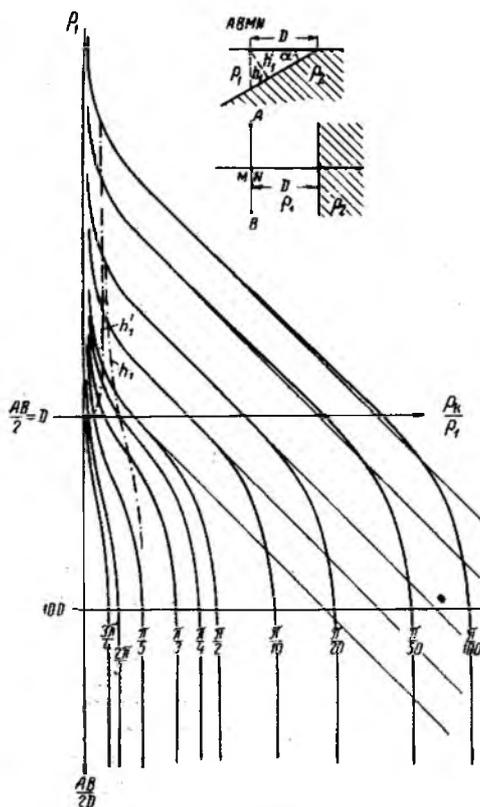


Рис. 40. Палетка $Ci-1-S$.

для различных углов α наклона границы раздела. По оси ординат отложены, как обычно, величины $\frac{AB}{2D}$, отнесенные в данном

случае к D , и по оси абсцисс — $\frac{\rho_k}{\rho_1}$. Палетка дана в двойном логарифмическом масштабе с модулем 6,25 см.

Рассмотрение палетки показывает, что даже при небольших углах наклона границы раздела кривая ρ_k при достаточно больших $\frac{AB}{2D}$ стремится к конечному асимптотическому значению. Это асимптотическое значение $\frac{\rho_k}{\rho_1}$ при $\alpha = \frac{\pi}{100}$ ($1,8^\circ$) равно $100\rho_1$, при $\alpha = \frac{\pi}{10}$ (18°) равно $10\rho_1$ и т. п. И, наконец, при $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (90°) значение ρ_k достигает $2\rho_1$.

Кроме того, характерно, как и для случая вертикального контакта, что кривые этой палетки в своей средней, промежуточной, части проходят правее соответствующих кривых палетки ρ_2 (при $\rho_1 \rightarrow \infty$), т. е. с углом наклона к оси ординат, несколько большим 45° .

На палетке, кроме линии $\frac{AB}{2} = D$, даны геометрические места точек пересечений кривых ρ_k с соответствующими для них ординатами $\frac{AB}{2}$, равными h_1 (глубина до границы раздела по вертикали) и h'_1 (кратчайшее расстояние от центра установки до границы раздела), которые показаны пунктирными линиями.

Нетрудно убедиться, что при попытке использования обычной палетки ρ_2 (рассчитанной для горизонтальной границы раздела), при совмещении последней с верхними частями кривых палетки C_i-1-S' , мы будем получать значения мощности первого слоя, близкие к h'_1 .

Таким образом, при интерпретации двуслойных кривых ВЭЗ для случая наклонной границы раздела (при $\rho_2 = \infty$) мы имеем возможность оценить помимо ρ_1 лишь кратчайшее расстояние до границы раздела (по нормали к ней). Если же пренебречь некоторым несопадением полученных кривых с соответствующими кривыми палетки ρ_2 и по асимптотическому положению кривой ρ_k пытаться оценить значение ρ_2 , то мы придем к неверным выводам, так как положение нижней асимптотической ветви кривой в данном случае определяется, кроме того, углом наклона границы раздела.

В том случае, если заведомо известно, что сопротивление второго слоя бесконечно велико по сравнению с ρ_1 ($\frac{\rho_2}{\rho_1} > 100$), пользуясь палеткой C_i-1-S , можно определить угол наклона границы раздела, с помощью которого, зная h'_1 , легко вычислить глубину залегания второго слоя, отсчитываемую по вертикали от центра установки. Наличие ВЭЗ, выполненных хотя бы в нескольких точках, позволит проконтролировать данные угла наклона. В частности, может быть рекомендована [9] методика построения на разрезе границы раздела в виде касательной к дугам, проведенным из соответствующих точек на дневной поверхности с радиусом h'_1 (рис. 44).

На рис. 42 представлены аналогичные палетки [2], вычисленные также для установки, расположенной параллельно наклонной границе раздела, при конечных значениях $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 4; 9; 19$ и 39. Рассмотрение этих палеток приводит к тем же выводам, что и для случая $\rho_2 = \infty$ и, в частности, лишний раз доказывает, что в условиях наклонной границы раздела двух сред положение конечной асимптоты кривой ρ_x зависит не только от ρ_2 (как для случая $\alpha = 0^\circ$), но и от угла наклона α .

Если ρ_2 известно, то с помощью этих палеток по одной точке ВЭЗ могут быть определены ρ_1 , h'_1 и α . Отсюда, при надобности, легко определить истинную глубину (h_1) залегания второго слоя, отсчитываемую по вертикали.

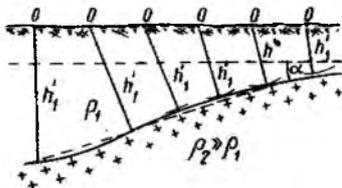


Рис. 41. К определению угла наклона границы раздела.

Если значение ρ_2 неизвестно, то к решению поставленной задачи можно подойти, лишь используя ряд точек ВЭЗ, поставленных на различных расстояниях от выхода границы раздела на дневную поверхность. Определяя по соответствующим графикам ВЭЗ примерное значение h'_1 для каждой точки и строя разрез (см. рис. 40), можно определить величину α , знание которой позволит использовать для оценки ρ_2 соответствующие кривые из данных палеток.

Для облегчения этих операций может быть использована сводная диаграмма (рис. 43), дающая для различных $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ асимптотическое значение $\frac{\rho_x}{\rho_2}$ (при $AB \rightarrow \infty$) в зависимости от α . По оси абсцисс здесь отложены значения $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ (при $AB \rightarrow \infty$) в логарифмическом масштабе и по оси ординат — значения угла α в арифметическом масштабе. Асимптотические значения $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 4$ взяты непосредственно с приведенных палеток. Для остальных значений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ величины $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ найдены при некоторых упрощающих предположениях.

При $\alpha = 0$ асимптотические значения $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ равны ρ_2 и постепенно, с увеличением α до 90° , приближаются к ρ_1 . При этом для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ при увеличении α наблюдается довольно резкое уменьшение $\frac{\rho_x}{\rho_1}$, в то время как $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$ соответствующее увеличение $\frac{\rho_x}{\rho_1}$ незначительно. Другими словами, асимптотическое значение $\frac{\rho_x}{\rho_1}$

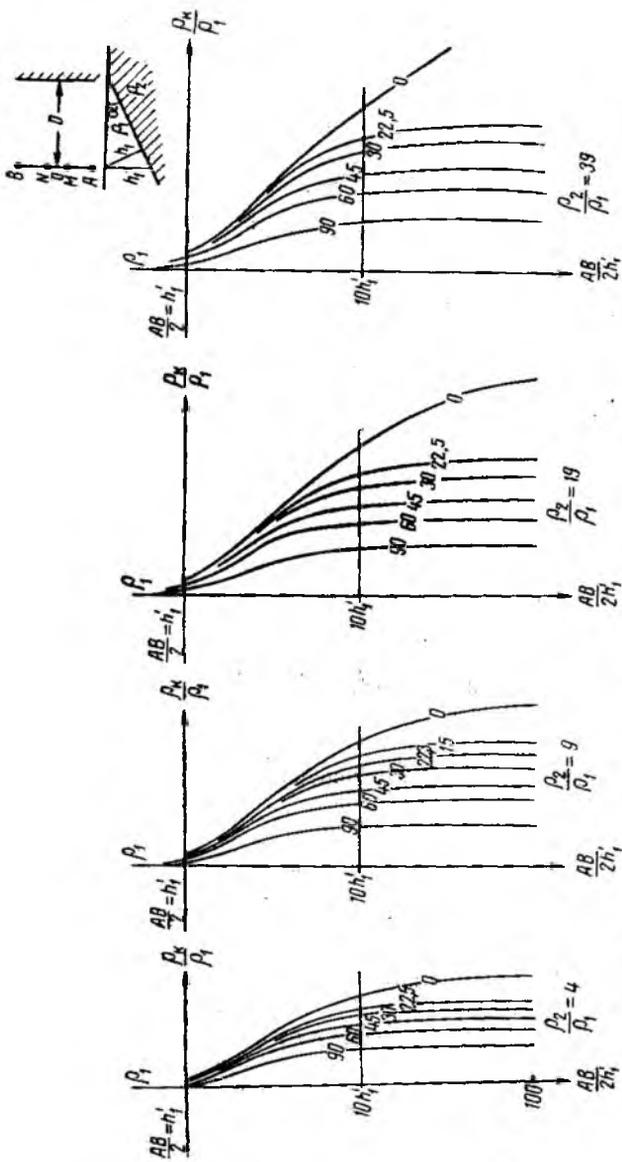


Рис. 42. Палетка для наклонной границы раздела при конечных значениях $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$.
Шифр кривых — угол наклона границы раздела α .

значительно отличается от ρ_2 для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ и сравнительно мало отличается от ρ_2 при $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$. Последнее обстоятельство уже отмечалось нами выше, при описании палетки CV-3-S. Диаграмма дает возможность определить любую из величин $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, α и $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ (при $AB \rightarrow \infty$), если две другие известны. В частности, если угол α определен путем построения разреза (рис. 40), то по значению $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ (при $AB \rightarrow \infty$) для какой-либо точки ВЭЗ, зная α , нетрудно определить отношение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$. Отсюда, зная ρ_1 , можно оценить непосредственно величину ρ_2 .

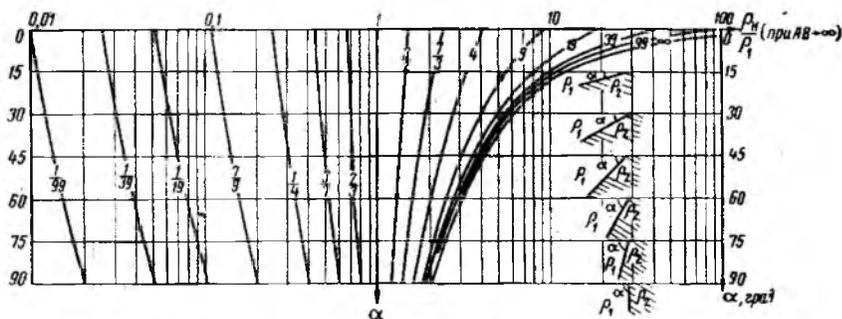


Рис. 43. Диаграмма для определения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ при различных углах α .

Боковое влияние непроводящих пород

При работе в полевых условиях часто приходится иметь дело с боковым влиянием непроводящих пород, находящихся на некотором расстоянии от центра измерительной установки. Материалы, приведенные в предыдущих параграфах, относятся к более простому случаю, когда мы имеем дело лишь с одной границей раздела между двумя средами. В данном параграфе будут даны некоторые соображения о возможности учета бокового влияния непроводящих пород для более сложных случаев.

Пусть мы имеем двуслойную среду с $\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$ и ρ_2 ($h_2 \rightarrow \infty$). При большой протяженности этих слоев в горизонтальном направлении кривая ВЭЗ, проведенного в этих условиях, будет соответствовать двуслойной кривой из палетки ρ_2 для данного $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Предположим теперь, что на расстоянии D от центра установки, параллельно направлению разностей последней, находится вертикальная граница раздела третьего слоя с бесконечно большим сопро-

тивлением (рис. 44). Такие условия очень часто встречаются при проведении полевых работ в долинах рек, один из коренных берегов которых представлен, например, круто падающими породами высокого сопротивления. При конечном, но достаточно большом сопротивлении этих пород можно пренебречь влиянием верхней части этих пород, находящихся выше границы раздела первый слой — воздух, и свести разрез к рассматриваемой здесь схеме.

Пусть $\rho_1 = 1$; $h_1 = 1$; $\rho_2 = 4$ и $D = 5h_1$. Искомая кривая ВЭЗ в верхней своей части будет соответствовать обычной двухслойной кривой для данного $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 4$ (рис. 45, кривая а). Можно полагать, что

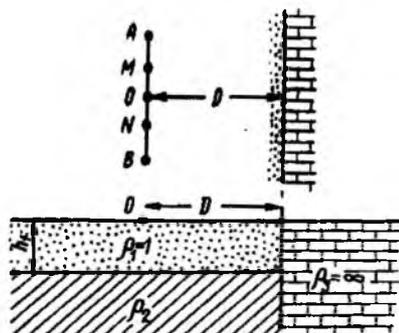


Рис. 44. Среда с вертикальной границей раздела третьего слоя.

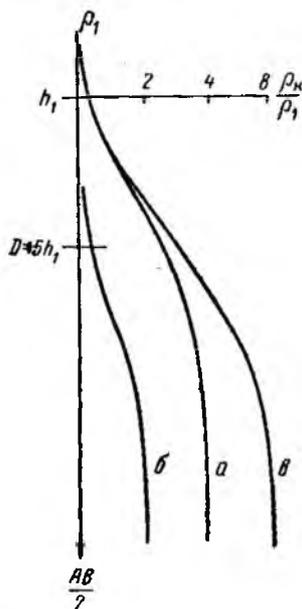


Рис. 45. Искажение двухслойной кривой ВЭЗ при боковом влиянии непроводящих пород в случае одной вертикальной границы раздела.

наличие вертикального контакта начнет отражаться на кривой ρ_k лишь при $\frac{AB}{2} \approx D = 5h_1$, как это было для простейшего случая (см. рис. 39) вертикального контакта (рис. 45, кривая б). При очень больших разносах ($\frac{AB}{2} > D$) следует полагать, что влияние вертикального контакта увеличит асимптотическое значение $\rho_{\infty} = \rho_2 = 4$ в два раза, т. е. значение $\frac{\rho_k}{\rho_1}$ (при $AB \rightarrow \infty$) будет равно $2\rho_2 = 3\rho_1$ (рис. 45, кривая в).

Таким образом, для получения грубого представления о характере боковых влияний [26] можно просто увеличить значения ρ_{∞} для обычной двухслойной кривой с заданным $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, начиная при-

мерно с $\frac{AB}{2} = D$, на величины $\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_1}$, взятые для различных $\frac{AB}{2D}$ из соответствующей палетки для вертикального или наклонного контакта.

Для проведения уверенной интерпретации необходимо, чтобы расстояние до вертикального контакта было по крайней мере в 10—20 раз больше глубины залегания кровли исследуемого горизонта.

Разберем второй случай — наличие двух вертикальных границ раздела при большом сопротивлении подстилающего слоя (рис. 46).

Если ширина долины $2D$ намного превышает h_1 , то при зондировании с разностями вдоль долины мы получим обычную двуслойную кривую ($\rho_2 = \infty$), по которой легко оценить h_1 (сплошная кривая на рис. 47).

Путем сравнительно несложных вычислений [25] нетрудно вывести уравнение для предельного асимптотического положения кривой ВЭЗ (при $AB \rightarrow \infty$) в рассматриваемом случае:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{\pi l^2}{2h_1 D} \rho_1,$$

где $l = \frac{AB}{2}$.

При этом оказывается, что для каждого из заданных h_1 и D ко-

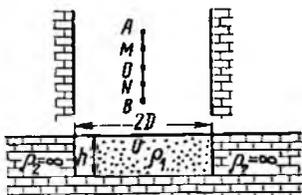


Рис. 46. Среда с двумя вертикальными границами раздела.

нечная асимптота будет представлена в виде прямой линии с угловым коэффициентом 2, что соответствует наклону линии по отношению к оси ординат 64° . На рис. 47 представлено положение этих асимптотических ветвей кривых ВЭЗ для различных отношений ширины долины $2D$ к мощности первого слоя h_1 по вертикали и примерное положение верхних ветвей (пунктир) соответствующих кривых ВЭЗ.

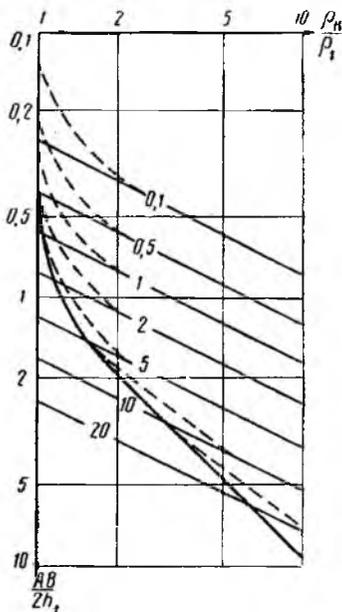


Рис. 47. Искажение двуслойной кривой ВЭЗ при боковом влиянии непроводящих пород в случае двух вертикальных границ раздела.

Шифр кривых $\frac{2D}{h_1}$.

Рассмотрение кривых показывает, что при ширине долины $2D$, меньшей 5—10-кратной мощности наносов ($2D < \frac{1}{5} h_1$), удовлетворительная оценка глубины залегания слоя высокого сопротивления (по вертикали) не может быть сделана.

Боковое влияние проводящих пород (явление обтекания тока)

Выше отмечалось, что наличие вертикального или наклонного контакта двух сред при расположении установки параллельно контакту над средой высокого сопротивления отражается на форме графика ВЭЗ особенно резко. Аналогичные условия при проведении полевых работ встречаются в том случае, если точка ВЭЗ расположена над куполом (или антиклиналью), ядро которого сложено породами высокого сопротивления, а перекрывающие породы (над куполом и на его склонах) обладают пониженным сопротивлением.

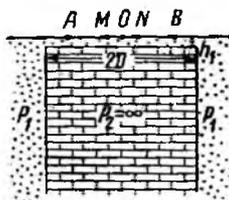


Рис. 48. Схема среды.

Рассмотрим простейшую схему такого купола в виде пласта с вертикальными границами раздела и примем для простоты рассуждений, что $\rho_2 = \infty$. Пусть мощность h_1 пород, перекрывающих купол (рис. 48), значительно меньше мощности ($2D$) самого купола (пласта). Тогда естественно, что верхняя часть графика ВЭЗ, произведенного над куполом, будет соответствовать обычной двуслойной кривой для $\rho_2 = \infty$, по которой легко может быть оценена мощность h_1 перекрывающих пород. При дальнейшем увеличении разносов AB , по мере того как питающие электроды A и B будут приближаться к краям купола, часть токовых линий будет выходить за его пределы и обтекать купол по более проводящим боковым породам, вдали от центра установки. Вследствие этого плотность тока непосредственно над куполом уменьшится, что приведет к уменьшению измеряемого ρ_x . Таким образом, на кривой ВЭЗ по мере приближения к краям купола будет наблюдаться уменьшение ρ_x , вызванное обтеканием части тока по более проводящим боковым породам, вдали от центра установки. Максимальное уменьшение ρ_x (минимум ρ_x на кривой ВЭЗ), как это было для случая установки, перпендикулярной одному вертикальному контакту (см. рис. 38), должно наблюдаться при расположении питающих электродов над краями купола, т. е. при $\frac{AB}{2} = D$. Нетрудно показать, что при разносах $\frac{AB}{2}$, достаточно больших по сравнению с размерами купола, положение нижней асимптотической ветви кривой ВЭЗ может быть выражено уравнением:

$$\frac{\rho_x}{\rho_1} = \frac{AB}{2D}.$$

Другими словами, конечная ветвь кривой ВЭЗ должна быть представлена в виде прямой линии, наклоненной к оси ординат под углом 45° . Положение этой линии будет характеризовать размеры купола (его мощность $2D$). При этом, ордината точки пересечения этой линии с абсциссой, равной ρ_1 , будет численно соответствовать половине мощности пласта D .

Таким образом, при наличии боковых хорошо проводящих пород на графике ВЭЗ мы должны наблюдать минимум ρ_x , связанный с обтеканием тока по боковым породам. Аналогичное уменьшение ρ_x будет наблюдаться на кривой ВЭЗ при направлении разносов вдоль этого пласта. Однако в этом случае начиная примерно с $\frac{AB}{2} = D$ мы будем наблюдать непрерывное уменьшение ρ_x до некоторого предельного асимптотического значения, вообще говоря, близкого к ρ_1 .

Следовательно, при расположении установки вкострест простирающегося пласта высокого сопротивления на кривой ВЭЗ наблюдается минимум ρ_x , положение которого определяется мощностью пласта ($\frac{AB}{2} = D$). При расположении же установки вдоль пласта наблюдается, начиная примерно с $\frac{AB}{2} = D$, постепенное уменьшение ρ_x . Это обстоятельство требует особой осторожности при интерпретации графиков ВЭЗ, произведенных в условиях наличия боковых более проводящих пород.

В частности, в полевой практике были примеры, когда уменьшения ρ_x , связанные с обтеканием токов, ошибочно объяснялись наличием проводящего слоя на глубине.

Для установления наличия таких искажений следует прежде всего рекомендовать сопоставление результатов по ряду точек ВЭЗ, произведенных в исследуемом районе. Пусть, например, на основании ряда точек ВЭЗ, произведенных на нескольких профилях (с разносами по профилю), установлено, что перпендикулярно направлению этих профилей проходит круто падающая граница раздела двух сред с сильно отличающимися сопротивлениями. В этом случае, естественно, что график ВЭЗ, полученный в результате обработки измерений, выполненных над хорошо проводящей средой при $\frac{AB}{2}$, равном расстоянию от центра установки до границы раздела, может иметь относительно небольшой максимум ρ_x , связанный с влиянием этого контакта. Но в том случае, если этот максимум действительно вызван наличием контакта двух сред, то на других графиках ВЭЗ при соответствующих разносах ($\frac{AB}{2} = D$) мы также должны наблюдать аналогичные максимумы ρ_x . Совпадение $\frac{AB}{2}$ в точке максимума ρ_x с расстоянием до контакта, если оно наблюдается по ряду точек, позволяет с большей уверенностью относить это за счет влияния контакта.

Аналогичные рассуждения могут быть проведены для графиков ВЭЗ в точках, расположенных над плохо проводящей средой, где именно при переходе питающего электрода через контакт должен наблюдаться минимум ρ_x , который можно связывать с влиянием контакта.

В том случае, если направление границы раздела (контакта) совпадает с направлением профилей (и разностей), то только те понижения ρ_x (при расположении установки над плохо проводящим пластом) могут быть отнесены за счет бокового влияния, которые по

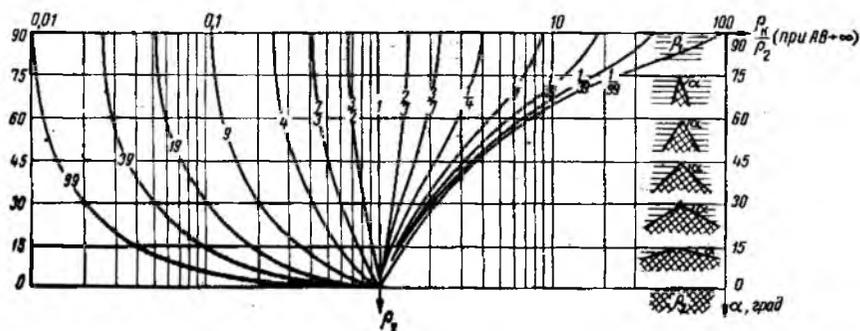


Рис. 49. Диаграмма бокового влияния проводящих пород.

Шифр кривых $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

целому ряду точек ВЭЗ начинаются при соответствующих разностях $\left(\frac{AB}{2} = D\right)$.

Для получения хотя бы грубого представления о тех искажениях, которые могут быть связаны с боковыми влияниями, можно использовать представленную на рис. 49 диаграмму, дающую значения асимптотического положения нижних ветвей графиков ВЭЗ (при $AB \rightarrow \infty$), произведенных вблизи купола. Форма этого купола принята круговой, конусообразной, с различными углами наклона α образующей купола по отношению к дневной поверхности. Кривые даны для различных отношений сопротивлений пород ρ_2 , слагающих купол, к сопротивлению перекрывающих пород ρ_1 . Расчет асимптотических значений ρ_x произведен для установки типа AMN ($B \rightarrow \infty$), при положении электрода A в вершине купола. По оси абсцисс отложены величины $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ (при $AB \rightarrow \infty$) в логарифмическом масштабе и по оси ординат — величины угла падения α в арифметическом масштабе.

В этом случае, если сопротивление пород, слагающих купол ρ_2 , меньше сопротивления перекрывающих пород ρ_1 , т. е. $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$, асимптотические значения ρ_x , особенно при небольших углах α ,

мало отличаются от ρ_2 . Для обратного случая, когда перекрывающиеся породы более электропроводны ($\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$), даже при небольших углах α , асимптотические значения ρ_k значительно отличаются от ρ_2 .

Пользуясь этой диаграммой, можно определить, если известны $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и α , асимптотическое значение $\frac{\rho_k}{\rho_2}$ (при $AB \rightarrow \infty$), устанавливающее предел максимально возможного уменьшения или увеличения ρ_k , связанных с боковым влиянием.

В том случае, если полученные графики ВЭЗ дают уменьшения или увеличения ρ_k , выходящие за эти пределы, можно полагать, что они связаны во всяком случае не только с боковыми влияниями, но и с наличием, например, соответствующего горизонта на глубине.

§ 8. ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ρ_k НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА

При расчете кривых (палеток) принято, что поверхность раздела земля — воздух представлена в виде плоскости. Фактически же очень часто приходится проводить полевые работы в условиях пересеченного рельефа (овраги, ложбины, сонки), влияние неровностей которого необходимо также учитывать хотя бы приближенно*.

При проведении ВЭЗ следует учитывать следующее. При расположении установки АМНВ перпендикулярно долине или гребню следует избегать производства ВЭЗ на дне долины при углах склона больше 20° и особенно на вершине гребня или вблизи от него, так как в этих случаях возможны значительные искажения графика ВЭЗ за счет боковых влияний. Эти искажения становятся незначительными лишь при разносах $\frac{AB}{2}$, превышающих 5—10 кратную ширину долины или гребня.

При расположении установки вблизи начала склона долины кривые ВЭЗ получаются более плавными и, если пренебречь некоторым отклонением ρ_k от истинного ρ , то производство ВЭЗ в таких условиях можно считать допустимым, особенно при углах склона меньше 20° .

При расположении установки вдоль долины искажения будут еще меньшими. Следует избегать производства ВЭЗ на склонах гребня, проходящего перпендикулярно направлению разносов, если углы его склонов превышают 20° . В этих случаях лучше изменить направление разносов, так как при установке, расположенной вдоль гребня, и при помещении центра установки на нижней части склона или вблизи от него результаты будут получены значительно менее искаженными.

* Влияние неровностей рельефа на результаты измерений ρ_k рассмотрены в работах [6, 24, 28]. (Прим. ред.).

Глава II

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ВЭЗ

§ 9. ПРИМЕНЕНИЕ ПАЛЕТКИ ρ_2 ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Двуслойные кривые

Использование палетки ρ_2 для интерпретации кривых ВЭЗ двуслойного типа принадлежит к весьма несложным операциям. В том случае, если величина начальных (минимальных) разносов $\frac{AB}{2}$ не превышает мощности первого слоя, верхняя (начальная) ветвь кривой ВЭЗ характеризует сопротивление этого слоя. Тогда, совмещая линию палетки с начальной ветвью кривой ВЭЗ ($\rho_2 = \rho_1$) путем вертикального перемещения палетки, следует добиться наилучшего совпадения последней с интерпретируемой кривой. Положение креста палетки ρ_2 после этого совмещения дает координаты точки, характеризующей сопротивление и мощность первого слоя. Положение же конечной, асимптотической ветви, по отношению к асимптотическим ветвям кривых палетки, позволит оценить ρ_2 .

Следует отметить, что точность оценки мощности первого слоя зависит от соотношения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$. При значениях $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, близких к единице, точность оценки h_1 будет наименьшей. В то же время оценка сопротивления второго слоя в этом случае производится с большей точностью, при сравнительно небольших разносах. Если сопротивление второго слоя во много раз больше или меньше сопротивления первого слоя, точность оценки h_1 увеличивается. Однако для получения достаточно верного представления о величине ρ_2 для случая $\frac{\rho_2}{\rho_1} \gg 1$, требуется увеличивать разносы до больших размеров (см. рис. 1).

Заметим также, что определив с помощью палетки ρ_2 величины h_1 и ρ_1 , мы тем самым, при надобности, можем определить продольную проводимость $S_1 = \frac{h_1}{\rho_1}$ и поперечное сопротивление $T_1 = h_1 \rho_1$ первого слоя. При этом, естественно, что положение креста палетки

ρ_2 после совмещения последней с интерпретируемой кривой даст точку, лежащую одновременно на линии S_1 и на линии T_1 .

Если начальные (минимальные) разности $\frac{AB}{2}$ оказались больше h_1 , то, используя палетку ρ_2 , можно определить лишь максимально возможную мощность первого слоя ($>h_1$) и максимально возможное ρ_2 (если $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$) или минимально возможное ρ_2 (если $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$). Если значение ρ_1 известно или оно может быть принято равным ρ_1 по соседним точкам ВЭЗ, интерпретация кривой ВЭЗ возможна. Для этой цели данная кривая должна быть сопоставлена с кривой палетки ρ_2 для соответствующего $\frac{\rho_2}{\rho_1}$. В этом случае удобнее воспользоваться палеткой ρ_2 , где значения ρ_2 отнесены к ρ_2 (см. рис. 1).

Разумеется, что указанные приемы оперирования с палеткой ρ_2 дают возможность определить истинные значения h_1 и ρ_2 лишь для случая изотропного пласта и при границе раздела, параллельной дневной поверхности.

При наличии анизотропии первого слоя значение ρ_1 , оцениваемое по кривой ВЭЗ, будет соответствовать его среднему (квадратичному) сопротивлению ρ_m , а значение оцениваемой мощности будет равно $h_1\lambda_1$. Для определения истинной мощности необходимо сопоставление данных ВЭЗ с какими-либо другими данными, дающими истинную мощность первого слоя в соответствующей точке (шурф, скважина). Тогда отношение мощности, оцениваемой по данным ВЭЗ, к истинной мощности по данным шурфа или скважины даст величину коэффициента анизотропии λ_1 .

$$\lambda_1 = \frac{h_1\lambda_1}{h_1}$$

При наличии наклонной или вертикальной границы раздела первого и второго слоя по кривой ВЭЗ может быть определено лишь примерное значение кратчайшего расстояния до границы раздела h'_1 , а относительно точное значение ρ_2 определено быть не может, так как положение конечной, асимптотической ветви кривой ВЭЗ в этом случае зависит не только от ρ_2 , но и от угла наклона α . Однако при использовании ряда точек ВЭЗ можно определить примерное значение угла α , зная который, можно определить и ρ_2 .

Трехслойные кривые

Описанная выше методика оперирования с палеткой ρ_2 справедлива лишь для случая двуслойной структуры.

Палетка ρ_2 широко используется при интерпретации многослойных кривых ВЭЗ с целью:

- 1) определения сопротивления и мощности первого слоя;

2) выяснении характера электрического разреза, особенно в случае небольшой мощности второго слоя и его нечеткого проявления на кривой;

3) приближенной оценки сопротивлений второго и третьего слоев для выбора трехслойных палеток при интерпретации.

Сопротивление и мощность первого слоя трехслойного разреза могут быть определены по трехслойным теоретическим кривым. Однако практически более удобно и точно значения h_1 и ρ_1 определять по двухслойной палетке, особенно в случаях резко изменяющегося сопротивления первого слоя.

Внешнее сходство кривой ВЭЗ с двухслойными кривыми не может служить доказательством того, что электрический разрез для данной точки действительно двухслойный. В самом деле, рассмотрение теоретических трехслойных кривых (из палеток) показывает, что в ряде случаев кривые, соответствующие трехслойному разрезу, внешне не отличаются от соответствующих двухслойных кривых.

Трехслойные кривые типа Н при небольших мощностях второго слоя мало отличаются от двухслойных кривых типа $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$.

Трехслойные кривые типа А даже при мощностях второго слоя, превышающих мощность первого слоя, мало отличаются от двухслойных кривых такого же типа ($\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$).

Наконец, трехслойные кривые типа К при небольших мощностях второго слоя и кривые типа Q при несколько больших мощностях второго слоя (до $h_2 = 1$ или $2h_1$) также мало отличаются от двухслойных кривых типа $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$. В связи с этим необходимо определить характер и величину ошибок в оценке мощностей, которые будут получены при интерпретации таких трехслойных кривых с помощью палетки ρ_2 , если пренебрегать наличием второго слоя. Рассмотрим несколько примеров.

Кривые типа Н. Пусть мы имеем следующий трехслойный разрез:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = \frac{1}{4}; \quad \rho_3 = \infty;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = \frac{1}{5}; \quad h_3 = \infty.$$

Соответствующая этому разрезу кривая (из палетки Н — $\frac{1}{4} - \infty$) изображена на рис. 50 сплошной линией. Мощность первого слоя h_1 и глубина залегания подошвы второго слоя ($h_1 + h_2$) отмечены на

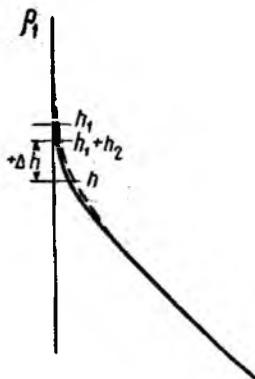


Рис. 50. Пример возможной ошибки интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа Н по двухслойной палетке.

чертеже соответствующими линиями. Если же считать, что эта кривая, внешне сходная с двуслойной кривой, соответствует двуслойному разрезу, и оценить глубину залегания слоя высокого сопротивления с помощью палетки ρ_2 , совмещая начальные и конечные ветви кривых, то окажется, что мы получим преувеличенную, по сравнению с истинной, на 50% глубину (отмеченную на чертеже линией h).

Попробуем оценить величину ошибки, которая может быть получена при интерпретации таких кривых типа Н для общего слоя в зависимости от $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $v_2 = \frac{h_2}{h_1}$. Фактически для трехслойной кривой типа Н положение асимптотической ветви определяется продольной проводимостью первых двух слоев:

$$S_{1,2} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}.$$

При совмещении такой кривой с палеткой ρ_2 мы считаем, что имеется только первый слой с сопротивлением ρ_1 и при оценке его мощности получаем:

$$h = S_{1,2}\rho_1 = \left(\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}\right)\rho_1 = h_1 + h_2 \frac{\rho_1}{\rho_2}.$$

Таким образом, второй слой мы заменяем фиктивным слоем с сопротивлением, равным ρ_1 , и мощностью, во столько раз больше истинной мощности, во сколько раз ρ_1 больше ρ_2 .

Абсолютная величина этого увеличения мощности будет выражаться в виде:

$$\Delta h = h - (h_1 + h_2) = h_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} - h_2.$$

Выражая h_2 и ρ_2 в долях h_1 и ρ_1 , получим:

$$\Delta h = \frac{v_2}{\mu_2} (1 - \mu_2).$$

Отсюда может быть определена относительная ошибка (в процентах к истинной глубине $h_1 + h_2$), которую можно получить, применяя палетку ρ_2 для таких кривых типа Н.

$$\frac{\Delta h}{h_1 + h_2} = \frac{v_2 (1 - \mu_2)}{\mu_2 (1 + v_2)} \cdot 100\%.$$

На рис. 51 (слева) дана вычисленная по этой формуле диаграмма, позволяющая определить этот процент возможных ошибок в зависимости от μ_2 и v_2 . Пунктирная кривая, ограничивающая кривые для постоянных значений $\frac{\Delta h}{h_1 + h_2} 100\%$, соответствует значениям μ_2 и v_2 , при которых соответствующие трехслойные кривые становятся отличными от двуслойной кривой на 5%. Таким образом, разрезы,

величины ρ_2 и γ_2 для которых находятся левее и ниже этой предельной кривой, будут давать кривые ρ_k , отличные от двуслойной больше, чем на 5%. В этих случаях можно считать, что наличие второго слоя отмечается на кривой ρ_k , и для ее интерпретации палетка ρ_2 оказывается неприменимой.

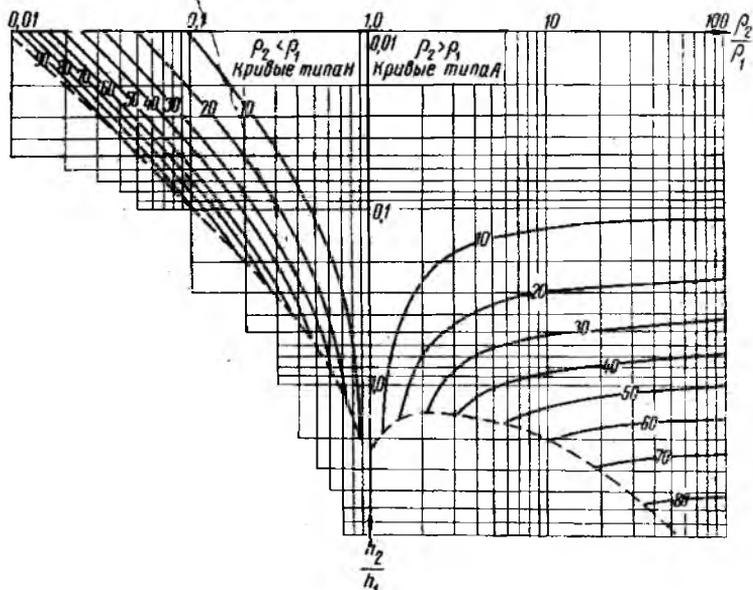


Рис. 51. Диаграмма для оценки погрешности интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ типа Н по двуслойной палетке.

$$\text{Шифр кривых } \frac{\Delta h}{h_1 + h_2} \cdot 100\%$$

Рассмотрение этой диаграммы показывает, что при наличии даже весьма маломощного ($h_2 < \frac{1}{10} h_1$) второго слоя с малым сопротивлением ($\rho_2 < \frac{1}{10} \rho_1$) применение палетки ρ_2 может дать ошибку в определении глубины залегания слоя высокого сопротивления до 50—100% от истинной глубины (в сторону преувеличения).

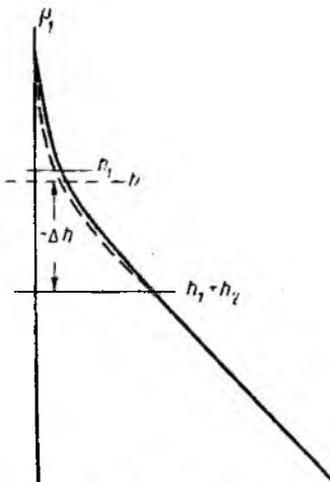
Кривые типа А. Трехслойные кривые данного типа при большей мощности второго слоя по сравнению с кривыми типа Н мало отличаются от соответствующих двуслойных кривых. На рис. 52 изображена сплошной линией кривая типа А для следующего разреза:

$$\rho_1 = 1; \quad \rho_2 = 19; \quad \rho_3 = \infty;$$

$$h_1 = 1; \quad h_2 = 2; \quad h_3 = \infty$$

Мощность первого слоя и глубина залегания подстилающего слоя отмечены на чертеже соответствующими линиями h_1 и $h_1 + h_2$. Принимая эту кривую за двуслойную и интерпретируя ее палеткой ρ_2 , мы получим глубину залегания подстилающего слоя (линия h), уменьшенную по сравнению с истинной на 62%. Здесь также можно подойти к оценке подобных ошибок в более общем случае в зависимости от μ_2 и ν_2 .

Таким образом, при интерпретации кривых типа А с помощью палетки ρ_2 , если совмещать начальные и конечные ветви кривых, мы будем получать глубину h залегания слоя высокого сопротивления, уменьшенную по отношению к истинной глубине $h_1 + h_2$. Относительная величина этого уменьшения Δh , выраженная в процентах к истинной глубине, будет равна:



$$\frac{\Delta h}{h_1 + h_2} = \frac{(h_1 + h_2) - \left(h_1 + h_2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)}{h_1 + h_2} = \frac{\nu_2 (\mu_2 - 1)}{\mu_2 (1 + \nu_2)} 100\%.$$

Рис. 52. Пример возможной ошибки интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа А по двуслойной палетке.

На рис. 51 (справа) изображены кривые, вычисленные по этой формуле, которые дают возможность определить ошибку в процентах от истинной глубины (в сторону уменьшения). Она может быть получена, если пренебречь наличием второго слоя и проводить интерпретацию палеткой ρ_2 . Пунктирная кривая, ограничивающая кривые равных величин $\frac{\Delta h}{h_1 + h_2} 100\%$, также дает

пределы значений μ_2 и ν_2 , при которых кривые ρ_x начинают отличаться от двуслойной больше, чем на 5%.

Кривые типа К. В этом случае при малых мощностях второго слоя кривые также будут мало отличаться от соответствующих двуслойных кривых (для $\rho_2 < \rho_1$). Если пренебречь наличием второго слоя и считать, что имеется только один слой, после которого сразу следует мощный подстилающий слой пониженного сопротивления, то сопоставив с кривой ρ_x палетки ρ_2 мы получим преувеличенную глубину h по сравнению с истинной глубиной $h_1 + h_2$ залегания проводящего слоя (рис. 53).

Абсолютную величину соответствующей ошибки Δh приближенно можно определить исходя из того, что второй слой мы заменяем слоем с меньшим сопротивлением и соответственно меньшей мощностью, равной $\mu_2 \nu_2$:

$$\Delta h = \mu_2 \nu_2 - \nu_2 = \nu_2 (\mu_2 - 1),$$

отсюда

$$\frac{\Delta h}{h_1 + h_2} = \frac{v_2 (\mu_2 - 1)}{1 + v_2} 100\% .$$

На основании этой формулы также может быть рассчитана соответствующая диаграмма, дающая значения ошибок в определении глубины залегания третьего проводящего слоя ($\rho_3 = 0$) с помощью палетки ρ_2 . Не приводя такой диаграммы, мы отметим лишь, что наибольшие ошибки, как и для кривых типа Н, могут быть получены при больших сопротивлениях маломощного второго слоя.

Кривые типа Q. Аналогично тому, как это отмечалось выше для кривых типа А, здесь при оценке глубины залегания третьего хорошо проводящего слоя с помощью палетки ρ_2 мы будем получать глубины h меньше истинных глубин $h_1 + h_2$, но несколько больше h_1 . В соответствии с этим, при малых мощностях второго слоя ошибка будет незначительной. Большие ошибки могут быть получены при очень малых сопротивлениях второго слоя и при относительно большой его мощности.

Приведенные здесь материалы показывают, что применение палетки ρ_2 для оценки сопротивлений и, особенно глубины залегания того или иного горизонта дает хорошие результаты лишь для случая действительно двуслойной структуры. В этом случае, если кривая двуслойного типа фактически соответствует трехслойному разрезу, применение палетки ρ_2 может дать большие погрешности. Поэтому при наличии даже только кривых двуслойного типа следует убедиться в том, что они соответствуют именно двуслойному разрезу. В этом отношении следует использовать материалы по геологоразведочным выработкам (сопоставление глубин по данным выработок и ВЭЗ, сведения о литологическом составе пород, их водонасыщенности и т. п.) и параметрическим замерам (картаж, замеры в шурфах, на дне карьеров и т. п.).

Кроме того, должны быть использованы и взаимно сопоставлены материалы по соседним точкам ВЭЗ. Может оказаться, что имеющихся материалов недостаточно для доказательства наличия промежуточного слоя и при интерпретации разрез будет принят двуслойным. Тогда, если по имеющимся геологическим соображениям можно предполагать, что промежуточный слой имеется, необходимо сделать соответствующую оговорку с указанием (хотя бы примерным), насколько истинная глубина может оказаться больше или меньше, чем это оценивается палеткой ρ_2 .

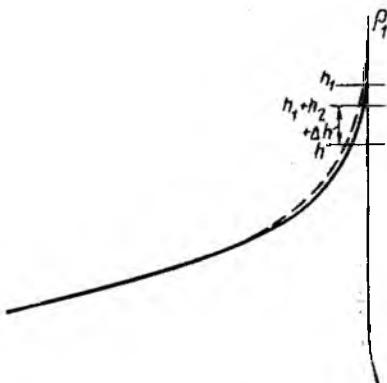


Рис. 53. Пример возможной ошибки интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ типа К на двуслойной палетке.

Таким образом, неудовлетворительные результаты применения палетки ρ_2 для интерпретации трехслойных кривых могут быть получены в том случае, если пренебрегать наличием промежуточного слоя, хотя бы и не отражающегося на графике ВЭЗ. В том же случае, если второй слой трехслойного разреза соответствующим образом отмечается на графике ВЭЗ, то с помощью палетки ρ_2 кривые ВЭЗ

могут быть иногда отнесены с достаточной уверенностью к трехслойным кривым.

В том случае, если интерпретируемая кривая имеет форму, сходную с соответствующей двуслойной кривой, и можно считать, что нижняя ее ветвь характеризует истинное сопротивление мощного подстилающего слоя, то естественно, что при ее интерпретации в первую очередь мы попытаемся использовать палетку ρ_2 . Последняя, при ее совмещении с кривой, будет наложена таким образом, чтобы совпали верхние части кривых, для возможности оценки h_1 . Если при этом окажется, что положение промежуточной (средней) ветви интерпретируемой кривой не будет совпадать с положением соответствующей двуслойной кривой, то естественно предполагать, что между первым слоем и подстилающим есть промежуточный слой, т. е.

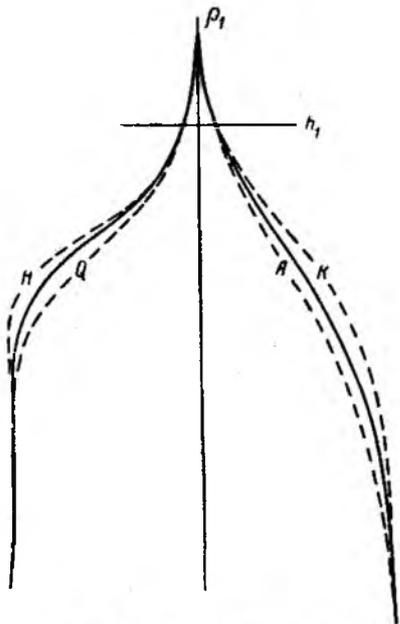


Рис. 54. Сопоставление двуслойных с трехслойными кривыми ВЭЗ разных типов.

что интерпретируемая кривая должна быть отнесена к трехслойной кривой.

На рис. 54 изображены две двуслойные кривые (сплошные) для конечных значений $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ и $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$ и трехслойные кривые (пунктирные) различных типов, верхние и нижние ветви которых совмещены с соответствующими ветвями двуслойных кривых. Здесь мы будем иметь два случая.

1. Сопротивление подстилающего слоя меньше сопротивления первого слоя. Если промежуточная ветвь интерпретируемой кривой Н окажется расположенной слева от соответствующей ветви двуслойной кривой (при $\rho_2 < \rho_1$), то это может служить признаком того, что имеется промежуточный проводящий горизонт, сопротивление которого меньше сопротивления подстилающего слоя. Другими словами, такая кривая может быть отнесена к трехслойной кривой типа Н.

Если промежуточная ветвь интерпретируемой кривой Q будет расположена вправо от соответствующей ветви двуслойной кривой (при $\rho_2 < 1$), то это может служить признаком наличия промежуточного слоя, сопротивление которого меньше сопротивления первого слоя и больше сопротивления подстилающего слоя. Такая кривая может быть отнесена к трехслойной кривой типа Q.

2. Сопротивление подстилающего слоя больше сопротивления первого слоя. Если промежуточная ветвь интерпретируемой кривой расположена вправо от соответствующей ветви двуслойной кривой, то это может служить признаком наличия промежуточного слоя, сопротивление которого больше сопротивления подстилающего слоя (трехслойный разрез типа K).

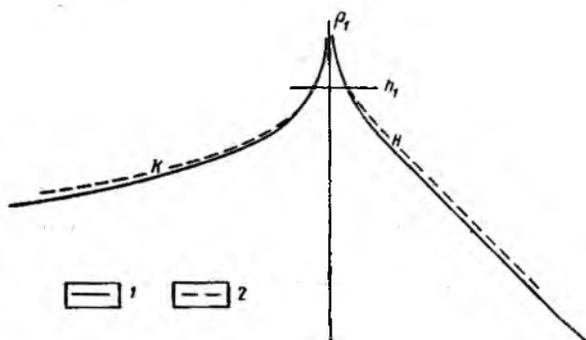


Рис. 55. Сопоставление двуслойных с трехслойными кривыми типов K и H.

1 — двуслойная кривая; 2 — трехслойные кривые.

При смещении промежуточной ветви интерпретируемой кривой влево разрез может быть отнесен к трехслойному разрезу, для которого сопротивление второго слоя больше сопротивления первого слоя и меньше сопротивления подстилающего слоя.

На рис. 55 представлены, кроме того, две двуслойные кривые для $\rho_2 = \infty$ и $\rho_2 = 0$, с верхними ветвями которых (для оценки h_1) сопоставлены трехслойные кривые типа H и K, которые вследствие малой мощности второго слоя мало отличаются от двуслойных кривых. Кривая типа H в своей нижней асимптотической части оказывается смещенной вправо и вверх, а кривая типа K — влево и вверх от асимптотических нижних ветвей двуслойных кривых. Если при совмещении палетки ρ_2 с этими трехслойными кривыми добиваться одновременно совпадения линий ρ_1 и нижних асимптотических ветвей, то окажутся смещенными промежуточные части кривых (при $\frac{AB}{2}$, близких к h_1) и кривая H (как и на рис. 54) окажется смещенной влево, а кривая K — вправо от двуслойных кривых.

Приведенные примеры наглядно показывают, каким образом палетка ρ_2 может быть использована для оценки наличия промежуточного слоя.

Оценка ρ_2 с помощью палетки ρ_2 . В тех случаях, когда мощность второго слоя трехслойного разреза настолько велика, что второй слой четко отражается (в виде максимума, минимума или перегиба) на кривой ρ_x , применение палетки ρ_2 даст возможность оценить либо один из пределов возможных значений ρ_2 и h_2 , либо — при очень мощном втором слое — весьма близкие к истинным значениям ρ_2 и h_2 . Поясним сказанное примерами.

В тех случаях, когда принцип эквивалентности для какой-либо трехслойной кривой действует в узких пределах (при очень больших значениях ν_2), совмещая палетку ρ_2 с верхней частью интерпретируемой кривой, мы сможем оценить примерное значение ρ_2 . В этом легко убедиться, совмещая, например, палетку ρ_2 с кривыми различных палеток для $\nu_2 = 24$ и $\nu_2 = 9$. При меньших мощностях второго слоя, например для кривых типа Н, такая оценка даст возможность установить некоторое ρ_2 (меньшее, чем ρ_x в точке минимума), больше которого истинное значение ρ_2 быть не может. Другими словами, отношение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, оцененное с помощью палетки ρ_2 , является в данном случае максимально возможным, т. е. истинное $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ должно быть либо равно, либо меньше найденного.

Аналогичным образом для кривых типа К может быть установлено минимально возможное значение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, которое при достаточно больших мощностях второго слоя будет близко к истинному.

Резюмируя этот раздел, показывающий возможности использования палетки ρ_2 для интерпретации трехслойных кривых, мы отметим следующие случаи.

1. Второй слой весьма маломощный. Кривая ВЭЗ практически не отличается от соответствующей двухслойной кривой. Пренебрежение наличием второго слоя может привести к крупным ошибкам в определении глубины залегания кровли мощного подстилающего горизонта.

2. Второй слой маломощный. Кривая ВЭЗ мало отличается от соответствующей двухслойной кривой. Применение палетки ρ_2 помимо оценки h_1 и ρ_2 позволяет установить наличие промежуточного слоя и тем самым предполагать наличие трехслойной структуры.

3. Второй слой значительной мощности. Наличие второго слоя достаточно четко отражается на кривой ВЭЗ в виде минимума, максимума или перегиба ρ_x . Палетка ρ_2 дает возможность определить h_1 и ρ_1 и установить возможные значения сопротивления второго слоя для подбора соответствующих трехслойных палеток.

§ 10. ТРЕХСЛОЙНЫЕ ПАЛЕТКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Палетки типа Н и их использование при интерпретации

Для удобства оперирования с палетками данного типа кривые на них совмещены таким образом, что ординаты точек H и одновременно глубины залегания третьего слоя $m_2 = h_1 + h_2$ для всех кривых каждой палетки находятся на одной линии m_2 . Такое совмещение дает возможность производить оценку наиболее интересных величин h_2 и m_2 . Кроме того, на палетках приведены следующие кривые:

- 1) кривая h_1 — геометрическое место точек пересечения кривых ρ_k с соответствующими для каждой кривой ординатами, равными h_1 ;
- 2) кривая h_2 — геометрическое место точек пересечения кривых ρ_k с соответствующими для них ординатами, равными h_2 ;
- 3) кривая S_2 — геометрическое место точек пересечения кривых ρ_k с соответствующими для них линиями S_2 ;

4) кривая $S = S_1 + S_2$ — геометрическое место точек пересечения кривых ρ_k с соответствующими для них линиями $S_1 + S_2$. На палетках типа Н— $\rho_2 - \infty$ линия S не дана, так как определение S может быть легко осуществлено по положению конечной асимптоты кривой, которая для этого случая соответствует линии $S = S_1 + S_2$.

Если мы имеем кривую, соответствующую трехслойному разрезу типа Н, то необходимые для сопоставления с ней палетки выбираются следующим образом.

1. По положению конечной асимптоты полученной кривой делают грубую оценку сопротивления подстилающего (третьего) слоя по сравнению с сопротивлением первого слоя. Если конечная асимптота наклонена под углом 45° к оси ординат или ρ_3 значительно превышает ρ_1 , для интерпретации должны быть использованы палетки Н— $\rho_2 - \infty$. Если значение ρ_3 близко к значению ρ_1 , следует использовать палетки Н— $\rho_2 - \rho_1$. И наконец, если $\rho_3 < \rho_1$ (но $\rho_3 > \rho_2$) используются палетки Н— $\rho_2 - \sqrt{\rho_2}$. В некоторых случаях, когда значение $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ для интерпретируемой кривой занимает промежуточное положение между значениями $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, имеющимися на палетках, необходимо использовать две группы палеток с ближайшими значениями $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ (например, Н— $\rho_2 - \infty$ и Н— $\rho_2 - \rho_1$ или Н— $\rho_2 - \rho_1$ и Н— $\rho_2 - \sqrt{\rho_2}$).

2. В зависимости от соотношения $\frac{\rho_{k \min}}{\rho_1}$ на интерпретируемой кривой среди выбранной по ρ_3 группы (или групп) палеток выбирают палетки со значением $\frac{\rho_2}{\rho_1} \leq \frac{\rho_{k \min}}{\rho_1}$.

Совмещение палеток с интерпретируемой кривой удобнее начинать с совмещения линии ρ_1 на палетке с начальной ветвью кривой, где при малых $\frac{AB}{2}$ значение $\rho_k = \rho_1$. В тех случаях, когда значения абсцисс для точек на верхней ветви интерпретируемой кривой не соответствуют истинному значению ρ_1 (при очень малых h_1) линию ρ_1 палетки необходимо располагать правее значений ρ_k при малых AB , добиваясь наилучшего совмещения верхних ветвей интерпретируемой кривой с кривыми палетки.

После этого вертикальным перемещением палетки необходимо добиться наилучшего совмещения, по крайней мере, верхней и средней (положение минимума ρ_k) частей интерпретируемой кривой с одной из кривых палеток. Некоторое несоответствие может быть допущено лишь в нижних асимптотических ветвях кривых, если значения $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ на палетке и на кривой не совпадают.

Предположим, что мы добились нужного совмещения кривых и экспериментальная кривая совпадает с какой-либо кривой палетки или расположена между двумя соседними кривыми палетки. В этом случае с помощью палетки может быть произведена (рис. 56) оценка следующих величин:

- 1) сопротивления первого слоя ρ_1 — по положению на бланке линии ρ_1 палетки;
- 2) мощности первого слоя h_1 — как ординаты точки пересечения линии h_1 палетки с экспериментальной кривой;
- 3) мощности второго слоя (h_2) — как ординаты точки пересечения линии h_2 на палетке с экспериментальной кривой при предположении, что истинное сопротивление второго слоя соответствует значению ρ_2 , отсчитываемому на бланке по положению линии ρ_2 на палетке.

Кроме того, для этого же значения ρ_2 , определяемого положением линии ρ_2 на палетке, может быть сразу определена глубина залегания третьего слоя m_2 , как ордината, соответствующая положению на бланке линии m_2 на палетке. Значение m_2 (при данном ρ_2) могло бы быть получено так же, как сумма $h_1 + h_2 = m_2$.

И наконец, положение точки пересечения экспериментальной кривой с линиями S_2 и S на палетке дает возможность сразу оценить величины S_2 и S_1 . Последние могут быть определены как отношение ординаты соответствующих точек пересечения к их абсциссе или путем проведения через эти точки пересечения линий S_2 и S (под углом 45° к оси ординат) и отсчета соответствующих значений S_2 и S обычным путем. Заметим, кроме того, что пересечение линии S с ординатой, значение которой равно m_2 , даст возможность определить положение точки H . Последняя, как мы увидим ниже, будет необходима при интерпретации многослойных кривых для разрезов, в которых первые три слоя соответствуют разрезу типа H . Естественно, что в ряде случаев нам не нужно определять все величины, которые могут быть определены с помощью палеток, тем более, что многие из них

взаимно связаны между собой. Например, если известны значения h_1 , ρ_1 , а также и $\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ и примерное значение $v_2 = \frac{h_2}{h_1}$ (индексы на используемой палетке), то величина S_2 может быть определена так:

$$S_2 = \frac{h_1 v_2}{\rho_1 \mu_2}.$$

Однако непосредственное определение S_2 с помощью палетки (по точке пересечения линий S_2 с экспериментальной кривой) исключает необходимость проведения интерполяции между имеющимися на палетках соседними значениями v_2 и, кроме того, упрощает и ускоряет определение численного значения S_2 .

Аналогичным образом следует попытаться совместить с экспериментальной кривой другие палетки для ближайших значений μ_2 (для выбранной по $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ группы палеток). Если при этом

окажется, что они также дают хорошее совмещение, то это обстоятельство будет служить доказательством применимости принципа эквивалентности S_2 в достаточно широких пределах. Для получения представления о пределах значений h_2 и ρ_2 , которые могут быть приняты для интерпретируемой кривой, можно рекомендовать нанесение на бланк (где начерчена кривая ВЭЗ) ряда точек, ординаты и абсциссы которых равны соответственно значениям m_2 и ρ_2 , оцениваемым различными палетками выбранной группы. Для оценки интервалов, в пределах которых могут приниматься те или иные значения h_2 и ρ_2 для интерпретируемой кривой, может быть использована также соответствующая диаграмма (см. рис. 8). Для этой цели, после того как с экспериментальной кривой будет совмещена какая-либо палетка, на диаграмме находится точка с абсциссой, равной модулю μ_2 палетки, и ординатой, равной значению v_2 для той кривой палетки, которая наилучшим образом совместилась с экспериментальной кривой. Положение этой точки на диаграмме даст возможность сразу определить пределы применимости принципа эквивалентности для данной кривой.

В тех случаях, когда мощность второго слоя для интерпретируемой трехслойной кривой достаточно велика и принцип эквивалентности

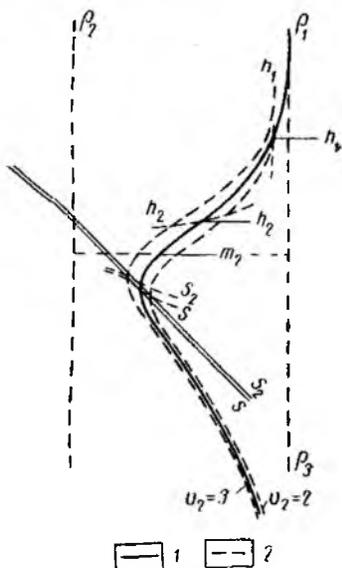


Рис. 56. Пример интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ по палетке.

1 — практическая кривая ВЭЗ; 2 — линии и кривые палетки $H - \frac{1}{3} - \rho_1$ для $v_2 = 2$ и $v_2 = 3$.

применим в относительно небольших пределах (кривые с «тупым» минимумом ρ_2), может оказаться, что при сопоставлении с ней различных палеток ни одна из них не даст нужного совмещения. В таких случаях при сопоставлении с кривой палеток следует добиваться совмещения главным образом средней части кривой (положение минимума ρ_2), пренебрегая некоторым несовпадением в верхних частях кривых.

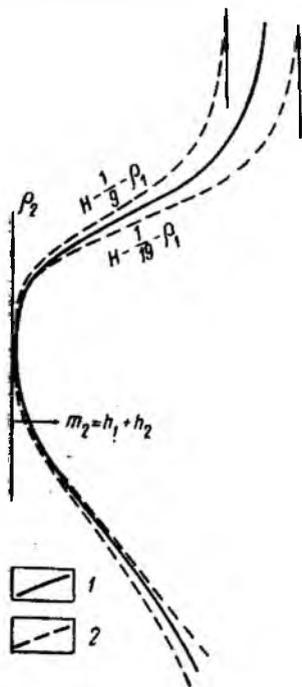


Рис. 57. Пример интерпретации трехслойной кривой ВЭЗ по палетке.

1 — практическая кривая; 2 — кривые палетки.

На рис. 57, помимо интерпретируемой трехслойной кривой, показаны пунктиром кривые палеток с ближайшими значениями μ_2 , которые дают наилучшее совпадение с интерпретируемой кривой в ее средней части. При этом по значениям μ_2 выбираются такие две палетки, чтобы верхняя часть интерпретируемой кривой располагалась при сопоставлении с одной палеткой слева, а с другой палеткой справа от соответствующих ветвей кривых палеток. Оценка m_2 и ρ_2 по обеим палеткам в случае достаточно «тупого» минимума ρ_2 на экспериментальной кривой (большие $\frac{h_2}{h_1}$) дает практически совпадающие значения m_2 и ρ_2 , близкие к истинным.

Таким образом, задача определения ρ_2 , h_2 и $m_2 = h_1 + h_2$ в этих случаях, по крайней мере для изотропных слоев, решается однозначно.

При несколько менее «тупом» минимуме ρ_2 на кривой такое сопоставление с палетками даст возможность определить лишь примерные значения ρ_2 и m_2 , так как удовлетворительное совмещение будет получаться для различных значений ρ_2 , заключающихся в некоторых пределах. Чем меньше мощность второго слоя, тем область действия принципа эквивалентности будет больше, и тогда значения h_2 и ρ_2 с той степенью точности, которая требуется от электроразведчика, не могут быть определены однозначно, и для оценки h_2 необходимо знание ρ_2 .

В тех случаях, когда совмещение кривых палетки с интерпретируемой кривой не может быть получено никаким из описанных способов, следует полагать, при условии достоверности полученных наблюдений, что данная кривая не соответствует трехслойному разрезу с параллельными дневной поверхности границами раздела.

Ввиду того, что определение ρ_2 является одной из самых ответственных операций при интерпретации ВЭЗ, ниже этот вопрос будет разобран более подробно. Заметим также, что при очень больших сопротивлениях подстилающего третьего слоя, когда нижняя ветвь графика ВЭЗ соответствует значению $S = S_1 + S_2$, определение h_2 при известном ρ_2 могло бы быть произведено без применения трехслойных палеток. Действительно, определив h_1 и ρ_1 с помощью палетки ρ_2 , можно найти $S_2 = S - \frac{h_1}{\rho_1}$, откуда $h_2 = \rho_2 \left(S - \frac{h_1}{\rho_1} \right)$. Однако применение палеток дает возможность, кроме этого, иногда оценить пределы возможных значений ρ_2 и h_2 , а также раньше отметить отклонение интерпретируемой кривой от трехслойной (вследствие появления четвертого промежуточного слоя). В связи с этим применение трехслойных палеток следует рекомендовать даже для трехслойных кривых типа Н при $\rho_3 = \infty$.

Палетки типа К и их использование при интерпретации

Для удобства оперирования с палетками данного типа кривые на них совмещены таким образом, что ординаты соответствующих точек К находятся для всех кривых каждой палетки на одной линии К. Действительно, если производить совмещение по каким-либо другим величинам (T_2 , m_2 или h_2), то асимптотические ветви кривых для различных значений v_2 пересекались бы между собой, что создавало бы неудобства при совмещении палетки с экспериментальной кривой. Совмещение же кривых таким образом, чтобы ординаты h_1 всех кривых палетки располагались на одной горизонтальной прямой, привело бы к необходимости при оценке h_2 и m_2 интерполирования между имеющимися на палетках значениями v_2 . Размещение на одной линии точек К для всех кривых дает возможность избежать подобной интерполяции и, следовательно, позволяет оценить величины h_2 и m_2 с большей точностью.

На палетках типа К даны следующие кривые:

1) кривые h_1 , h_2 и m_2 — геометрические места точек пересечения кривых ρ_x с соответствующими для каждой кривой ординатами, равными h_1 , h_2 и m_2 ;

2) кривые $S = S_1 + S_2$ и T_2 — геометрические места точек пересечения кривых ρ_x с соответствующими для них линиями S и T_2 .

Порядок совмещения палеток с интерпретируемой кривой остается аналогичным описанному выше для кривых типа Н.

В соответствии с положением нижней ветви интерпретируемой трехслойной кривой выбирается одна или две ближайшие группы палеток по значениям $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ ($\frac{\rho_3}{\rho_1} = 0$; ρ_1 или $\sqrt{\rho_2}$).

Среди палеток выбранной группы берется палетка со значениями μ_2 , близкими, но большими $\frac{\rho_{x_{\max}}}{\rho_1}$.

Совмещение кривых также начинается с совмещения сначала верхних частей кривых. Затем вертикальным перемещением палетки добиваются совмещения и средних частей кривых (положение максимума ρ_x). Естественно, что наиболее полное совмещение нижних асимптотических ветвей кривых может быть получено лишь в том случае, если $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ для экспериментальной кривой близко к соответствующим значениям выбранной группы палеток.

Если нужно совмещение экспериментальной кривой с кривой какой-либо палетки достигнуто, то имеется возможность определить следующие величины:

1) сопротивление первого слоя ρ_1 — по положению линии ρ_1 на палетке;

2) мощность первого слоя h_1 — как ордината точки пересечения кривой h_1 палетки с экспериментальной кривой ρ_x ;

3) мощность второго слоя h_2 или глубину залегания третьего слоя m_2 — соответственно как ординаты точек пересечения кривых h_2 и m_2 палетки с экспериментальной кривой ρ_x . При этом значения h_2 и m_2 определяются, исходя из предположения, что сопротивление второго слоя для экспериментальной кривой соответствует ρ_2 , оцениваемому по положению линии ρ_2 на бланке кривой;

4) значение T_2 — по точке пересечения экспериментальной кривой с кривой T_2 палетки. Численное значение T_2 равно произведению абсциссы и ординаты этой точки. Оно может быть определено также путем проведения на бланке через эту точку линии T_2 и отсчета значения ординаты точки пересечения линии T_2 на бланке с осью ординат (при $\rho_x = 1$);

5) значение $S = S_1 + S_2$ — по точке пересечения экспериментальной кривой с кривой S палетки. Проведение через эту точку линии S до пересечения с линией K на палетке позволит в случае необходимости определить положение точки K для интерпретируемой кривой.

В тех случаях, когда для интерпретируемой кривой принцип эквивалентности действует в широких пределах, естественно, что хорошее совмещение кривой может быть получено не с одной, а с несколькими палетками данной группы для различных значений μ_2 . При этом различные палетки должны дать практически одинаковые значения h_2 , ρ_1 и T_2 . Значения h_2 и m_2 в соответствии с принципом эквивалентности T_2 будут зависеть от принимаемого значения ρ_2 , уменьшаясь при увеличении ρ_2 , а положение линии S и в соответствии с этим точки K будут несколько отличаться друг от друга.

При наличии весьма «тупых» максимумов ρ_x , характерных для кривых при очень больших значениях v_2 , может оказаться, что ни одна из палеток при совмещении верхних ветвей кривых не даст нужного совпадения кривых в средней части. В этом случае необходимо добиваться совмещения средних и, если возможно, нижних частей кривых, пренебрегая некоторым несовпадением верхних ветвей кривых (аналогично, как и для кривых типа Н на рис. 57). При достаточно

больших значениях ν_2 и малых μ_2 , когда принцип эквивалентности применим в небольших пределах (см. рис. 13), такое совмещение палеток позволит оценить близкие к истинным значениям ρ_2 и h_2 (или m_2). Другими словами, в этом случае задача определения m_2 решается, по крайней мере для изотропных слоев, вполне однозначно.

При несколько меньших значениях ν_2 такой метод совмещения палеток с интерпретируемой кривой позволит определить лишь некоторые пределы возможных значений ρ_2 и h_2 : для оценки h_2 значение ρ_2 становится необходимым.

Палетки типа Q и их использование при интерпретации

С целью удобства оперирования с палетками кривые на них совмещены таким образом, что соответствующие им точки Q расположены на одной горизонтальной линии Q. Кроме того, на палетках типа Q даны кривые h_1 , h_2 , m_2 и $S = S_1 + S_2$, позволяющие определить любую из этих величин способами, описанными выше для кривых типа H и K. Заметим, что построением на бланке ВЭЗ линии S (через точку пересечения интерпретируемой кривой ρ_x с кривой S на палетке), по ее пересечению с линией Q может быть определено положение точки Q для интерпретируемой кривой, что необходимо при интерпретации многослойных кривых, если первые три слоя для них соответствуют разрезу типа Q.

Подбор необходимых для интерпретации палеток производится также в соответствии с $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, грубо оцениваемым для экспериментальной кривой. После этого среди палеток различных групп данного типа выбираются палетки со значениями $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, близкими к значению $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ для экспериментальной кривой и с различными μ_2 .

Так как принцип эквивалентности для кривых типа Q действует в меньших пределах, чем для кривых других типов, то удовлетворительное совмещение экспериментальной кривой может быть получено обычно лишь с одной, двумя и реже с несколькими палетками.

Если значение $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ на палетке значительно не совпадает с $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ для интерпретируемой кривой, то приходится пренебрегать некоторым несовпадением нижних асимптотических ветвей кривых. Однако если нижняя ветвь экспериментальной кривой достаточно хорошо характеризует сопротивление третьего слоя ($\rho_x \approx \rho_3$), то при сопоставлении этой кривой с палеткой целесообразно также попытаться совместить нижние и средние ветви кривых (участки перегиба кривых), пренебрегая некоторым расхождением верхних ветвей.

После сопоставления кривой с палеткой может быть произведена оценка следующих величин: h_2 и m_2 для ρ_2 , соответствующего положения линии ρ_2 , взятой палетки, а также значения $S = S_1 + S_2$. При необходимости приведением линии S до пересечения с линией Q определяется положение точки Q.

Если с данной кривой совмещается несколько палеток с различными μ_2 , то будет получено несколько значений h_2 , m_2 и S и положений точки Q . Возможные изменения значений h_2 или m_2 в зависимости от принимаемых при этом значений ρ_2 могут быть изображены на бланке графически, в виде кривых изменения h_2 или m_2 в функции от принимаемого ρ_2 .

При наличии достаточно четкого перегиба кривой ρ_x , который для трехслойных кривых данного типа характеризует наличие мощного второго слоя, иногда приходится пренебрегать некоторым несовпадением верхних кривых, так как при их совмещении может случиться, что ни одна из имеющихся палеток не даст нужного совмещения наиболее важных средних частей кривых (участки перегиба кривой ρ_x). Полученные при таком совмещении палеток (с двумя ближайшими значениями μ_2) значения ρ_2 и h_2 (или m_2) будут в этом случае почти одинаковы и близки к истинным ρ_2 и h_2 , что, по крайней мере для случая изотропных слоев, позволяет считать, что задача решается однозначно.

Палетки типа А и их использование при интерпретации

Совмещение кривых данного типа на палетках по тому же принципу, как и на палетках других типов, привело бы в этом случае к тому, что мало отличающиеся между собой кривые для ближайших значений ν_2 были бы расположены на значительном расстоянии друг от друга. Это обстоятельство привело бы к необходимости больших интерполяций при сопоставлении палеток с экспериментальными кривыми, а это в свою очередь привело бы к увеличению погрешностей при интерпретации.

В связи с этим кривые на палетках данного типа совмещаются таким образом, чтобы совпадали их конечные асимптоты. Так как положение этих асимптот зависит от $S = S_1 + S_2$, то для удовлетворения этому условию достаточно совместить линии S для всех кривых каждой палетки. Вследствие этого отмеченная на всех палетках этого типа линия S является общей для всех кривых каждой палетки.

Такое расположение кривых, помимо возможности более точного сопоставления палеток с интерпретируемыми кривыми и, следовательно, более точной оценки ν_2 , дает наглядное представление о неблагоприятности разрезов типа А для применения электроразведки.

На палетках даны кривые h_1 , h_2 и m_2 , позволяющие при совмещении палетки с интерпретируемой кривой оценить соответствующие величины, причем значения h_2 и m_2 , при совмещении различных (по μ_2) палеток могут получаться различными (в соответствии с принципом эквивалентности S_2) в зависимости от принимаемых значений ρ_2 . Значения же $S = S_1 + S_2$, оцениваемые по положению линии S различных палеток, не будут зависеть от принимаемых значений μ_2 и в пределах точности определений будут одинаковыми.

Все замечания, касающиеся выбора палеток и приемов их сопоставления с кривыми ρ_x , которые были приведены выше для трех-

слойных кривых других типов и особенно для кривых типа Q, остаются справедливыми и для трехслойных кривых данного типа. Следует только повторить, что однозначная интерпретация (или близкая к однозначной) может быть проведена лишь для случаев весьма большой мощности (ν_2) второго слоя, особенно при его больших сопротивлениях (μ_2).

§ 11. ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАЛЕТОК ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ КРИВЫХ ВЭЗ

Общие положения

При благоприятных соотношениях мощностей и сопротивлений отдельных горизонтов, слагающих многослойный разрез, каждый из этих горизонтов может быть отмечен соответствующим графиком ВЭЗ в виде минимума, максимума или перегиба на кривой ρ_k . При этом естественно, что при постоянном сопротивлении какого-либо горизонта он проявляется на графике ВЭЗ тем более четко, чем больше его мощность по отношению к мощности перекрывающих пород.

При неблагоприятных соотношениях мощностей и сопротивлений, наоборот, этот горизонт может настолько слабо выделяться на графике ВЭЗ, что, например, четырехслойная кривая может быть принята нами за трехслойную. При интерпретации таких кривых с помощью трехслойных палеток, без учета влияния промежуточного слоя, могут быть допущены большие ошибки в оценке мощностей и глубин. Эти ошибки будут такого же типа и такого же знака, как это отмечалось ранее для различных трехслойных кривых, внешне схожих с двухслойными кривыми при интерпретации их палеткой ρ_2 .

Это обстоятельство заставляет лишний раз подчеркнуть необходимость получения во всех случаях достаточно четких представлений об электрическом разрезе.

Опыт графического построения многослойных кривых с помощью трехслойных палеток позволяет считать, что последние могут быть использованы также и для интерпретации многослойных кривых, особенно для тех случаев, когда каждый горизонт многослойного разреза достаточно четко отражается на графике ВЭЗ. Следует отметить, что в разрезе, для которого принцип эквивалентности применим в широких пределах, для возможности оценки глубины залегания подстилающего слоя ($m_3 = h_1 + h_2 + h_3$) в общем случае необходимо знать два параметра ρ_2 и ρ_3 . В связи с этим интерпретация четырехслойных кривых оказывается более сложной и ответственной.

В тех случаях, когда мощность третьего слоя четырехслойного разреза во много раз превышает мощность перекрывающих пород и в задачу электроразведки входит определение глубины залегания

четвертого слоя, — точная оценка ρ_2 не является необходимой. Действительно, в этом случае даже относительно большие погрешности в оценке h_2 становятся несущественными при оценке $m_3 = h_1 + h_2 + h_3$, так как погрешность в определении m_3 определяется здесь главным образом погрешностью в определении h_3 .

При интерпретации четырехслойных кривых для оценки h_1 и ρ_1 , а также одного из пределов значений ρ_2 может быть использована палетка ρ_2 , которая совмещается с самой верхней частью экспериментальной кривой приемами, описанными выше. Для возможности оценки h_2 (или m_2) и ρ_2 в зависимости от соотношений $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ и $\frac{\rho_3}{\rho_2}$ применяются палетки соответствующего типа, которые выбираются и совмещаются с экспериментальной кривой также уже описанными приемами. При этом совмещении мы принимаем, что четвертого слоя в разрезе нет, а следовательно, и должны пренебречь положением нижней ветви интерпретируемой кривой, которая как раз и отражает наличие этого слоя.

Использование трехслойных палеток, сопоставляемых с верхней и средней частью четырехслойных кривых, позволяет оценить либо h_2 и ρ_2 , либо некоторые возможные пределы этих величин. В последнем случае для уверенной оценки h_2 необходимо знание ρ_2 . Для возможности оценки h_3 и ρ_3 или их пределов необходимо первые два слоя заменить одним эквивалентным слоем. Если значения μ_2 и ν_2 известны, то приемами, описанными в разделе графических построений, можно найти положение соответствующей точки (H , K , Q или A), которое определит значение сопротивления и мощности эквивалентного слоя. После этого для оценки h_3 и ρ_3 можно применить трехслойные палетки соответствующего типа, которые должны быть совмещены со средней и нижней ветвью экспериментальной кривой (пренебрегая ее верхней ветвью).

Ниже несколько более подробно будут описаны приемы оперирования с трехслойными палетками при интерпретации четырехслойных кривых различного типа.

Кривые типов НК ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) и НА ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)

Первые три слоя в разрезах данных типов соответствуют трехслойному разрезу типа Н. Поэтому для оценки h_2 и ρ_2 (или $\frac{h_2}{\rho_2}$) следует использовать палетки типа Н, кривые которых должны быть совмещены с верхней и средней частью интерпретируемой четырехслойной кривой (рис. 58, ветви a , b , s , g), где еще не сказывается влияние четвертого слоя. Это совмещение в общем случае позволяет оценить величину S_2 и некоторые пределы возможных значений ρ_2 и h_2 , а в отдельных случаях и близкие к истинным значениям ρ_2 и h_2 . Кроме этого, может быть определено положение точки H в зависимости от принимаемых значений ρ_2 . Так как положение точки H определяют пересечением линий $S = S_1 + S_2$ и $m_2 = h_1 + h_2$,

то естественно, что, поскольку S не зависит от ρ_2 и определяется однозначно, точки H для различных принимаемых значений ρ_2 будут расположены на линии S , в точках пересечения последней с линиями $m_2 = h_1 + h_2 = h_1 + S_2 \rho_2$.

Предельное положение точки H (при $\rho_2 \rightarrow 0$) можно определить точкой пересечения линии S с линией $m = h_1$, так как в этом случае $h_2 \rightarrow 0$.

Чем более точно может быть определено ρ_2 , тем более точно определяется h_2 и m_2 , а отсюда и положение точки H . Неточность в определении положения точки H отразится в некоторой мере и при последующей оценке ρ_3 .

Для оценки сопротивления и мощности третьего слоя необходимо применить палетки серии К для кривых типа НК и серии А для кривых типа НА. При совмещении выбранных палеток с интерпретируемой кривой необходимо линию ρ_1 палетки совместить с найденной точкой H и вертикальным перемещением палетки добиться наилучшего совмещения кривых палетки со средней и нижней ветвями интерпретируемой кривой (рис. 58, ветви z , d и e). После этого для значения ρ_3 , которое оценится положением линии ρ_2 , на палетке можно оценить мощность или глубину залегания подошвы третьего слоя или его поперечное сопротивление. Значение h_3 определится как ордината точки пересечения интерпретируемой кривой с кривой h_2 палетки, значение m_3 — по пересечению с кривой m_2 палетки и значение T_3 — как произведение абсциссы и ординаты точки пересечения интерпретируемой кривой с кривой T_2 палетки.

Если с кривой хорошо совмещаются другие палетки выбранной группы (для различных μ_2), то это будет говорить о широких пределах действия принципа эквивалентности и о необходимости знания ρ_3 для возможности оценки h_3 .

При достаточно большой мощности третьего слоя, по сравнению с мощностью перекрывающих пород, может оказаться, что ни одна из палеток не даст нужного совмещения с интерпретируемой кривой. В этом случае так же, как это делалось для трехслойных кривых, совмещение следует начинать с ветви кривой, характеризующей мощный третий слой (рис. 58, ветвь d). На этой ветви значения ρ_2 будут близки к истинному ρ_3 (см. рис. 57) для кривой типа Н. С помощью палеток могут быть определены в этих случаях близкие к истинным значения ρ_3 и h_3 . Неточности в оценке h_1 и h_2 не отразятся существенно на точности оценки глубины залегания подстилающего четвертого слоя (m_3).

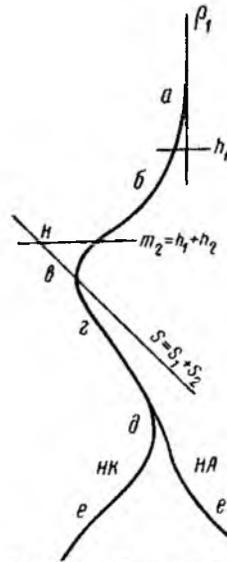


Рис. 58. Пример интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ типов НК и НА по трехслойным палеткам.

Кривые типов КН ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) и КQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)

Первые три слоя в разрезах данных типов соответствуют трехслойному разрезу типа К. В связи с этим для оценки h_2 и ρ_2 следует использовать палетки типа К. При совмещении выбранных палеток с верхней и средней частями интерпретируемой кривой (рис. 59, ветви а, б, в и г), помимо оценки h_2 или m_2 (в зависимости от ρ_2) и T_2 , необходимо определить положение точек К, соответствующих

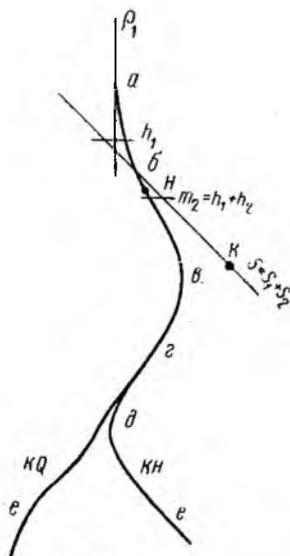


Рис. 59. Пример интерпретации четырехслойных кривых ВЭЗ типов КН и КQ по трехслойным палеткам.

различным принимаемым значениям ρ_2 . Нетрудно показать, что предельное положение точки К (при $\rho_2 \rightarrow \infty$) будет определяться примерно пересечением линии $T_{1,2}$ с линией S_1 . При относительно большой мощности второго слоя может быть определено близкое к истинному значение ρ_2 ; при малых мощностях значение ρ_2 или возможные пределы его изменения принимаются на основании данных каротажа, параметрических измерений и других ВЭЗ.

Приняв для ρ_2 некоторое значение, мы тем самым определяем положение точки К, которая необходима при определении мощности и сопротвления третьего слоя. Для этой цели используются палетки типа Н (для кривых КН) или типа Q (для кривых КQ). При совмещении интерпретируемой кривой необходимо линию ρ_1 соответствующей палетки совместить с найденной точкой К на бланке и вертикальным перемещением добиться наилучшего совпадения кривых палетки по отношению к средней и нижней ветвям интерпретируемой четырехслойной кривой (рис. 59, ветви г, д и е). После того как нужное совмещение достигнуто, по пересечению экспериментальной кривой с кривой h_2 на палетке может быть определено значение h_3 для ρ_3 положением линии ρ_2 на палетке

Необходимо отметить, что, поскольку соответствующая палетка прикладывается к точке К, значение ординаты которой всегда больше $h_1 + h_2$, при непосредственной оценке глубины залегания четвертого слоя (по пересечению экспериментальной кривой с кривой m_2 палетки), мы получили бы завышенное значение глубины, по сравнению с истинной глубиной, равной $m_3 = h_1 + h_2 + h_3$. Абсолютная величина этого завышения глубины Δm_3 будет соответствовать разности между ординатой точки К и ординатой $m_2 = h_1 + h_2$. В связи с этим, для того чтобы избежать введения этой поправки за смещение точки К (по отношению к $h_1 + h_2$), необходимо глубину залегания

четвертого слоя определять как сумму мощностей перекрывающих слоев $m_3 = h_1 + h_2 + h_3$, а не путем непосредственного отсчета ординаты точки пересечения интерпретируемой кривой с кривой m_2 на палетке.

Кривые типов QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) и QQ ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)

Первые три слоя в разрезах данных типов соответствуют трехслойным разрезам типа Q. Поэтому для оценки ρ_2 и h_2 используют палетки типа Q, при совмещении которых с интерпретируемой четырехслойной кривой мы пренебрегаем несовпадением ее нижней ветви, где влияние четвертого слоя уже сказывается.

Путем таких совмещений, помимо оценки ρ_2 и h_2 (или пределов их изменений), могут быть определены положения точек Q соответственно принимаемым значениям ρ_2 . Координаты точки Q будут соответствовать соответственно и мощности слоя, эквивалентного первым двум слоям. Напомним при этом, что мощность эквивалентного слоя h_{12} для разрезов типа Q будет меньше истинной суммарной мощности ($h_1 + h_2$) этих двух слоев.

Для определения ρ_3 и h_3 используют палетки либо типа H (для кривых типа QH), либо типа Q (для кривых типа QQ), линия ρ_1 которых совмещается с найденной точкой Q. После этого вертикальным перемещением палетки необходимо добиться наилучшего совпадения ее со средней и нижней ветвями экспериментальной четырехслойной кривой, что позволит оценить h_3 для ρ_3 соответствующего положению линии ρ_2 на палетке. Заметим, что и в этом случае для того, чтобы избавиться от необходимости введения поправки Δm_3 за смещение точки Q (по отношению к $m_2 = h_1 + h_2$), значение m_3 следует определять как сумму $h_1 + h_2 + h_3$, а не путем непосредственного отсчета ординаты точки пересечения интерпретируемой кривой с кривой m_2 на палетке.

В этом случае мы получили бы несколько меньшую глубину, по сравнению с истинной. Абсолютная величина этого преуменьшения в случае необходимости может быть определена при интерпретации верхней части кривой с помощью палеток типа Q, как по разности ординат линии Q и точки пересечения кривой m_2 палетки с экспериментальной кривой.

Кривые типов АК ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) и АА ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)

Для оценки ρ_2 и h_2 в этом случае используют палетки типа A, так как первые три слоя здесь соответствуют разрезу типа A.

Все замечания, приведенные выше, при описании методики интерпретации трехслойных кривых типа A, остаются в силе и для данного случая. Так как для разрезов типа A наличие второго слоя отражается на кривой ρ_x лишь при весьма больших отношениях $\frac{h_2}{h_1}$, то оценка ρ_2 может быть произведена обычно лишь при использовании

данных каротажа, параметрических измерений или других ВЭЗ, где этот горизонт отражается более четко.

Принятие определенного значения ρ_2 позволит путем определения $S_2 = S - S_1$ палетками оценить величину h_2 и построить точку A , координаты которой будут характеризовать сопротивление и мощность слоя, эквивалентного первым двум слоям.

Далее, для оценки ρ_3 и h_3 используют палетки типа К (для кривых АК) или типа А (для кривых АА), линию ρ_1 которых совмещают с найденной точкой A . И наконец, после того, как вертикальным перемещением палетки достигнуто нужное совмещение, может быть произведена оценка h_3 (для ρ_3 , определяемого положением линии ρ_2 палетки), либо T_3 для кривых типа АК и $S_3 = S - (S_1 + S_2)$ для кривых типа АА.

Совмещение нескольких палеток с разными μ_2 позволит определить возможные пределы для ρ_3 и, следовательно, h_3 . Если пределы возможных изменений ρ_3 получаются большими, то для оценки h_3 должны быть использованы значения ρ_3 , определенные по данным каротажа, других ВЭЗ и т. п.

Многослойные кривые различных типов

Приемы использования трехслойных палеток при интерпретации многослойных кривых аналогичны вышеописанным приемам для четырехслойных кривых. В этом случае после оценки h_3 и ρ_3 для возможности оценки h_4 и ρ_4 слой, эквивалентный первым двум слоям и третьему слою, необходимо заменить новым эквивалентным слоем путем построения соответствующей точки H , K , Q или A . Напомним, что для возможности даже относительно точной оценки m_3 в четырехслойном разрезе точное значение ρ_2 не всегда было необходимым, так как погрешности в определении h_2 при большом отношении $\frac{h_3}{h_1 + h_2}$ мало отражались на точности оценки m_3 .

Для многослойных разрезов, например для пятислойного, это же замечание может быть распространено, кроме того, и на третий слой.

Таким образом, в пятислойном разрезе для оценки глубины залегания m_4 подстилающего (пятого) слоя, если отношение $\frac{h_4}{h_1 + h_2 + h_3}$ достаточно велико, значения ρ_3 и тем более ρ_2 могут быть приняты приближенными, так как ошибки в оценке h_2 и h_3 и в этом случае почти не влияют на точность определения m_4 .

В связи с этим может быть высказано следующее общее правило.

Если в многослойном разрезе нам необходимо оценить глубину залегания какого-либо горизонта n , отмечаемого графиком ВЭЗ, то для этого в первую очередь необходимо узнать сопротивление слоя ρ_{n-1} , непосредственно перекрывающего данный горизонт. Если мощность этого слоя h_{n-1} недостаточна велика, по сравнению с мощностью перекрывающих его слоев ($\sum_{i=1}^{n-2} h_i$), то необходимо, кроме того,

знание сопротивления следующего слоя ρ_{n-2} . Чем меньше по отношению к интересующей нас границе раздела порядковый номер слоя, тем менее важна точная оценка его сопротивления для получения конечного результата с достаточной точностью. Практически для удовлетворительной оценки глубины залегания какого-либо горизонта обычно достаточно знать сопротивление лишь одного-двух слоев, перекрывающих данный горизонт.

Кроме того, следует напомнить, что в многослойных разрезах любого типа, где подстилающий слой обладает большим сопротивлением, положение конечной асимптоты будет во всех случаях зависеть от суммарной продольной проводимости всех перекрывающих слоев, равной сумме продольных проводимостей отдельных слоев. Это положение очень часто используется при интерпретации многослойных кривых.

Некоторые общие замечания об интерпретации

В предыдущих параграфах отмечалось, что интерпретация кривых двуслойного типа с помощью палетки ρ_2 может дать удовлетворительные результаты в том случае, если данные кривые относятся действительно к разрезам двуслойного типа. Наличие же промежуточного слоя для разрезов типа II и K даже незначительной мощности может дать весьма значительные погрешности в оценке глубины залегания подстилающего (третьего) слоя, если не принимать его во внимание при интерпретации.

Если же рассматривать кривые, относящиеся к трехслойным и многослойным разрезам, то оказывается, что оценка сопротивлений и мощностей слоев, слагающих эти разрезы (за исключением первого и последнего слоя), возможна лишь при достаточно большой их мощности по отношению к мощностям их перекрывающих слоев, когда соответствующий принцип эквивалентности (S_2 или T_2) действует в небольших пределах. В остальных случаях использование соответствующих палеток позволит оценить только либо S , либо T для соответствующего горизонта, или построить на бланке кривые возможных значений глубины его залегания или мощности в зависимости от принимаемых значений сопротивления. Таким образом, для оценки мощности того или иного слоя в таких случаях необходимо знать его сопротивление.

Для случая анизотропных пород добавляется кроме того, условие необходимости знания коэффициентов анизотропии тех слоев, истинные мощности которых должны быть определены. При наклонной границе раздела двух сред для оценки ρ_2 необходимо знание угла наклона границы раздела.

И наконец, при интерпретации кривых трехслойного типа с помощью соответствующих палеток мы должны иметь уверенность в том, что эти трехслойные кривые действительно соответствуют трехслойным разрезам. Наличие же промежуточного слоя, как это было и для случая двуслойных разрезов, может и здесь привести

к таким же ошибкам в определении глубины залегания подстилающего слоя. Аналогичные замечания могут быть сделаны также для четырехслойных и многослойных кривых.

Таким образом, для возможности проведения уверенной интерпретации в общем случае совершенно необходимо иметь правильное представление о типе разреза, хотя бы примерных значениях сопротивлений отдельных слоев и выдержанности этих сопротивлений, о коэффициентах анизотропии, углах наклона границы раздела и т. п. Это обязывает электроразведчика проводить параметрические замеры сопротивлений, каротаж скважин, рационально использовать имеющиеся геологические данные, сопоставляя с ними данные ВЭЗ, и т. п.

Возможности такого рода определений бывают иногда ограничены, что заставляет полевых работников приходиться к выводу о невозможности расшифровки данных ВЭЗ и оценки (хотя бы приближенной) глубин залегания тех или иных пород. Это положение, вообще говоря, верно, если проводится интерпретация отдельно взятой кривой ВЭЗ. Если же интерпретацию проводить последовательными этапами для всех кривых, снятых на исследуемом участке, то окажется, что взаимное сопоставление результатов предварительной интерпретации по всем точкам уже позволит составить примерное представление об электрическом разрезе, о возможных интервалах сопротивлений для отдельных горизонтов и т. п. В конечном счете, это позволяет приблизиться к менее многозначному решению поставленной задачи.

Поясним сказанное примером.

Предположим, что мы имеем несколько кривых ВЭЗ, произведенных по одному профилю (рис. 60, *a*), и знаем, что первым электрическим горизонтом являются относительно слабо обводненные рыхлые породы, вторым горизонтом те же породы, но водонасыщенные и третьим подстилающим горизонтом — коренные породы высокого сопротивления.

Если интерпретировать каждую кривую в отдельности, то с помощью соответствующих палеток можно оценить следующие величины.

1. По кривой ВЭЗ № 1 — мощность $h_1 = 7,5$ м и сопротивление первого слоя ρ_1 . Сопротивление и мощность второго слоя с помощью соответствующих палеток однозначно определены быть не могут, так как возможные интервалы для ρ_2 и, в соответствии с этим, интервалы для h_2 будут давать широкие пределы (ρ_2 от нуля и примерно до $\frac{1}{2} \rho_1$, откуда h_2 — от нуля и до 1,6, $h_1 = 12$ м)

2. По кривой ВЭЗ № 2, мало отличной от двухслойной кривой, при интерпретации ее палеткой ρ_2 глубина залегания коренных пород высокого сопротивления будет составлять примерно 35 м.

3. По кривой ВЭЗ № 3 — мощность $h_1 = 3$ м и сопротивление первого слоя ρ_1 . Кроме того, наличие довольно «тупого» минимума позволяет предполагать значительную мощность второго слоя в этой точке (по сравнению с h_1).

Действительно, с помощью соответствующих палеток (типа Н) можно оценить примерное значение $\rho_2 \approx \frac{1}{4}\rho_1$ и $h_2 \approx 6h_1 = 18$ м, или $m_2 = 21$ м.

В том случае, если можно полагать, что рыхлые отложения, а также состав насыщающих их вод в районе этих точек остаются

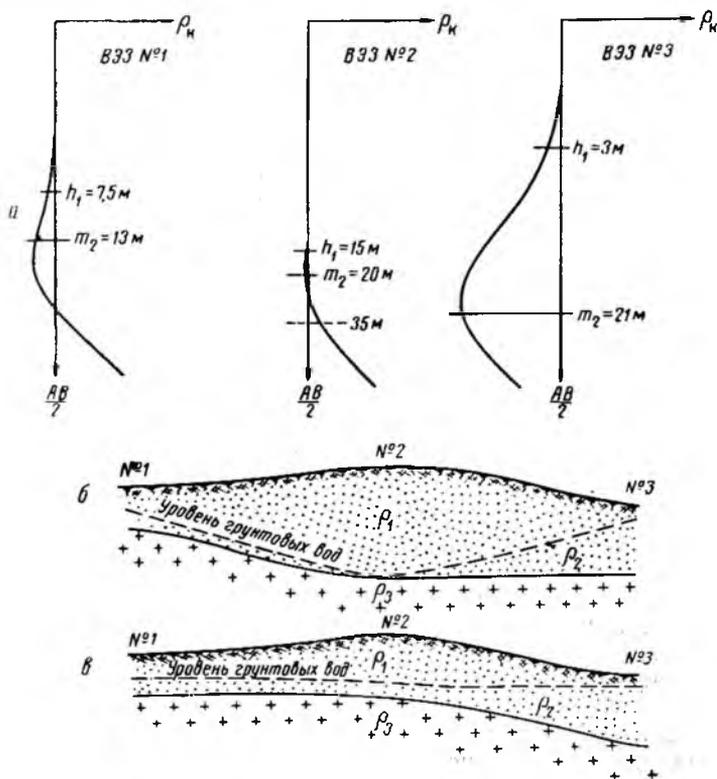


Рис. 60. Интерпретация кривых ВЭЗ по профилю.

неразмещенными, вполне естественным является использование примерного значения ρ_2 в точке № 3 для интерпретации кривой ВЭЗ № 1. Это даст возможность оценить глубину залегания коренных пород в точке № 1, равной 13 м.

Если построить теперь электрический разрез (рис. 60, б), то окажется, что глубина залегания второго слоя (уровень грунтовых вод) в точке № 2 значительно больше, чем в точках № 1 и 3. Возможность наличия такой шадины в зеркале грунтовых вод при отсутствии их дренирования, с гидрогеологической точки зрения, должна быть исключена. Тогда вполне естественно предположить, что разрез

в точке № 2 должен быть отнесен также к трехслойному разрезу. И если принять сопротивление второго слоя равным примерно ρ_2 для точек № 1 и 3, то с помощью трехслойной палетки $\left(N - \frac{1}{4} - \infty\right)$ окажется возможным оценить $h_1 \approx 15$ м и $m_2 \approx 20$ м. Такой электрический разрез (рис. 60, в) дает более определенные и в то же время достоверные материалы по сравнению с материалами интерпретации каждой кривой в отдельности, без взаимного сопоставления данных по всем точкам.

В соответствии с этим ниже, в разделе, посвященном вопросам оценки сопротивлений пород, помимо использования данных каротажа, параметрических замеров и т. п., будут даны сведения о возможности использования для этой цели взаимных сопоставлений результатов по интерпретации ряда точек ВЭЗ.

§ 12. ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ АНИЗОТРОПИИ ПО ДАННЫМ КАРОТАЖА

Использование данных трехэлектродного каротажа

Данные каротажа представляют большую практическую ценность при интерпретации ВЭЗ. Действительно, с помощью каротажных диаграмм может быть произведено расчленение разреза по электрическим свойствам с установлением мощностей и примерных сопротивлений отдельных пластов и свит, составляющих данный разрез, что как раз и необходимо в первую очередь для интерпретации ВЭЗ.

Рассмотрение каротажных диаграмм позволяет легко установить соответствие электрического разреза с геологической (стратиграфической или литологической) колонкой, что важно для перехода от электрических разрезов к геологическим и, кроме того, позволяет четко разрешить вопрос о целесообразности электроразведки для решения тех или иных задач в условиях данного разреза.

И наконец, наличие целого ряда прокаротированных скважин позволяет судить о выдержанности тех или иных горизонтов по сопротивлениям и мощностям и установить некоторые закономерности их изменений, если таковые окажутся.

В связи с этим проведение каротажных работ при наличии соответствующих скважин должно считаться совершенно необходимым этапом при электроразведочных работах.

Вместе с тем, как это будет отмечено ниже, следует иметь в виду, что данные каротажа не во всех случаях дают возможность получить все необходимые для интерпретации параметры, особенно для анизотропных пород.

Для упрощения представления о методике обработки и использования при интерпретации каротажных данных мы будем принимать, что значения кажущихся сопротивлений по данным стандартного

каротажка соответствуют истинным сопротивлениям соответствующих пород.

Фактически получаемые при каротаже кажущиеся сопротивления зависят от типа и размера применяемого зонда (в связи с соотношениями сопротивлений и мощностей отдельных пластов), диаметра скважины, сопротивления бурового раствора и величины его проникновения в породы и т. п.

Однородная изотропная среда. В том случае, если тот или иной геологический горизонт представляет собой однородную и изотропную в электрическом отношении породу, соответствующая каротажная диаграмма имеет вид прямой линии с абсциссой, равной истинному сопротивлению этой породы.

Однородная анизотропная среда. Если однородный в электрическом отношении горизонт обладает, кроме того, свойствами собственной микроанизотропии, не отмечаемой каротажной диаграммой, то последняя, вследствие однородности горизонта, будет также представлена в виде прямой линии, с постоянным значением сопротивления.

В связи с тем, что каротажная установка обычно располагается периодически на плоскостях напластования, полученное кажущееся значение сопротивления будет соответствовать истинному продольному сопротивлению этого горизонта. Значение истинного поперечного сопротивления и коэффициента микроанизотропии по каротажным данным в этом случае установлено быть не может и останется неизвестным. Для определения этих величин необходимо использовать данные ВЭЗ способами, описанными ниже.

Случай макроанизотропии. В этом случае искомым горизонт представлен чередующимися изотропными пластами различного сопротивления. Согласно сделанным выше (§ 3) определениям, мощности этих пластов достаточны для того, чтобы каждый пласт был отмечен каротажной диаграммой, но недостаточно велики, чтобы каждый пласт был отмечен на графике ВЭЗ. В этом случае на графике вся толща чередующихся пластов различного сопротивления отмечается в виде отдельного горизонта.

Для пояснения сказанного на рис. 61 приведены две схематизированные каротажные диаграммы (в арифметическом масштабе), на которых отмечены принимаемые для ВЭЗ мощности второго анизотропного слоя. Соответствующие этим случаям графики ВЭЗ приведены на том же рисунке.

Так как, по условию, отдельные пласты, составляющие данный район, изотропны, то мы будем считать, что каротажная диаграмма дает истинное сопротивление для каждого пласта. Методика обработки каротажных диаграмм сводится к определению по ним для искомого горизонта, представленного чередующимися изотропными пластами различного сопротивления, соответствующих средних сопротивлений и коэффициента макроанизотропии. Воспользуемся для этой цели формулами, приведенными выше, при рассмотрении анизотропных образований (§ 3):

Для определения среднего поперечного сопротивления слоя достаточно на каротажной диаграмме провести параллельно оси ординат прямую таким образом, чтобы площади, ограниченные кривой сопротивления и данной линией, были одинаковы по обеим сторонам линии (рис. 62).

Для определения среднего продольного сопротивления слоя необходимо было бы построить диаграмму проводимости ($\alpha = \frac{1}{\rho}$)

и провести аналогичным образом параллельно оси ординат прямую линию, определяющую среднюю продольную проводимость слоя. Отсюда может быть определено среднее продольное сопротивление слоя.

Последовательность операций при обработке каротажных диаграмм обычно принята следующая.

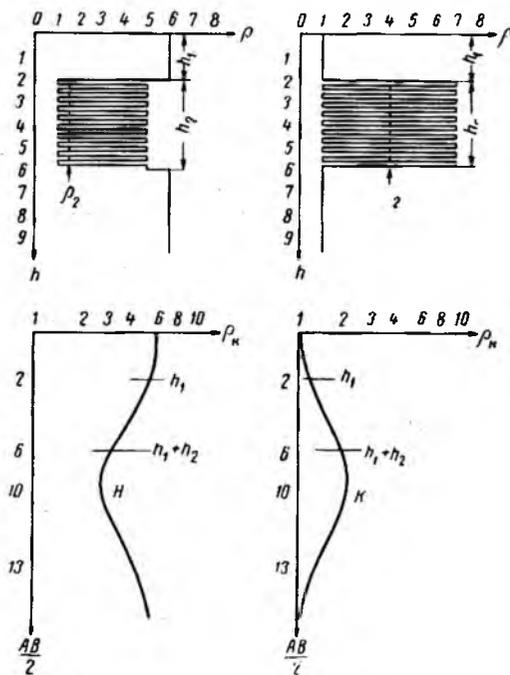


Рис. 61. Схематизированные каротажные диаграммы и кривые ВЭЗ.

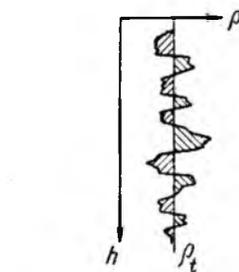


Рис. 62. Оценка среднего поперечного сопротивления по диаграмме стандартного каротажа КС.

На каротажной диаграмме в соответствии с ее характером, а также видом графиков ВЭЗ выделяется интервал глубин, на котором находится тот или иной горизонт (отмечаемый графиком ВЭЗ), сопротивление которого необходимо определить (рис. 63).

Далее, каротажная диаграмма на этом интервале несколько схематизируется и разрез представляется в виде некоторого конечного числа пластов различной мощности и сопротивления.

После этого порядковый номер каждого пласта, его мощность и сопротивление выписываются в соответствующие графы табл. 3.

Таблица 3

Порядковый номер пласта	Мощность h_i , в м	Сопротивление ρ_i , ом·м	Поперечное сопротивление $T_i = h_i \rho_i$, ом	Продольная проводимость $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$, сим
1				
2				
3				
4				
5				
6				
⋮				
⋮				
	$\sum h_i =$		$\sum T_i = \sum h_i \rho_i =$	$\sum S_i = \sum \frac{h_i}{\rho_i} =$

Для определения среднего поперечного сопротивления для данного интервала глубин необходимо определить поперечное сопротивление $T_i = h_i \rho_i$ для каждого пласта, входящего в данный интервал, просуммировать их и полученное значение поперечного сопротивления для всего слоя $\sum T_i = \sum h_i \rho_i$ разделить на суммарную мощность $\sum h_i$ всех пластов.

Для определения среднего продольного сопротивления для данного интервала глубин необходимо определить продольную проводимость $S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$ для каждого пласта, входящего в этот интервал, просуммировать их и, взяв суммарную мощность $\sum h_i$ всех пластов, разделить на полученное значение продольной проводимости $\sum S_i = \sum \frac{h_i}{\rho_i}$ для всего слоя.

Полученные значения ρ_n и ρ_i используются для определения ρ_m и λ .

Таким образом, если разрез представлен в виде чередования ивотронных пластов различной мощности и сопротивления, по каротажным диаграммам можно определить все величины, характеризующие электрические свойства разреза.

С л у ч а й о б щ е й а н и з о т р о п и и. В этом случае, согласно определению, разрез представлен в виде чередующихся

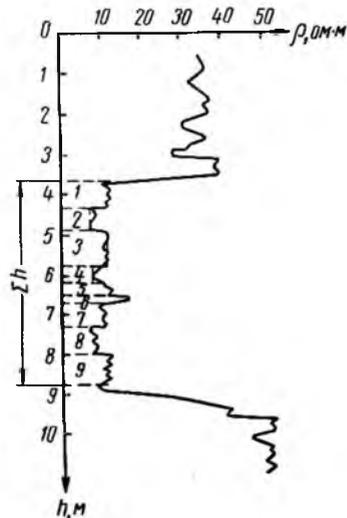


Рис. 63. Выделение горизонтов и оценка их сопротивления по диаграмме стандартного каротажа КС.

анизотропных пластов различных мощностей и сопротивлений, каждый из которых отмечается каротажной диаграммой. По сравнению с описанным выше случаем макроанизотропии здесь каждый пласт, входящий в разрез, или некоторое из этих пластов обладают, кроме того, собственной анизотропией (микроанизотропией), не отмечаемой каротажной диаграммой.

При работе в условиях осадочных образований с такого типа разрезы электроразведчику приходится сталкиваться особенно часто. Действительно, целый ряд осадочных пород (мергели, сланцы и т. п.) обладает резко выраженными свойствами микроанизотропии, и чередование этих пород даже с относительно изотропными породами уже представляет типичный пример наличия общей анизотропии.

Вследствие того, что каротажная установка обычно располагается перпендикулярно к плоскостям напластований, можно считать, что получаемые по каротажной диаграмме значения сопротивлений для каждого пласта соответствуют его истинным продольным сопротивлениям (парадокс анизотропии).

Для определения среднего продольного сопротивления анизотропной свиты по данным каротажа необходимо, как и для случая наличия только макроанизотропии, определить продольные проводимости каждого пласта $(S_i = \frac{h_i}{\rho_i})$, просуммировать их и мощность всей свиты $(\sum h_i)$ разделить ее на суммарную продольную проводимость $(\sum S_i = \sum \frac{h_i}{\rho_i})$.

В этом случае необходимые для установления продольной проводимости каждого пласта значения ρ_i определяются непосредственно по каротажной диаграмме.

Для определения же среднего поперечного сопротивления всей свиты необходимо поперечные сопротивления каждого пласта просуммировать и полученное значение суммарного поперечного сопротивления всей свиты разделить на ее мощность. Так как каротажная диаграмма дает значения сопротивлений, соответствующие средним (истинным) продольным сопротивлениям для каждого пласта ρ_{i_z} , а для определения его поперечного сопротивления $h_i \rho_{n_i}$ необходимо знание ρ_{n_i} , то задача определения истинного среднего поперечного сопротивления для всей свиты при использовании только данных каротажа не может быть решена.

Если обработку каротажной диаграммы проводить обычным методом, подставляя вместо ρ_{n_i} для каждого пласта значения ρ_{i_z} , отсчитываемые по диаграмме, то поперечное сопротивление каждого пласта $\rho_i h_i$ будет получено в $\lambda_{\mu_i}^2$ раз меньше истинного (λ_{μ_i} — коэффициент микроанизотропии данного пласта) значения $\rho_{n_i} h_i$.

Отсюда значение среднего ρ_n для всей свиты, полученное как $\frac{\sum \rho_{i_z} h_i}{\sum h_i}$, будет также уменьшено по сравнению с истинным зна-

чением ρ_n , а значение λ , определенное как $\sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$ (по данным каротажа), будет соответствовать в этом случае лишь коэффициенту макроанизотропии.

Таким образом, если разрез представлен в виде чередующихся анизотропных пластов различного сопротивления, то в этом случае, используя данные каротажа, можно произвести оценку лишь истинного среднего продольного сопротивления. Полученные же путем обычного расчета по данным каротажа значения λ , ρ_m и ρ_n будут несколько уменьшены, так как влияние микроанизотропии пород при этом не может быть учтено.

Учет среднего влияния микроанизотропии для всей свиты, как это будет показано ниже, может быть произведен при использовании данных ВЭЗ, произведенных около этих скважин.

Резюмируя, можно сказать, что на основании каротажных диаграмм могут быть произведены: качественная оценка электрического разреза, указывающая на последовательность чередования горизонтов различных сопротивлений и их соответствие с геологическими горизонтами; оценка мощностей различных электрических горизонтов; примерная оценка сопротивлений отдельных свит, отмечаемых на соответствующих графиках ВЭЗ, и коэффициентов микроанизотропии.

В соответствии с этим данные каротажа используют:

1) для выяснения вопроса о целесообразности постановки электроразведки при решении тех или иных задач;

2) совместно с данными ВЭЗ у скважин для определения параметров отдельных электрических горизонтов, знание которых необходимо при интерпретации ВЭЗ;

3) для геологической интерпретации данных электроразведки, т. е. для перехода от электрического разреза к геологическому.

Вместе с тем, учитывая значительные погрешности в оценке абсолютных значений сопротивлений, которые могут быть вызваны неудачным выбором типа и размера зонда, влиянием раствора и т. п., при использовании данных каротажа для целей точной количественной интерпретации совершенно необходимо параллельное использование данных ВЭЗ у скважин.

§ 13. ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТОВ АНИЗОТРОПИИ ПО ДАННЫМ ВЭЗ У СКВАЖИН

Производство ВЭЗ у скважин вне зависимости от того, имеются ли по ним данные каротажа, следует также считать одним из необходимых и первых этапов полевых электроразведочных работ. При этом должны быть использованы не только скважины, расположенные непосредственно на исследуемом участке, но и на ближайших участках. Действительно, какой-либо горизонт определенной мощности, параметры которого должны быть изучены, будет тем более четко отражаться на графике ВЭЗ, чем меньше мощность перекрывающих пород и чем меньше они отличаются между собой по сопротивлениям. В связи с этим, особенно если интересующий нас горизонт находится

на соседнем участке в более благоприятных для электроразведки условиях, производство параметрических ВЭЗ следует считать там необходимым.

Кроме того, следует учесть, что наличие параметрических данных для большого числа точек позволит сделать заключение о выдержанности сопротивлений отдельных горизонтов и о закономерностях их изменений, если таковые окажутся.

Особенно ценные результаты могут быть получены в том случае, если, помимо ВЭЗ у скважин, имеются каротажные данные по этим скважинам. В этом случае, как это будет показано ниже, можно определять значительно большее число параметров, чем при использовании отдельно данных ВЭЗ и каротажа.

Кривые двуслойного типа

По графику ВЭЗ могут быть оценены ρ_1 , h_1 и ρ_2 .

1. Если значение h_1 по данным ВЭЗ совпадает с глубиной залегания второго слоя по данным разреза скважины, то это дает возможность предполагать, что первый слой в электрическом отношении однородный и изотропный. Эти соображения могут быть подтверждены литологическим описанием данного слоя по скважине, а однородность разреза, кроме того, может быть подтверждена данными каротажа.

2. Если по данным скважины или каротажа может быть установлено, что первый слой в электрическом отношении однороден, а значение h_1 по данным ВЭЗ превышает истинную его мощность по данным скважины или каротажа, то следует полагать, что этот слой обладает свойствами микроанизотропии. Заметим, что в этом случае значение ρ_1 по данным ВЭЗ будет соответствовать (при горизонтальном напластовании) среднему квадратичному сопротивлению ρ_m первого слоя, в то время как по данным каротажа оно будет равно ρ_{t_1} .

Сопоставление h_1 по данным ВЭЗ с истинной мощностью первого слоя позволит определить значение коэффициента микроанизотропии λ_μ :

$$\lambda_\mu = \frac{h_1 \text{ (по данным ВЭЗ)}}{h_1 \text{ (по данным скважины или каротажа)}}.$$

Кроме того, значение λ_μ может быть получено как

$$\lambda_\mu = \frac{\rho_{m_1} \text{ (по данным ВЭЗ)}}{\rho_{t_1} \text{ (по данным каротажа)}}.$$

3. И наконец, если значение h_1 по данным ВЭЗ меньше или больше истинного значения глубины залегания мощного подстилающего слоя (по данным скважины), можно предположить о наличии промежуточного слоя, не отмечаемого на графике ВЭЗ.

Наличие такого горизонта проще всего может быть отмечено каротажом. Если сопротивление этого промежуточного слоя остается

неизвестным, то оно может быть определено следующим способом: зная ρ_1 по данным ВЭЗ и истинную мощность первого слоя (без промежуточного слоя) по данным скважины или каротажа, можно оценить $S_1 = \frac{h_1}{\rho_1}$ (при подстилающем мощном слое высокого сопротивления) или $T_1 = h_1 \rho_1$ (при проводящем подстилающем слое). Отсюда, определив полное значение $S = S_1 + S_2$ или $T = T_1 + T_2$ по графику ВЭЗ, можно найти величину $S_2 = S - S_1$ или $T_2 = T - T_1$, что позволит, зная мощность промежуточного слоя, определить его сопротивление.

Кривые типа Н

1. В том случае, если принцип эквивалентности S_2 действует в небольших пределах, по графикам ВЭЗ, помимо ρ_1 и h_1 , могут быть определены значения ρ_2 и h_2 .

Если второй слой однородный и изотропный, то значение h_2 (или m_2) должно совпадать с истинной мощностью второго слоя (или глубиной залегания третьего слоя) по данным скважины и каротажа. Кроме того, должны совпадать или быть близкими значения ρ_2 по данным ВЭЗ и каротажа.

Если второй слой анизотропный, то значения ρ_2 по данным ВЭЗ будут соответствовать ρ_{m_2} и значения h_2 — истинной мощности, умноженной на коэффициент анизотропии.

Таким образом, значение мощности второго слоя по данным ВЭЗ будет больше истинной мощности по данным скважины или каротажа. Отсюда может быть определен коэффициент анизотропии второго слоя:

$$\lambda = \frac{h_2 \text{ (по данным ВЭЗ)}}{h_2 \text{ (по данным скважины или каротажа)}}$$

Кроме того, сопоставление величины ρ_{m_2} и λ по данным ВЭЗ с соответствующими величинами по данным каротажа позволит сделать выводы о наличии микроанизотропии.

В частности, если по данным каротажа установлено, что второй слой однородный, то значение λ , определенное при использовании данных ВЭЗ, будет соответствовать коэффициенту микроанизотропии второго слоя.

Если по данным каротажа установлено, что второй слой обладает свойствами макроанизотропии, а значения λ и ρ_m по данным ВЭЗ больше соответствующих значений по данным каротажа, то это будет служить признаком наличия, кроме того, микроанизотропии (случай общей анизотропии). Значения λ по данным ВЭЗ будут соответствовать коэффициенту общей анизотропии, откуда сопоставлением с данными каротажа может быть определен средний для второго слоя коэффициент микроанизотропии:

$$\lambda_{\mu} = \frac{\lambda \text{ (по данным ВЭЗ)}}{\lambda \text{ (по данным каротажа)}}$$

2. Если для графика ВЭЗ у скважины принцип эквивалентности действует в широких пределах, то мы имеем возможность с помощью соответствующих палеток оценить величину S_2 или построить на бланке ВЭЗ кривую m_2 в зависимости от принимаемых значений ρ_2 . Отсюда, зная h_2 (или m_2) по разрезу скважины или данным каротажа, можно оценить значение ρ_2 .

Полученное значение ρ_2 будет соответствовать истинному сопротивлению второго слоя, если последний однородный и изотропный.

Если второй слой анизотропный, то значение ρ_2 , полученное при использовании данных ВЭЗ, будет соответствовать среднему продольному сопротивлению ρ_i .

Действительно, при оценке мощности анизотропного слоя с помощью палеток, рассчитанных для изотропных слоев, необходимо принимать среднее квадратичное сопротивление ρ_m этого слоя, и полученная мощность будет равна его истинной мощности, умноженной на коэффициент анизотропии. Однако по принципу эквивалентности S мы можем слой с сопротивлением ρ_m и мощностью $h\lambda$ заменить эквивалентным слоем с таким сопротивлением $\frac{\rho_m}{\lambda} = \rho_i$ и мощностью $\frac{h\lambda}{\lambda} = h$, чтобы выполнялось соотношение:

$$S = \frac{h\lambda}{\rho_m} = \frac{h}{\rho_i}.$$

Отсюда, для получения истинной мощности второго слоя в разрезах типа Н при условии действия принципа эквивалентности в широких пределах необходимо принимать ρ_2 , равное среднему продольному сопротивлению этого слоя. В обратном случае, при оценке ρ_2 по известному значению истинной мощности h_2 мы будем, очевидно, получать значение среднего продольного сопротивления.

Таким образом, по данным графика ВЭЗ у скважины, если принцип эквивалентности действует в достаточно широких пределах, можно оценить только значение среднего продольного сопротивления, которое как раз и необходимо для оценки истинной мощности второго слоя.

Кривые типа К

1. В том случае, если принцип эквивалентности T_2 действует в небольших пределах, по графикам ВЭЗ, помимо ρ_1 и h_1 , могут быть определены значения ρ_2 и h_2 . Если второй слой однородный и изотропный, то значение h_2 (или m_2) должно совпадать с истинной мощностью второго слоя (или глубиной залегания третьего слоя) по данным скважины или каротажа. Кроме того, должны совпадать или быть близкими значения ρ_2 по данным ВЭЗ и каротажа.

Если второй слой анизотропный, то значения ρ_2 по данным ВЭЗ будут соответствовать ρ_m , и значения h_2 — истинной мощности

по данным скважины или каротажа, умноженной на коэффициент анизотропии λ , т. е.

$$\lambda = \frac{h_2 \text{ (по данным ВЭЗ)}}{h_2 \text{ (по данным скважины или каротажа)}}.$$

Сопоставление величин ρ_{m_2} и λ по данным ВЭЗ с соответствующими величинами по данным каротажа позволит сделать выводы о наличии микроанизотропии. В частности, если по данным каротажа установлено, что второй слой однородный, то значение λ , определенное при использовании данных ВЭЗ, будет соответствовать коэффициенту микроанизотропии второго слоя.

Если по данным каротажа установлена неоднородность второго слоя (макроанизотропия), значения λ и ρ_m по данным ВЭЗ больше λ и ρ_m по данным каротажа, то это будет служить признаком наличия, кроме того, микроанизотропии.

Значение λ по данным ВЭЗ в этом случае будет соответствовать коэффициенту общей анизотропии, откуда сопоставлением с данными каротажа, может быть определен средний для второго слоя коэффициент микроанизотропии λ_p , как

$$\lambda_p = \frac{\lambda \text{ (по данным ВЭЗ)}}{\lambda \text{ (по данным каротажа)}}.$$

2. В случае действия принципа эквивалентности T_2 в широких пределах по графику ВЭЗ у скважины с помощью палеток можно оценить T_2 или построить кривую m_2 в зависимости от ρ_2 . Отсюда, зная h_2 (или m_2) по разрезу скважины или данным каротажа, можно оценить ρ_2 , которое будет соответствовать истинному сопротивлению второго слоя, если последний однородный и изотропный.

Если второй слой анизотропный, то полученное ρ_2 будет соответствовать среднему поперечному сопротивлению ρ_{n_2} . Действительно, при оценке мощности анизотропного слоя необходимо принять $\rho_2 = \rho_{m_2}$, и полученная мощность будет равна произведению истинной мощности h_2 на коэффициент анизотропии. Этот слой (ρ_{m_2} и $h_2\lambda$) по принципу эквивалентности T_2 можно заменить слоем с сопротивлением $\rho_{m_2}\lambda = \rho_{n_2}$ и мощностью $\frac{h_2\lambda}{\lambda} = h_2$. Отсюда при интерпретации для оценки истинного значения h_2 необходимо принимать ρ_2 , равное ρ_{n_2} , и обратно, если принимать истинное значение h_2 по скважине и производить по графику ВЭЗ оценку ρ_2 , то последнее будет соответствовать ρ_{n_2} .

Если значение ρ_{n_2} по данным ВЭЗ окажется больше значения ρ_m , по данным каротажа, то это позволит говорить о наличии микроанизотропии. Значение среднего для второго слоя коэффициента микроанизотропии λ_p можно определить так:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\rho_{n_2} \text{ (по данным ВЭЗ)}}{\rho_{m_2} \text{ (по данным каротажа)}}}.$$

Таким образом, по данным ВЭЗ у скважины можно оценить значение среднего поперечного сопротивления (с учетом макро- и микроанизотропии), знание которого необходимо для интерпретации графиков ВЭЗ этого типа, с целью получения истинной мощности второго слоя.

Кривые типа Q

1. По графикам ВЭЗ этого типа, если принцип эквивалентности действует в небольших пределах, может быть определено ρ_2 и h_2 .

Если второй слой однородный и изотропный, значения h_2 и ρ_2 будут соответствовать истинным значениям h_2 и ρ_2 по данным скважины и каротажа.

Если второй слой анизотропный, значение ρ_2 по данным ВЭЗ будет соответствовать ρ_{m_2} , и значение h_2 — истинной мощности, умноженной на коэффициент анизотропии λ . Отсюда

$$\lambda = \frac{h_2 \text{ (по данным ВЭЗ)}}{h_2 \text{ (по данным скважины или каротажа)}}.$$

Сопоставление ρ_{m_2} и λ по данным ВЭЗ и данным каротажа здесь также позволит судить о наличии микроанизотропии.

Если по данным каротажа $\lambda = 0$ (однородный слой), то λ по данным ВЭЗ соответствует коэффициенту микроанизотропии.

Если значения ρ_m и λ по данным ВЭЗ больше соответствующих значений ρ_m и λ по данным каротажа, то это служит признаком наличия также и микроанизотропии.

Так как λ по данным ВЭЗ в общем случае соответствует коэффициенту общей анизотропии, то отсюда может быть установлен средний для второго слоя коэффициент микроанизотропии λ_p , как

$$\lambda_p = \frac{\lambda \text{ (по данным ВЭЗ)}}{\lambda \text{ (по данным каротажа)}}.$$

2. Если принцип эквивалентности действует в широких пределах, то, используя значения h_2 (или m_2) по данным скважины, может быть определено лишь примерное значение ρ_2 .

Исходя из того, что для кривых данного типа применим (с некоторым приближением) принцип эквивалентности T_2 , следует полагать, что оцениваемое при этом значение ρ_2 будет близко к ρ_{n_2} . При интерпретации же кривых для получения мощности второго слоя и глубины залегания третьего слоя, близких к истинным, необходимо значения ρ_2 принимать равными ρ_{n_2} .

Кривые типа A

1. Оценка ρ_2 и h_2 по данным ВЭЗ у скважины, если принцип эквивалентности S_2 действует в небольших пределах, даст истинные ρ_2 и h_2 лишь для изотропного второго слоя. Если последний анизотропен, то значение ρ_2 по данным ВЭЗ будет соответствовать истинному

ρ_{m_2} , а значение h_2 — истинной мощности, умноженной на коэффициент анизотропии. Сопоставлением данных ВЭЗ (ρ_{m_2} и $h_2\lambda$), скважины (h_2) и каротажа (ρ_{m_2} , h_2 и λ) может быть определена величина коэффициентов общей и микроанизотропии способом, описанным выше для кривых типа Q .

2. Если разрез допускает возможность действия принципа эквивалентности S_2 в широких пределах, то может быть рекомендован следующий способ оценки ρ_2 . С помощью палеток по графику ВЭЗ у скважины оценивается значение $S = S_1 + S_2$, затем, зная h_1 и ρ_1 , определяется $S_1 = \frac{h_1}{\rho_1}$ и $S_2 = S - S_1$. Отсюда, если h_2 известно по скважине, $\rho_2 = \frac{h_2}{S_2}$. Полученное значение ρ_2 соответствует истинному ρ_2 изотропного второго слоя и ρ_{i_2} , если второй слой анизотропный. Действительно, в этом случае слой с ρ_{m_2} и $h_2\lambda$ заменяется по принципу эквивалентности S_2 на слой с сопротивлением ρ_{i_2} и истинной мощностью h_2 . При интерпретации же кривых такого типа для получения истинных мощностей второго слоя необходимо принимать ρ_2 равным ρ_{i_2} .

Четырехслойные и многослойные кривые различных типов

Оценка сопротивления второго слоя, если по данным скважины известна его мощность h_2 или глубина залегания третьего слоя, может быть произведена для многослойной кривой способами, описанными для трехслойных кривых.

При относительно небольшой мощности второго слоя $\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$, в случае, если он анизотропен, будут оценены значения ρ_i (разрезы H и A) или ρ_n (разрезы K и Q), а при большой мощности — значения ρ_m и $h_2\lambda$, сопоставление которых с данными скважины (h_2) или каротажа (h_2 , ρ_i , ρ_m) позволит оценить коэффициенты общей анизотропии и микроанизотропии.

После этого, зная ρ_2 и h_2 (или ρ_m и $h_2\lambda$), можно построить соответствующую точку (H , K , Q или A), координаты которой должны характеризовать сопротивление и мощность слоя, эквивалентного первым двум слоям:

Прикладывая к этой точке линию ρ_1 соответствующей палетки, можно определить значение S_3 или T_3 . Отсюда, зная h_3 по данным скважины, может быть оценено ρ_3 для изотропного слоя и ρ_{i_3} или ρ_{n_3} для анизотропного слоя.

В том случае, если мощность третьего слоя велика по отношению к $h_1 + h_2$, сопоставление палеток с кривой ВЭЗ у скважины позволит оценить примерное значение ρ_3 и h_3 или ρ_{m_3} и $h_3\lambda_3$ для изотропного слоя. Сопоставление этих данных с данными скважины или каротажа позволит оценить наличие анизотропии и определить значение соответствующих коэффициентов.

Если по данным скважины или каротажа известно значение только глубины залегания четвертого слоя ($h_1 + h_2 + h_3$), а истинная

мощность третьего слоя неизвестна, следует по графику ВЭЗ оценить хотя бы примерное значение $m_2 = h_1 + h_2$, откуда $h_2 = m_2 - (h_1 + h_2)$. При этом погрешности в оценке $h_1 + h_2$, если $h_3 \gg (h_1 + h_2)$ не окажут существенного влияния на точность оценки h_3 и, следовательно, ρ_3 .

Приемы оценки сопротивлений четвертого слоя и т. п. аналогичны приемам оценки ρ_3 . Заменяя слой, эквивалентный первым двум слоям, и третий слой новым эквивалентным слоем, путем сопоставления с палетками можно оценить S_4 и T_4 , а это даст возможность при использовании данных скважины определить ρ_4 для изотропного слоя и ρ_{t_4} или ρ_{n_4} для анизотропного слоя. При относительно большой мощности четвертого слоя $\left(\frac{h_4}{h_1+h_2+h_3}\right)$ по графику ВЭЗ у скважины можно оценить ρ_{m_4} и $h_4\lambda$, что позволит при использовании данных скважины или каротажа дать характеристику анизотропных свойств четвертого слоя.

§ 14. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

1. Электрические свойства тех или иных пород могут быть изучены на основании лабораторных измерений, проводимых с отдельными образцами этих пород. Однако получаемые при этом значения сопротивлений чаще всего во много раз превышают значения сопротивлений, полученные для этих же пород в условиях их естественного залегания. Основная причина таких расхождений связана, по-видимому, с тем, что в условиях лаборатории определения проводятся для отдельных образцов, влажность и минерализация насыщающих вод которых иная, чем в естественных условиях залегания, за счет отсутствия трещиноватости. Поэтому лабораторные определения целесообразно ставить лишь с целью сравнительного изучения электрических свойств различных пород, например, при решении вопросов о закономерностях изменения сопротивления под влиянием различных факторов, о микроанизотропии пород и т. п.

Материалы по лабораторным определениям, если последние проведены на достаточном числе образцов, могут служить лишь для получения некоторых представлений о возможных соотношениях сопротивлений различных пород и при отсутствии данных полевого опробования могут быть использованы при проектировании электро-разведочных работ. Однако использование абсолютных значений сопротивлений пород по данным лабораторных определений для интерпретации ВЭЗ не рекомендуется.

2. Параметрические измерения сопротивлений пород могут быть проведены в полевых условиях, на естественных или искусственных обнажениях этих пород (журфы, канавы, карьеры и т. п.). Однако при использовании результатов таких измерений для интерпретации ВЭЗ необходимо учитывать целый ряд факторов.

Во-первых, в условиях естественного обнажения породы бывают разрушены, а их влажность и минерализация насыщающих вод

могут весьма значительно отличаться от влажности и минерализации аналогичных пород, если последние залегают на некоторой глубине. Например, разрушенная и сухая порода в условиях естественного обнажения обладает большими сопротивлениями, чем на глубине. Наоборот, сопротивление разрушенных и водонасыщенных кристаллических пород, залегающих вблизи от дневной поверхности, может оказаться меньше сопротивления этих же пород на некоторой глубине.

В этом отношении данные каротажа представляют весьма большую ценность, так как они дают возможность оценить сопротивление пород, залегающих именно в тех условиях и на тех глубинах, которые представляют практический интерес при интерпретации ВЭЗ.

В связи с этим не следует, как это часто делается, ограничивать параметрические замеры применением только очень малых разносов AB .

Во-вторых, при проведении параметрических измерений в условиях искусственных обнажений необходимо учитывать форму границы раздела земля—воздух, которая в этих случаях не всегда является плоскостью. Поэтому, учитывая величину разносов AB по сравнению с размерами и формой границы раздела, необходимо, хотя бы приблизительно, на основании приведенных выше материалов учесть знак и порядок величин возможных искажений получаемых значений сопротивлений.

3. Наибольшую практическую ценность представляют параметрические измерения, выполненные в виде обычных ВЭЗ на специально выбранных для этих целей точках или участках. Действительно, какой-либо электрический горизонт отражается на кривой ВЭЗ тем более четко и значения ρ_x приближаются к истинному ρ_n тем больше, чем больше мощность данного горизонта (h_n) по отношению к мощности перекрывающих пород ($\sum_1^{n-1} h_i$) и чем меньше относительная разница в их сопротивлениях.

Выбор точек для постановки таких параметрических ВЭЗ может быть сделан как на основании имеющихся геологических материалов, так и на основании данных электроразведки. В частности, рассмотрение и взаимное сопоставление графиков ВЭЗ, произведенных на исследуемом участке, очень часто позволяет наметить те участки, где интересующий нас горизонт находится в более благоприятных условиях в смысле возможности определения его сопротивления по графикам ВЭЗ.

По графикам, полученным в таких условиях, может быть оценено либо сопротивление искомого горизонта, либо возможные пределы его изменения, причем эти пределы будут значительно меньшими, чем на остальных графиках ВЭЗ.

Таким образом, следует считать рациональным проведение дополнительных ВЭЗ иногда даже за пределами исследуемого участка, если можно там ожидать более благоприятных условий для возможности оценки сопротивления интересующего нас горизонта.

4. В том случае, если значение сопротивления какого-либо горизонта остается неизвестным и по графикам могут быть установлены лишь некоторые пределы, в которых оно должно находиться, то в соответствии с этими пределами можно дать также лишь предельные значения мощности этого горизонта или глубины залегания подстилающего слоя. Для уменьшения этих пределов могут быть использованы следующие данные.

Неглубокие скважины и горные выработки. В том случае, если имеется разрез скважины, которая была остановлена в породах с интересующим нас сопротивлением, принимая значение мощности этого горизонта по данным скважины, мы сможем оценить один из пределов возможных сопротивлений. Например, если в трехслойном разрезе типа Н скважина прошла по второму слою мощностью h_2' и не вышла из него, то отсюда может быть установлено, что

$$\rho_2 > \frac{h_2' \text{ (по данным скважины)}}{S_2 \text{ (по данным ВЭЗ)}}.$$

Оценка этого предела ρ_2 может быть проведена по целому ряду таких скважин. Из полученных при этом значений ρ_2 максимальные значения должны быть наиболее близки к истинным ρ_2 .

Геологические данные. Для оценки возможных пределов сопротивлений иногда могут быть использованы имеющиеся геологические данные о разрезе, согласно которым может быть установлена примерная мощность того или иного горизонта или ее вероятные пределы. В частности, если по геологическим данным может быть установлено, что мощность горизонта пониженных сопротивлений (в трехслойном разрезе типа Н) не должна быть больше h_2'' , то это даст возможность утверждать, что

$$\rho_2 < \frac{h_2'' \text{ (по геологическим данным)}}{S \text{ (по данным ВЭЗ)}}.$$

5. При наличии благоприятных условий данные других геофизических методов, особенно сейсмометрии, позволяют уверенно оценивать глубину залегания того или иного горизонта. Если есть основания считать, что опорный для сейсмометрии горизонт является одновременно, например, подстилающим слоем в трехслойном электрическом разрезе, то сейсмические данные целесообразно использовать для оценки ρ_2 по графикам ВЭЗ.

При этом может оказаться, что для привязки к известному разрезу придется поставить ряд точек, выходящих за пределы исследуемого участка.

§ 15. О МЕТОДИКЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЭЗ

Выше было дано описание методики оперирования с палетками при интерпретации ВЭЗ, а также различных способов оценки сопротивлений и коэффициентов анизотропии.

В настоящем параграфе будут даны некоторые общие указания, касающиеся методики интерпретации, последовательности ее проведения, составления разрезов, карт и т. п.

Оценка электрического разреза

При интерпретации данных ВЭЗ первым этапом следует считать получение необходимых представлений о типе разреза на исследуемом участке. Задача эта в значительной степени упрощается, если имеется достаточно мощный подстилающий горизонт с сопротивлением, отличным от сопротивления перекрывающих пород, и уверенно прослеживаемый по кривым ВЭЗ на всем участке работ.

Пусть этот подстилающий горизонт обладает весьма высоким сопротивлением. Тогда по положению конечной асимптоты кривых ВЭЗ, которая представится в данном случае в виде прямой с углом наклона 45° к оси ординат, может быть произведена оценка суммарной продольной проводимости ($\sum S$) всех перекрывающих пород. Если сопротивление подстилающего слоя конечное (но больше сопротивления перекрывающего горизонта) и положение нижней асимптотической ветви кривой ВЭЗ не совпадает с прямой, идущей под углом в 45° , то значение $\sum S$ определяется путем сопоставления с нижней ветвью экспериментальной кривой либо трехслойных палеток (типа Н или А), либо палетки ρ_2 .

Произведя такую оценку по всем кривым ВЭЗ, можно составить карту $\sum S$, которая будет давать первое приближенное представление о поведении кровли данного опорного горизонта. Это представление будет тем ближе к истине, чем более постоянны сопротивления перекрывающих пород.

Рассмотрение и анализ кривых ВЭЗ удобнее начинать с тех точек, для которых значения $\sum S$ окажутся минимальными, так как в этих точках породы, непосредственно перекрывающие опорный горизонт высокого сопротивления, залегают ближе к дневной поверхности. В связи с этим даже по кривым ВЭЗ здесь могут быть установлены более близкие к истинным значения сопротивлений перекрывающих пород и более дробное расчленение разреза по электрическим горизонтам.

При последовательном рассмотрении кривых ВЭЗ на точках, дающих все большие значения $\sum S$ (что соответствует большей мощности перекрывающих пород при постоянном их сопротивлении), можно отметить появление новых перекрывающих горизонтов, если таковые окажутся. Естественно, что примерная оценка их сопротивлений по кривым ВЭЗ должна проводиться по точкам, где эти горизонты ближе подходят к дневной поверхности.

Такое последовательное рассмотрение кривых ВЭЗ позволяет иногда составить примерное представление об электрическом разрезе, включая примерную оценку мощностей и сопротивлений отдельных горизонтов, начиная от более древних и до более молодых отложений. Данные каротажа, ВЭЗ у скважин, геологические разрезы скважин, параметрические ВЭЗ и т. п. позволяют такую оценку сделать более точной и уверенной, что в конечном счете дает возможность осуществить более точную и надежную количественную

интерпретацию. Последнее вытекает из того, что, имея достаточно четкое представление об электрическом разрезе, можно уверенно относить кривые к тому или иному типу и, следовательно, правильно подойти к оценке глубин залегания. Этой принятой схеме разреза должны удовлетворять все кривые ВЭЗ, произведенные на данном участке. Если же ряд кривых не удовлетворяет принятой схеме разреза, необходимо разобрать возможные причины этого несогласия; при этом необходимо иметь в виду, что типы полученных кривых могут оказаться различными в зависимости от того, с каких пород начинается разрез в той точке, в которой выполнено ВЭЗ. Необходимо учитывать также, в какой мере тот или иной горизонт в зависимости от глубины его залегания может отражаться на кривых ВЭЗ. Может оказаться, что какой-либо горизонт, четко отражающийся на кривой ВЭЗ при небольшой глубине его залегания, будет отражаться слабо или вовсе не отразится на кривой ВЭЗ при погружении его на большие глубины. Для получения представления о том, какие горизонты и в какой мере отражаются на кривых ВЭЗ, целесообразно выполнить графические построения ряда кривых для различных глубин залегания опорного горизонта.

Пусть, например, на основании каротажных данных, ВЭЗ у скважины или предварительной интерпретации ряда кривых ВЭЗ устанавливается, что мощный подстилающий горизонт высокого сопротивления перекрыт последовательно (снизу вверх) следующими горизонтами: а) с сопротивлением $2 \text{ ом} \cdot \text{м}$, мощностью 100 м ; б) с сопротивлением $18 \text{ ом} \cdot \text{м}$ мощностью 100 м ; в) с сопротивлением $2 \text{ ом} \cdot \text{м}$ мощностью 50 м . Тогда для точек, которые расположены на выходах горизонта *а*, мы будем иметь кривые двуслойного типа с $\rho_1 = 2$ и $\rho_2 = \infty$; для точек, где на поверхность выходит горизонт *б*, — кривые трехслойного типа Н с $\rho_1 = 18$; $\rho_2 = 2$ и $\rho_3 = \infty$ (рис. 64) и, наконец, для точек с выходами горизонта *в* — четырехслойные кривые типа КН с $\rho_1 = 2$, $\rho_2 = 18$, $\rho_3 = 2$ и $\rho_4 = \infty$. Наличие горизонтов *а* и *б* будет в отдельности четко отражаться на кривой ВЭЗ лишь при небольшой мощности перекрывающего слоя. На рис. 64 кривые II и III относятся к точкам, где мощность горизонта *в* в одном случае 11 м , в другом 50 м . Из сопоставления этих кривых видно, что на кривой III уже не может быть отмечено наличие именно двух горизонтов *а* и *в* и кривая по своему внешнему виду может быть отнесена к трехслойной кривой типа А с $\rho_2 = \approx 8 \text{ ом} \cdot \text{м}$. Если рассматривать эту кривую как трехслойную, то глубина залегания опорного горизонта оценится примерно в 570 м , в то время как истинная глубина залегания этого горизонта равна всего 250 м .

И наконец, если бы все эти три горизонта перекрывались в свою очередь горизонтом высокого сопротивления, то на кривой ВЭЗ они отметились бы все вместе в виде относительно тупого минимума. На рис. 64 кривая IV соответствует как раз наличию сверху нового горизонта мощностью 50 м и с сопротивлением $80 \text{ ом} \cdot \text{м}$, который перекрывает горизонты *а*, *б* и *в*. Если подходить к интерпретации этой кривой вне связи с имеющимся представлением о разрезе и

считать, что имеется лишь один мощный второй слой, то с помощью палеток типа Н сопротивление оценится примерно в 6,0—6,5 *ом·м*, а глубина залегания опорного горизонта около 500 м (при истинной глубине 300 м).

Из этих примеров мы видим, в какой мере может быть ошибочно иногда заключение о типе разреза и какие отсюда могут быть погрешности в оценке глубин, если интерпретировать каждую кривую в отдельности, без учета других кривых на этом участке.

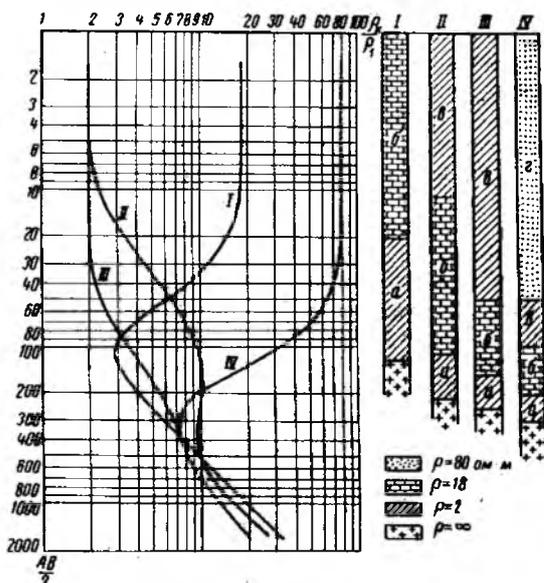


Рис. 64. Пример интерпретации кривых ВЭЗ.

Фактически же, если, например, известно, что минимум на кривой IV вызван наличием трех слоев, соотношения мощностей и сопротивлений которых хотя бы примерно известны, может быть определено приближенное значение ρ_t , а следовательно, и более близкая к истинной глубина залегания опорного горизонта, как $m_2 = h_1 + \rho_t (S - S_1)$.

Таким образом, прежде чем утверждать, что некоторые кривые, снятые на участке, не соответствуют полученному представлению о разрезе, необходимо во всех случаях хотя бы путем графических построений выяснить, какого типа кривые вообще могут быть получены при различных глубинах залегания опорного горизонта. Кроме того, необходимо приближенно, выяснить, в какой мере может отразиться на кривых ВЭЗ влияние наклонных к дневной поверхности границ раздела, неровностей поверхностного рельефа и т. п. Если после всего этого окажется, что кривые не удовлетворяют принятым представлениям о разрезе, может быть сделано предположение о его

изменении. Если такого рода заключения могут быть сделаны по ряду точек, дающих согласованные результаты, то это даст возможность прийти к какой-то вероятной схеме или нескольким схемам геологического строения, которые в свою очередь должны быть согласованы с имеющимися геологическими материалами и представлениями о районе.

В этом случае, если по данным электроразведки может быть принято несколько возможных схем геологического строения, то, помимо геологических данных, совершенно необходимо в максимальной мере использовать возможности самой электроразведки (или других геофизических методов) для уменьшения числа возможных вариантов принимаемых геологических схем. Для этой цели может оказаться необходимым проведение дополнительных точек ВЭЗ с различными направлениями разностей, электропрофилирования, работ по определению направления простирания анизотропных пород (для доказательства наличия крутых углов падения) методом спир или съемкой эллипсов анизотропии, магнитометрических работ при допущении наличия штоков или даек изверженных пород среди осадочных и т. п.

Если какие-либо отклонения от принятого геологического разреза наблюдаются на одной или нескольких точках (например, резкое поднятие или погружение тех или иных пород или резкое увеличение мощности наносов), то проведение дополнительных точек позволит не только подтвердить наличие таких отклонений, но и более детально оконтурить площадь, где они наблюдаются.

В качестве вспомогательного материала для получения первых, грубых представлений о строении района, помимо карты S , иногда целесообразно построение карт изом (например, при хорошо проводящем подстилающем слое), а также разрезов ρ_k . При построении последних по оси абсцисс откладываются расстояния между различными точками ВЭЗ по профилю в арифметическом масштабе, а по оси ординат — значения $\frac{AB}{2}$. После этого для каждой точки ВЭЗ отмечаются значения $\frac{AB}{2}$, при которых ρ_k соответствуют определенным, принятым для нанесения изом, значениям ρ_z (например, 2; 3,2; 5; 8; 13; 20; 32; 50 *ом·м* и т. д.).

Разрезы ρ_k дают возможность составить первое качественное представление о геологическом строении, т. е. о наличии поднятий и погружений тех или иных горизонтов, о резких изменениях разреза, о влиянии наносов и т. п. Кроме того, разрезы ρ_k дают возможность легко оценить необходимые величины разностей при переходе от ВЭЗ к электропрофилированию.

Выявление и учет при интерпретации возможных изменений сопротивлений пород

Приемы оценки сопротивлений пород различными методами были описаны выше (см. § 12, 13, 14). В данном разделе будут даны некоторые указания по вопросу использования данных о сопротивлениях

пород, полученных на отдельных точках, при интерпретации соседних кривых, снятых на том же участке. Разумеется что, чем более постоянными выдерживаются сопротивления тех или иных пород на исследуемом участке (по ряду точек), тем с большим правом и уверенностью можно интерполировать полученные значения сопротивлений на соседние точки.

Выше уже отмечалось, что глины, мергели, суглинки и т. п., у которых пределы относительных изменений пористости сравнительно невелики, обладают в общем случае наибольшим постоянством сопротивлений, особенно при небольших площадях исследований. В то же время, например, изменение сопротивлений пористых пород, обладающих хорошей фильтрующей способностью (пески, галечники), может колебаться в значительных пределах вследствие возможных изменений степени минерализации насыщающих вод.

Не следует, однако, думать, что при невыдержанности сопротивлений тех или иных пород проведение электроразведки во всех случаях будет нецелесообразной. Невыдержанность сопротивлений действительно является неблагоприятным фактором для применения электроразведки. Особенно неблагоприятно этот фактор отражается на точности интерпретации в том случае, если непостоянным сопротивлением обладает горизонт, непосредственно перекрывающий опорный горизонт, глубину залегания которого должна оценить электроразведка. Если же резкое непостоянство сопротивлений отмечается для более высоко залегающих горизонтов или для поверхностного слоя, то, как это отмечалось выше, неточность в оценке их мощности отразится на конечном результате уже в значительно меньшей степени.

Кроме того, в том случае, когда имеется возможность получить представление о закономерностях изменений сопротивлений тех или иных пород с тем, чтобы их можно было учитывать при интерпретации, применение электроразведки может быть достаточно эффективным и получаемые данные могут удовлетворить поставленным перед геофизикой требованиям.

В целом ряде случаев изменения сопротивлений того или иного горизонта могут представлять практический интерес и служить объектом для применения электроразведки. В этих случаях электроразведка используется именно для локализации и прослеживания зон пониженного и повышенного сопротивления какого-либо горизонта, например при оконтуривании площади распространения минерализованных вод среди пресных или пресных вод среди минерализованных. В этих случаях увеличение продольной проводимости соответствующего проводящего горизонта будет прямо пропорционально увеличению его мощности и минерализации насыщающих вод, а карта S позволит выделить участки, более интересные с точки зрения «запасов минеральных вод».

Представления о степени выдержанности сопротивления могут быть получены исходя из данных фактических наблюдений:

каротажа ВЭЗ у скважин, параметрических ВЭЗ, предварительных данных интерпретации по всем точкам ВЭЗ и т. п.

Разумеется, что прежде чем говорить о непостоянстве сопротивлений тех или иных электрических горизонтов, необходимо иметь уверенность в правильности оценки сопротивлений. В частности, выше были приведены некоторые примеры, показывающие, какие ошибки могут быть получены при оценке сопротивлений по кривым ВЭЗ, если их рассматривать вне связи с кривыми ВЭЗ, произведенными на других точках исследуемого участка. Кроме того, при работе в условиях развития анизотропных пород необходимо помнить, что значения сопротивлений, определяемых по кривым ВЭЗ, соответствуют ρ_m , в то время как при оценке сопротивлений по кривым ВЭЗ у скважин иногда можно получить только либо ρ_l , либо ρ_n . И наконец, погрешности в оценке сопротивлений могут быть связаны также с влиянием наклонных границ раздела.

Полученные в конечном итоге представления о непостоянстве сопротивлений того или иного горизонта (или горизонтов) должны быть расширены с точки зрения выявления возможных закономерностей изменений сопротивлений. Разумеется, что закономерности изменения сопротивлений, при прочих равных условиях, могут быть выявлены тем легче и успешнее, чем больше число точек фактических наблюдений. В этом случае может быть построена карта сопротивлений (изоом) интересующего нас горизонта, которая даст возможность сказать, как изменяется его сопротивление на различных участках в зависимости от его положения по отношению к структуре (сводовая часть антиклинали и синклинали) в зависимости от возраста и глубины залегания данных пород, в зависимости от геоморфологических особенностей рельефа (для сопротивления наносов) и т. п. Такого рода общие закономерности могут быть подмечены иногда даже при относительно небольшом числе точек, для которых определено сопротивление. В результате это позволит более обоснованно использовать значения сопротивлений, полученные для отдельных точек, при интерпретации кривых ВЭЗ по всему исследованному участку.

В этом отношении представляет интерес выполненная А. Т. Донбедовым работа по обобщению материалов геофизических исследований в Донбассе, устанавливающая некоторые закономерности изменения физических свойств отложений карбона в региональном масштабе. В частности, на основании этой работы установлено, что электрическое сопротивление пород среднего и верхнего карбона (песчаники, песчанистые сланцы, глинистые сланцы) закономерно уменьшается от центральных областей Донбасса к его северной, северо-западной и западной окраинам и не зависит от принадлежности их к той или иной свите карбона, а также от глубины их залегания. Аналогичные закономерности изменения наблюдаются и для некоторых других физических свойств (плотность, упругие свойства); при сопоставлении полученных данных с имеющимися геологическими материалами выявляются закономерности в изменении физических

свойств при переходе от складчатой области к платформе, связанные с уменьшением мощности осадков и интенсивности процессов складкообразования. Эти закономерности выражаются уменьшением электрического сопротивления пород.

В том случае, если имеющихся данных о сопротивлениях недостаточно, для выявления закономерностей изменения сопротивлений на исследуемом участке могут быть использованы геологические и гидрогеологические материалы в виде сведений о предполагаемом литологическом составе пород, возможных изменениях степени минерализации вод, фациальных изменениях пород, выдержанности их мощностей и т. п. Наличие таких сведений позволяет иногда утверждать о возможных изменениях сопротивлений, что требует освещения в данном руководстве вопроса о возможных, в связи с этим, погрешностях в оценке мощностей и глубин.

В заключение данного раздела следует подчеркнуть важность использования данных других геофизических методов с точки зрения оценки как сопротивлений, так и тех факторов, с которыми связаны их изменения. Например, изменение только минерализации вод, насыщающих породы, практически не изменяет плотности и упругих свойств пород, в то время как изменения сопротивлений вследствие изменения пористости (и водонасыщенности) обычно соотвествуют одновременному изменению упругих свойств пород.

В связи с этим, при проведении комплексных геофизических исследований взаимное сопоставление данных по изменениям различных физических свойств следует считать совершенно необходимым.

Необходимость учета влияния анизотропии

Выше были описаны приемы оценки наличия свойств анизотропии и величин коэффициентов анизотропии по данным каротажа и кривой ВЭЗ у скважины. Эти данные могут быть использованы непосредственно при интерпретации с тем, чтобы получать более близкие к истинным значения мощностей и глубин залегания. Однако в целом ряде случаев, за отсутствием скважины, мы не имеем возможности оценить величины коэффициентов анизотропии и тогда чаще всего влияние анизотропии не учитывается, несмотря даже на то, что по имеющимся представлениям о геологическом разрезе последний должен обладать анизотропными свойствами. Разумеется, что если к кривым, снятым на исследуемом участке, соответствующий принцип эквивалентности действует в относительно широких пределах и значения сопротивлений принимаются приближенно, введение поправок за анизотропию нецелесообразно, так как в этом случае погрешности, обусловленные неучетом анизотропии пород, могут оказаться меньше погрешностей, вызванных неточностью оценки сопротивлений.

Кроме того, если по данным ВЭЗ у скважины (при отсутствии каротажа) были определены значения ρ_c (для кривых типа Н и А)

или ρ_n (для кривых типа К и Q), то этим самым поправки за анизотропию автоматически учитываются. Однако в тех случаях, когда по геологическим данным заведомо известно, что тот или иной электрический горизонт представляет чередование литологически различных пород, иногда целесообразно ввести приближенные поправки за анизотропию. Если, например, оценка сопротивления того или иного горизонта производилась по графикам ВЭЗ, расположенным в наиболее благоприятных для этой цели участках, то полученные значения сопротивлений, как известно, будут соответствовать среднему квадратичному сопротивлению ρ_m и получаемые мощности окажутся увеличенными в λ раз.

Естественно, что, используя полученные значения сопротивлений для интерпретации других точек ВЭЗ, мы также будем получать заведомо увеличенные мощности и глубины залегания. В этих случаях принятие хотя бы приближенных значений λ (исходя из имеющихся геологических представлений о разрезе) позволит оценить мощности и глубины с относительно меньшей погрешностью.

Для возможности введения таких поправок необходимо иметь систематизированные и обобщенные данные по анизотропным свойствам различных разрезов по разным районам. В табл. 4 приведены значения λ , вычисленные по данным Л. Я. Нестерова [19].

Таблица 4

Порода	Коэффициент микроанизотропии
Глина слоистая	1,1—2,6
Шифер	1,4—2,2
Сланец глинистый	2,7
Песчаник (в естественных условиях)	1,3

Весьма интересные и богатые материалы по оценке коэффициентов макроанизотропии могли бы быть получены при использовании данных каротажных работ, проводившихся особенно за последние годы во многих районах, в различных условиях и для различных типов разрезов, а также данных ВЭЗ у скважин, позволяющих подойти к оценке коэффициентов общей анизотропии.

Не имея возможности привести соответствующие материалы в достаточном количестве, мы ограничимся указанием, что значения коэффициентов общей анизотропии для осадочных пород при относительно слабо дифференцированном (по сопротивлениям) разрезе соответствуют $\lambda = 1,1—1,5$, а при наличии достаточно резкой дифференциации сопротивлений доходят до $\lambda = 2,0$ и больше. В связи

с этим, для возможности введения хотя бы примерных поправок за влияние анизотропии, если значения λ неизвестны, следует:

1) использовать значения λ , полученные для аналогичных разрезов по другим изученным районам, лучше всего близлежащим;

2) если таких материалов нет, иногда целесообразно ввести хотя бы условно принятый коэффициент λ в пределах наиболее часто встречаемых значений $\lambda =$ от 1,1 до 1,5. Разумеется, что эта условность должна быть оговорена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин Л. М., Заметки по теории электрической разведки. Серия руководств по электроразведке, вып. 4 (8). ВКГР, 1935.
2. Альпин Л. М. Негоризонтальные поверхности раздела и палетки КЗЛ. Сборник по прикладной геофизике № 1. ГСГТ, 1940.
3. Альпин Л. М. Теория дипольных зондирований. Гостоптехиздат, 1950.
4. Богданов А. И. Графический метод интерпретации некоторых типов трехслойных кривых вертикальных электроразведочных зондирований. Материалы ЦНИГРИ, Геофизика, сб. 8, 1940.
5. Богданов А. И. Графический способ построения и интерпретации трехслойных кривых вертикального электрического зондирования. Гостоптехиздат, 1948.
6. Вешев А. В. Влияние рельефа на результаты работ комбинированым профилированием. Ученые записки ЛГУ, № 278, вып. 11, 1959.
7. Головчин В. М. Электроразведка. Изд-во АН УССР, 1963.
8. Дахинов В. Н. Электрическая разведка постоянным током. ОНТИ, ч. I, 1933; ч. II, 1935; ч. III, 1934.
9. Дахинов В. Н. О применении ВЭЗ при разведке наклоннопадающих сред. Сборник по прикладной геофизике, № 2, ГСГТ, 1940.
10. Дахинов В. Н. Электрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, 1953.
11. Дахинов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Гостоптехиздат, 1955.
12. Заборовский А. И. Электроразведка. Гостоптехиздат, 1963.
13. Запорожец В. М. Влияние рельефа на результаты замеров сопротивления (по работам С. Г. Комарова и Л. П. Горбенко). Элгр, № 4 (12), 1938.
14. Каленов Е. Н. Опыт графического построения семислойных кривых вертикального зондирования. Элгр, № 2 (6), 1937.
15. Каленов Е. Н. Практические способы интерпретации вертикальных электрических зондирований. ГОНТИ, 1939.
16. Каленов Е. Н. Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования. Гостоптехиздат, 1957.
17. Майэ Р. Математические основания электрической разведки постоянным током. ОНТИ, 1935.
18. Мартэн М. К вопросу интерпретации данных полевой электроразведки. ВКГР, 1937.
19. Нестеров Л. Я., Бибииков Н. С., Усманов А. Ш. Курс электроразведки. ГОНТИ, 1938.
20. Нестеров Л. Я. Физические свойства песчаников, известняков и сланцев. Материалы ЦНИГРИ, Геофизика, сб. 8, 1940.
21. Поляков А. С. Влияние рельефа на кривые комбинированного профилирования. В сб. «Геофизические методы разведки в Казахстане». Изд. Казахск. Республ. НТО горное, 1958.

22. Пылаев А. М. К вопросу об интерпретации трехслойных кривых электробуриения при больших сопротивлениях третьего слоя. Геофизика, т. VI, вып. 6, 1936.
23. Пылаев А. М. К вопросу интерпретации многослойных кривых вертикального зондирования. ВСЕГЕИ, 1937.
24. Пылаев А. М. Заметки по интерпретации ВЭЗ. Приложение к комплекту трехслойных палеток, ВСЕГЕИ, 1940.
25. Рабинович Б. И., Кежугин Н. Г. Электрическое зондирование методом вычитания полей. Геология и геофизика, № 5, 1962.
26. Семенов А. С. Боковые влияния. Материалы ЦНИГРИ. Геофизика, сб. 5, 1938.
27. Семенов А. С. Влияние структуры на удельное сопротивление агрегатов. Материалы ВСЕГЕИ. Геофизика, № 12, 1948.
28. Чантуришвили Л. С. Электроразведка при проектировании дорог на пересеченной местности. Автотрансиздат, 1959.
29. Шахнес К. А. Статистические способы интерпретации кривых ВЭЗ. В сб. «Разведочная и промысловая геофизика», вып. 6. Гостонтехиздат, 1953.
30. Шейнман С. М. Элементы теории электроразведки и электрически анизотропных свит. ВКГР, 1933.
31. Шлюмберже К. М., Леонардон Е. К вопросу об электрических замерах в анизотропной среде и их интерпретации. Серия руководств по электроразведке, вып. 4. НГРИ, 1934.
32. Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. Госгеолтехиздат, 1956.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
Глава I. Основы методики интерпретации ВЭЗ	
§ 1. Общие сведения. Перечень палеток	5
§ 2. Некоторые замечания о характере теоретических кривых. Принцип эквивалентности	12
Двуслойные кривые	12
Кривые типа Н и принцип эквивалентности S_2	13
Кривые типа К и принцип эквивалентности T_2	21
Кривые типа Q и принцип эквивалентности T_2	26
Кривые типа А и принцип эквивалентности S_2	29
Общее понятие об эквивалентных разрезах	32
§ 3. Основные сведения по анизотропии	33
Основные определения	33
Примеры анизотропных образований	35
Парадокс анизотропии	37
Треугольник анизотропии	38
§ 4. Приемы графического построения трехслойных кривых	40
Общие положения	40
Построение трехслойных кривых типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$). Точка Н	42
Построение трехслойных кривых типа Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$). Точка Q	49
Построение трехслойных кривых типа А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$). Точка А	48
Построение трехслойных кривых типа К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). Точка К	50
§ 5. Приемы графического построения четырехслойных и многослойных кривых	54
Общие положения	54
Построение четырехслойной кривой типа НК ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)	56
Построение четырехслойной кривой типа НА ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)	58
Построение четырехслойной кривой типа QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)	60
Построение четырехслойной кривой типа QQ ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)	62
Построение четырехслойной кривой типа KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)	65
Построение четырехслойной кривой типа KQ ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)	66
Построение четырехслойной кривой типа AA ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)	68
Построение четырехслойной кривой типа АК ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)	70
Построение многослойных кривых различных типов	71
§ 6. Электрическое сопротивление горных пород	71
Общие сведения	71
Удельное сопротивление минералов	72
Пористость пород	72

	Стр.
Влагоемкость и водонасыщенность пород	73
Удельное сопротивление воды	73
Влияние температуры на сопротивление	75
Влияние формы и расположения пор на сопротивление	75
Электрическое сопротивление пород	76
§ 7. Влияние вертикальных и наклонных границ раздела на результаты измерений ρ_k	78
Общие положения	78
Вертикальная граница раздела двух сред	78
Наклонная граница раздела двух сред	82
Боковое влияние непроводящих пород	86
Боковое влияние проводящих пород (явление обтекания тока)	89
§ 8. Влияние на результаты измерений ρ_k неровностей поверхностного рельефа	92
Глава II. Интерпретации кривых ВЭЗ	
§ 9. Применение палетки ρ_2 при интерпретации	93
Двуслойные кривые	93
Трехслойные кривые	94
§ 10. Трехслойные палетки и их применение при интерпретации трехслойных кривых ВЭЗ	103
Палетки типа Н и их использование при интерпретации	103
Палетки типа К и их использование при интерпретации	107
Палетки типа Q и их использование при интерпретации	109
Палетки типа А и их использование при интерпретации	110
§ 11. Применение трехслойных палеток при интерпретации четырехслойных и многослойных кривых ВЭЗ	111
Общие положения	111
Кривые типов НК ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) и НА ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)	112
Кривые типов КН ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) и КQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)	114
Кривые типов QH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) и QQ ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)	115
Кривые типов АК ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) и АА ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)	115
Многослойные кривые различных типов	116
Некоторые общие замечания об интерпретации	117
§ 12. Оценка сопротивлений и коэффициентов анизотропии по данным каротажа	120
§ 13. Оценка сопротивлений и коэффициентов анизотропии по данным ВЭЗ у скважин	125
Кривые двуслойного типа	126
Кривые типа Н	127
Кривые типа К	128
Кривые типа Q	130
Кривые типа А	130
Четырехслойные и многослойные кривые различных типов	131
§ 14. Другие методы получения параметрических данных	132
§ 15. О методике интерпретации ВЭЗ	134
Оценка электрического разреза	135
Выявление и учет при интерпретации возможных изменений сопротивлений пород	138
Необходимость учета влияния анизотропии	141
Литература	144
Приложение. Альбом палеток.	

Александр Михайлович Пылаев
РУКОВОДСТВО ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЗОНДИРОВАНИЙ
Издание второе, исправленное
с приложением

Научный редактор *Дертман Н. Б.*
Редактор издательства *Борько Т. И.*
Технический редактор *Ломичева Л. Н.*
Корректор *Емельянова Л. М.*

Сдано в набор 20/IX 1967 г.
Подп. в печ. 14/III 1968 г. Формат 60 x 90^{1/16}.
Бум. № 1. Печ. л. 9,25 + 7,75 прилож.
Уч.-изд. л. 14,40 с прилож. Т-04578.
Тираж 4400 экз. Зак. 1125/21-3.
Цена 1 р. 27 к. с приложением. Индекс 1-3-1.

Издательство «Недра», Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19.

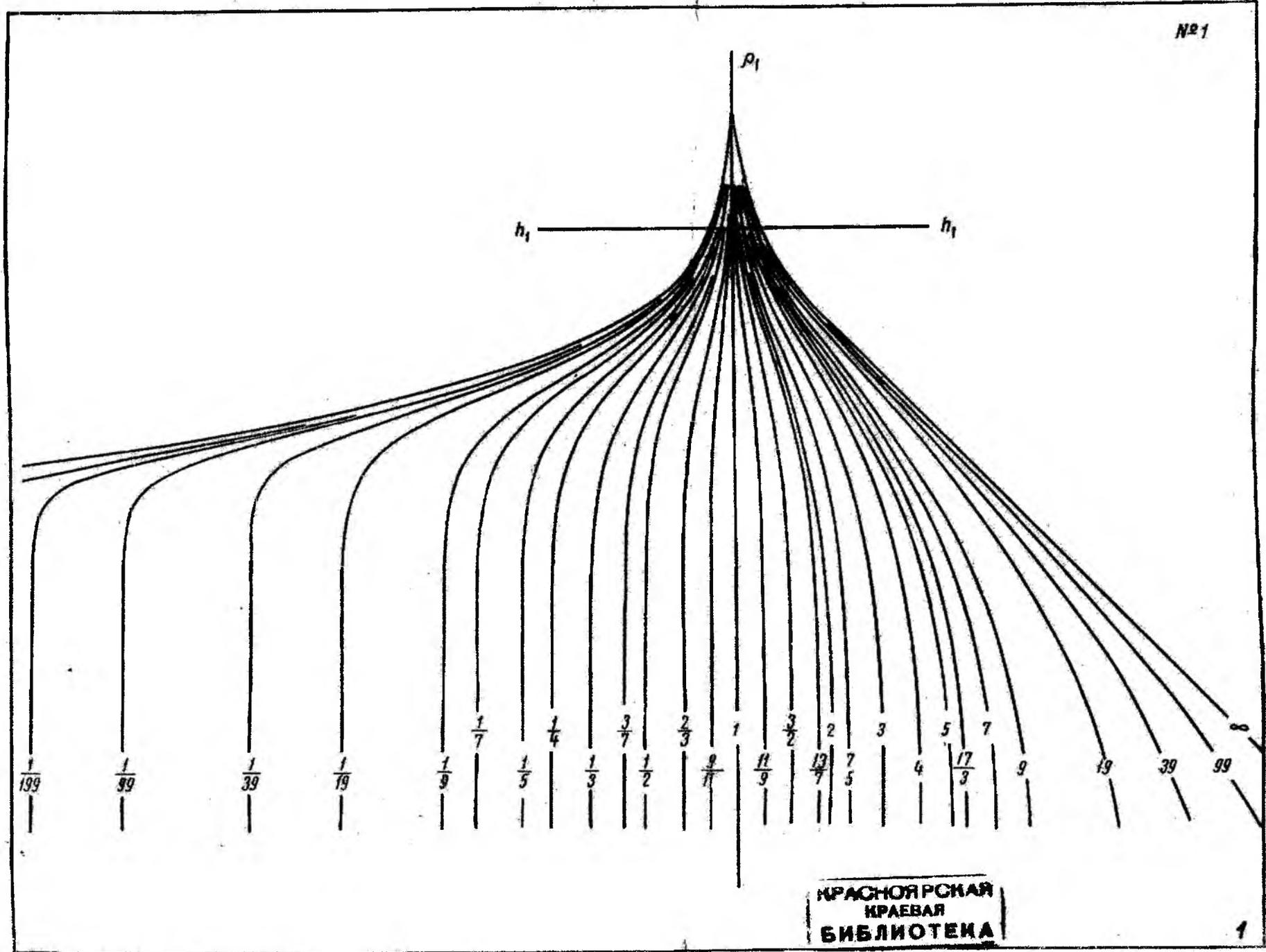
Ленинградская типография № 14
«Красный Печатник» Главолиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Московский проспект, 91.

А. М. ПЫЛАЕВ

ПРИЛОЖЕНИЕ

**РУКОВОДСТВО
ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЗОНДИРОВАНИЙ**

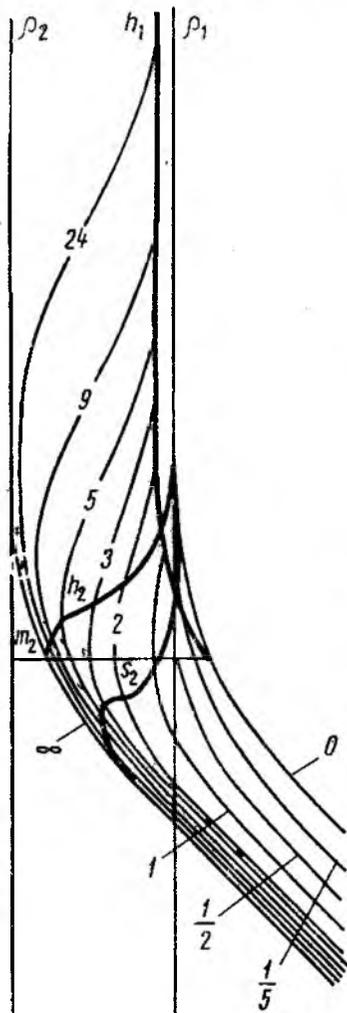
НЕДРА—1968



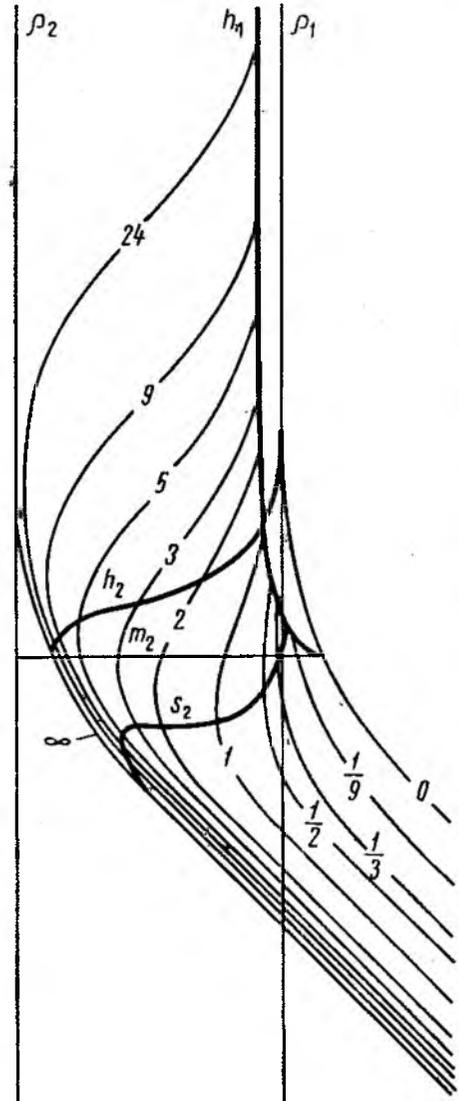
КРАСНОЯРСКАЯ
 КРАЕВАЯ
 БИБЛИОТЕКА



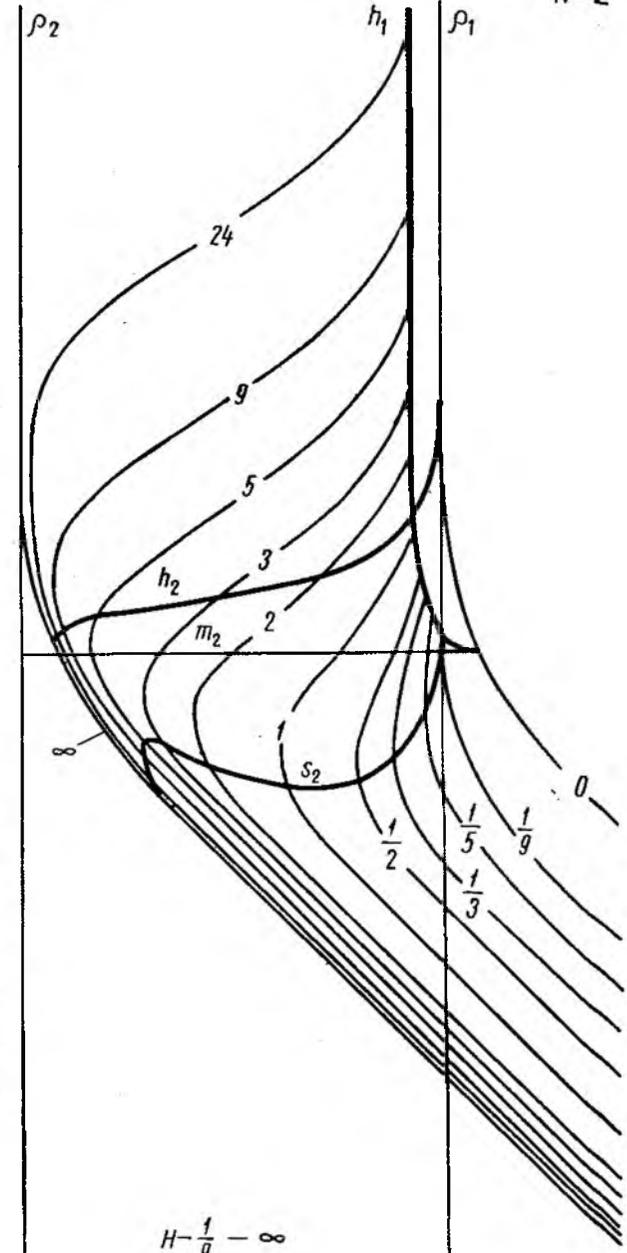
$$H - \frac{2}{3} - \infty$$



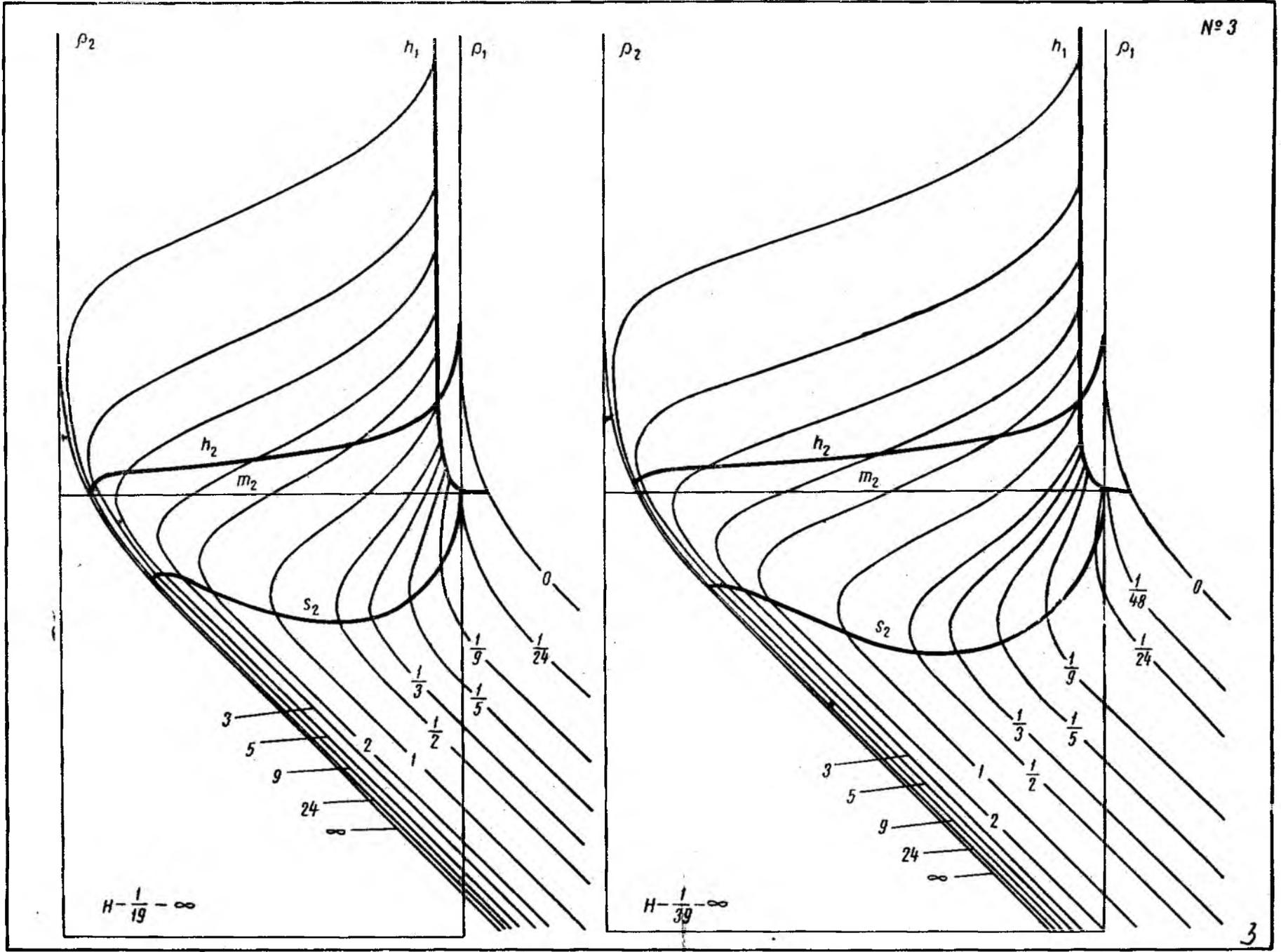
$$H - \frac{3}{7} - \infty$$

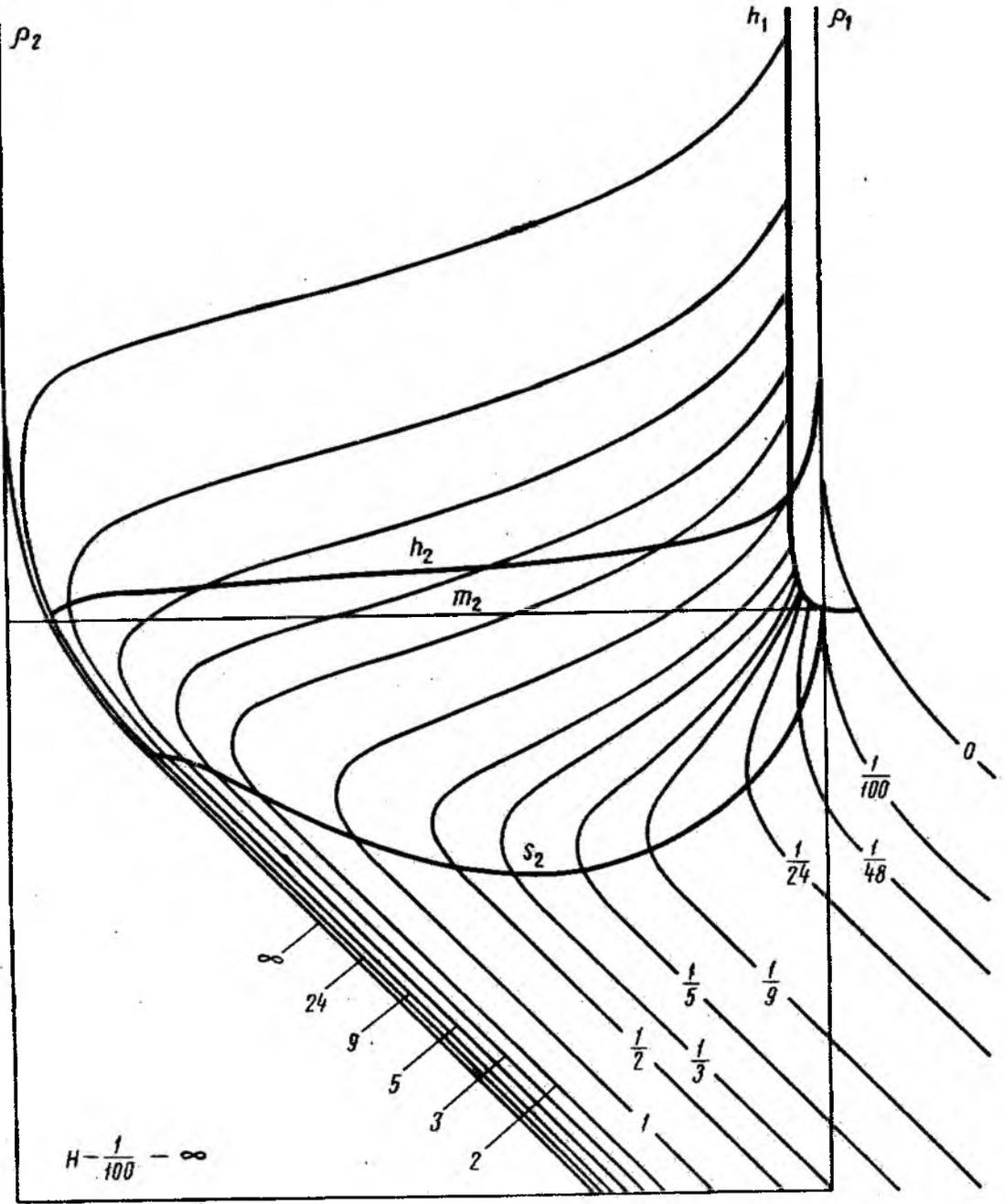


$$H - \frac{1}{4} - \infty$$



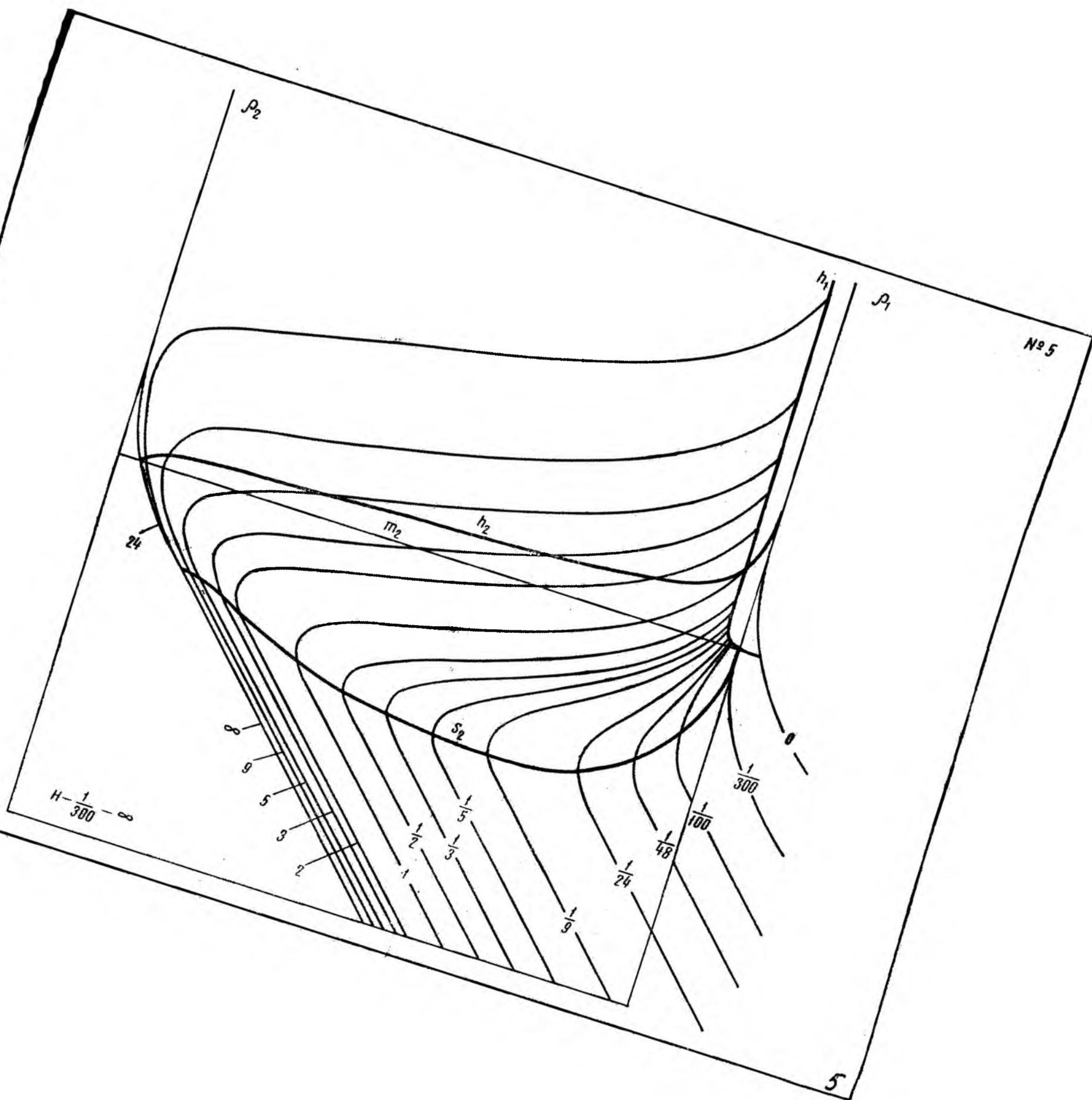
$$H - \frac{1}{9} - \infty$$



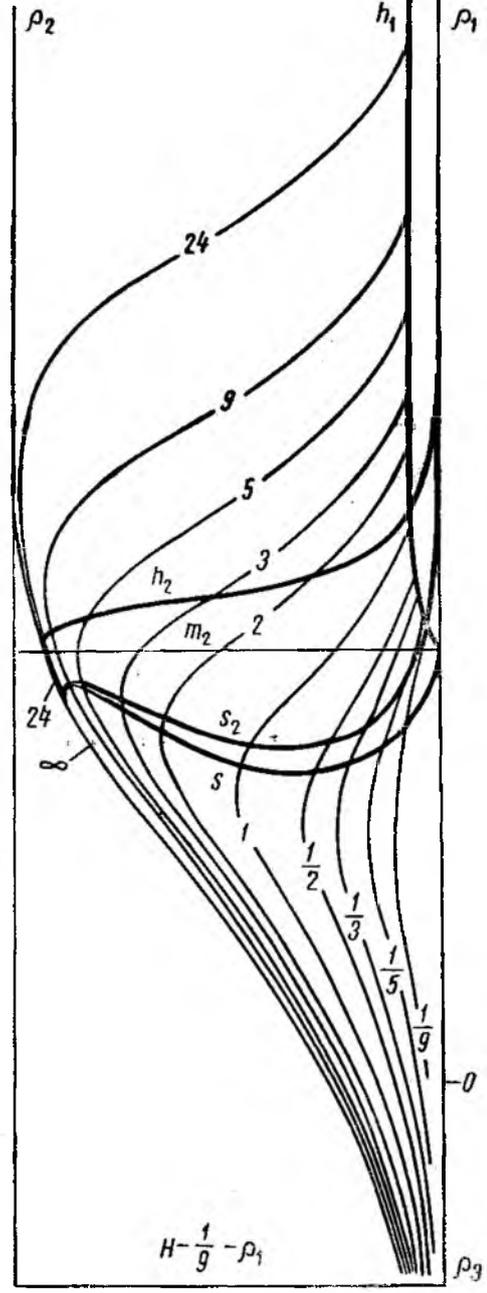
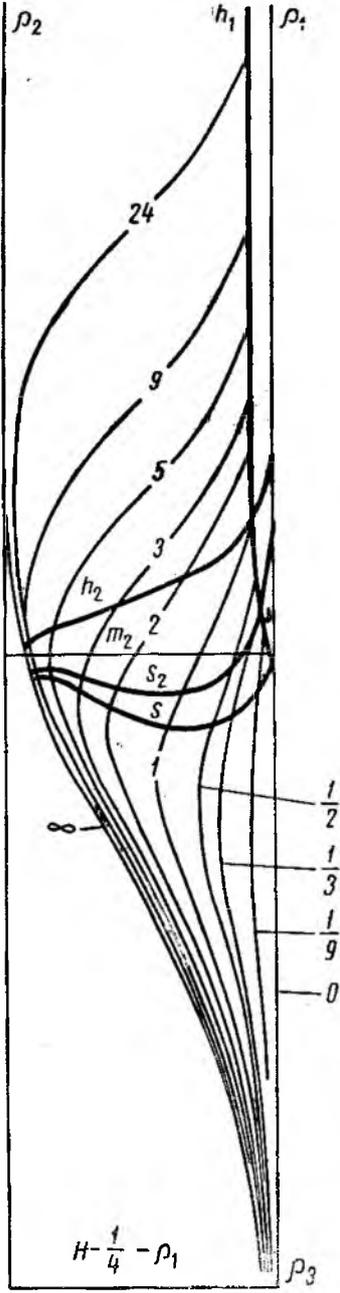
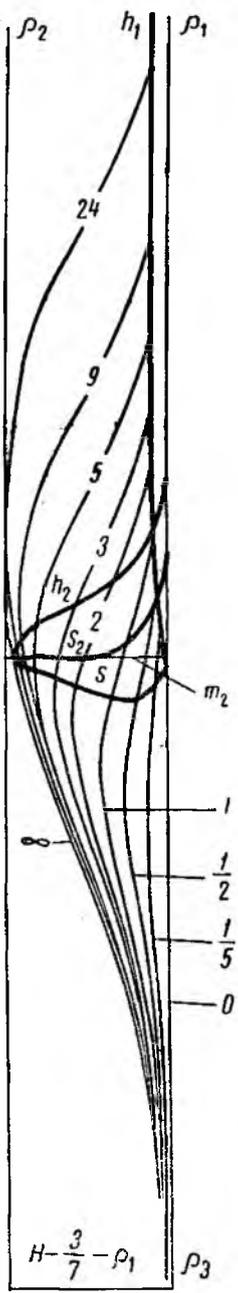
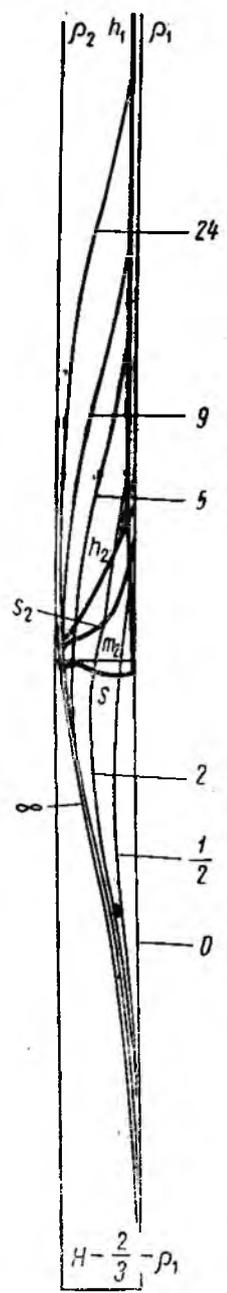


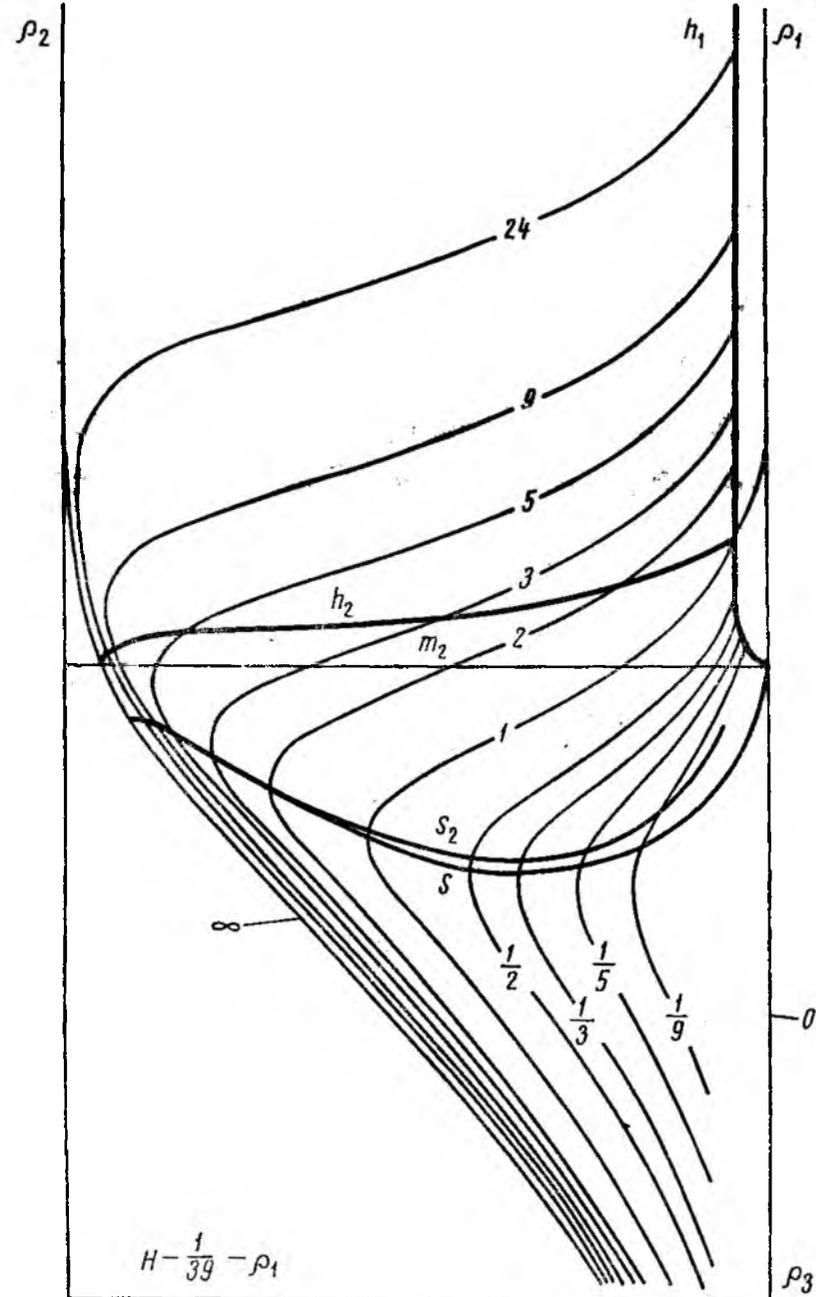
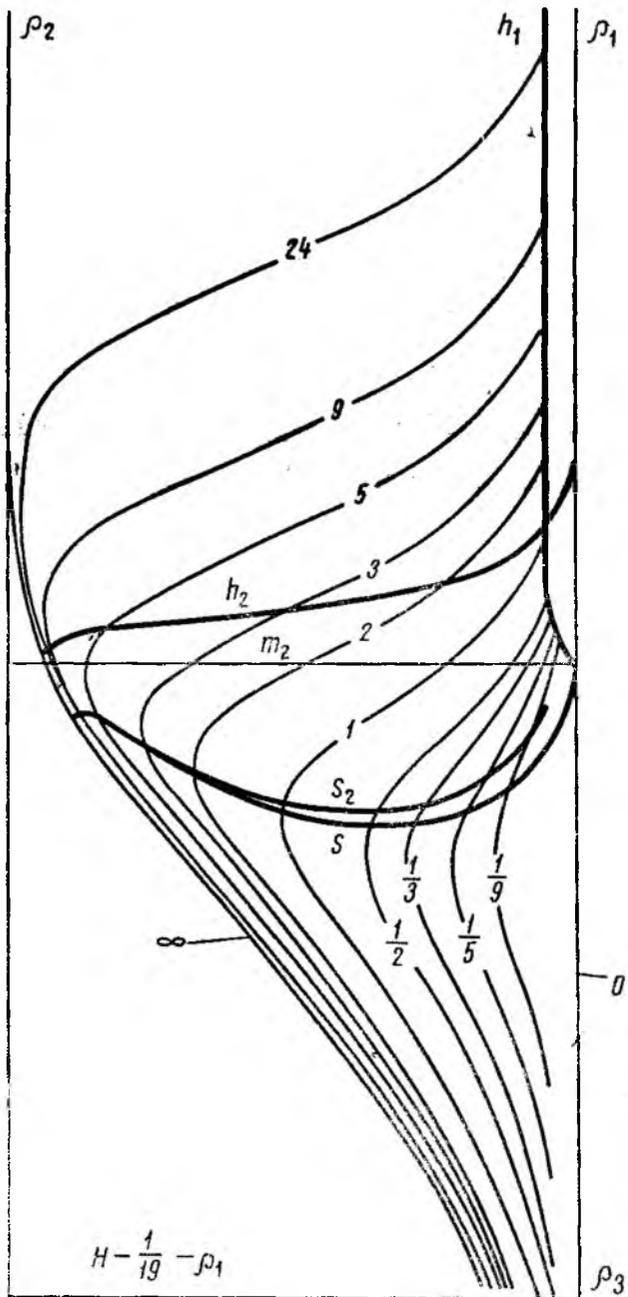
$H = \frac{1}{100} - \infty$

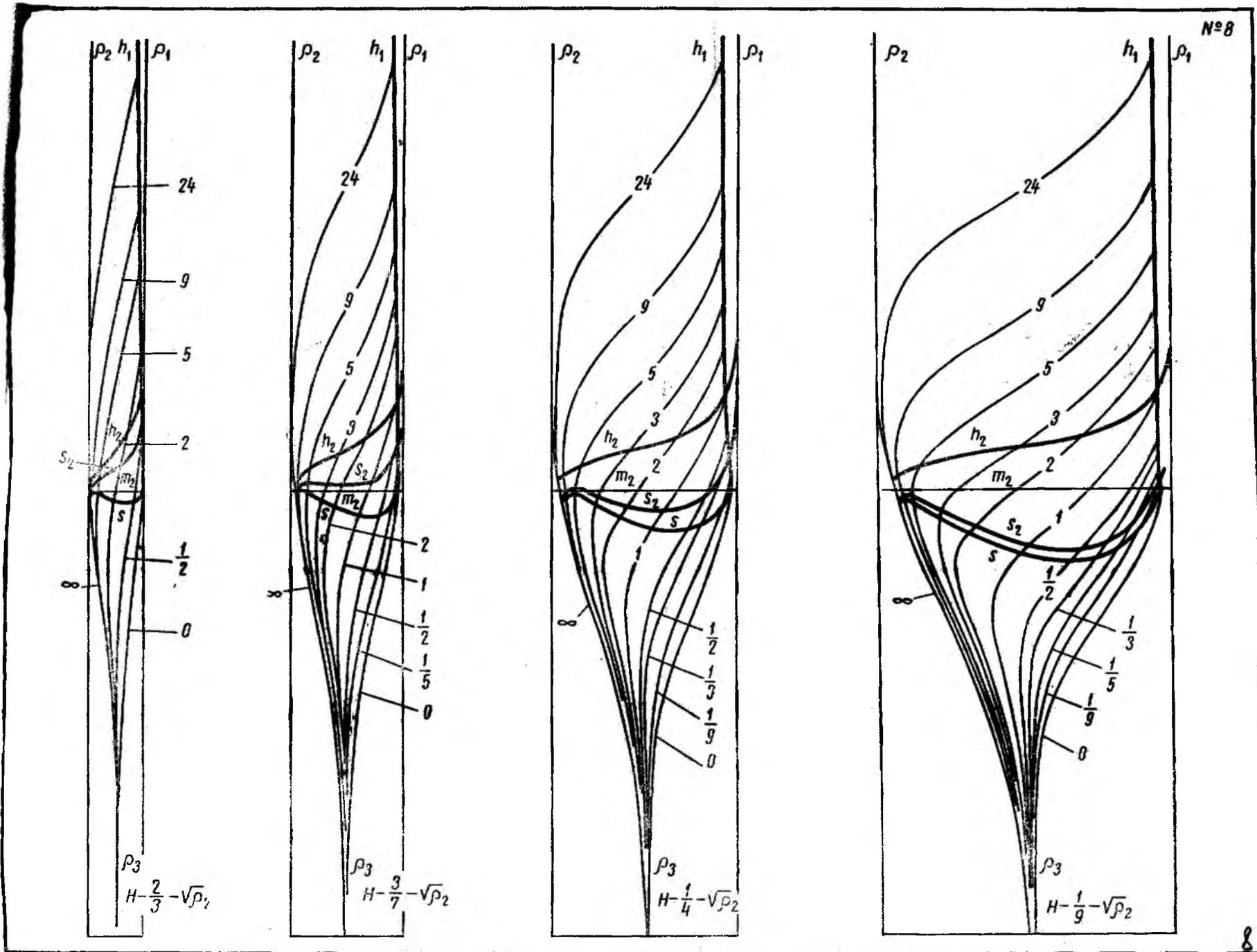
№ 5

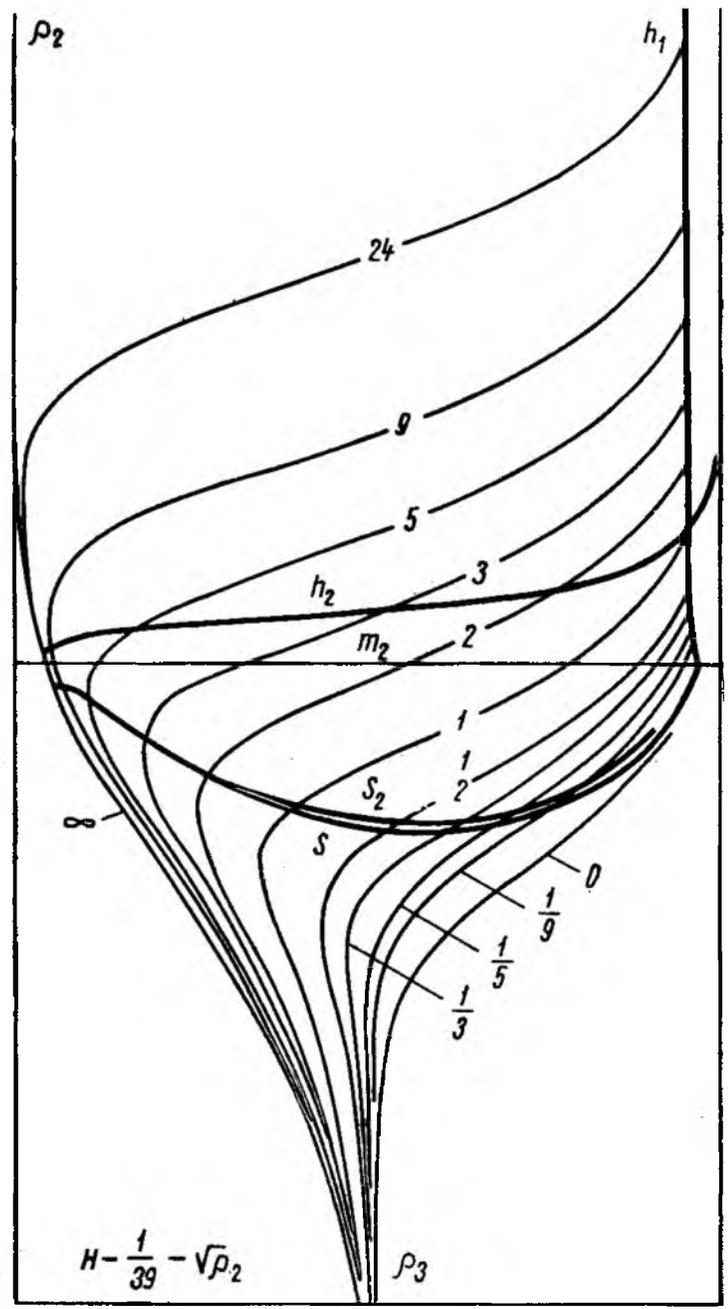
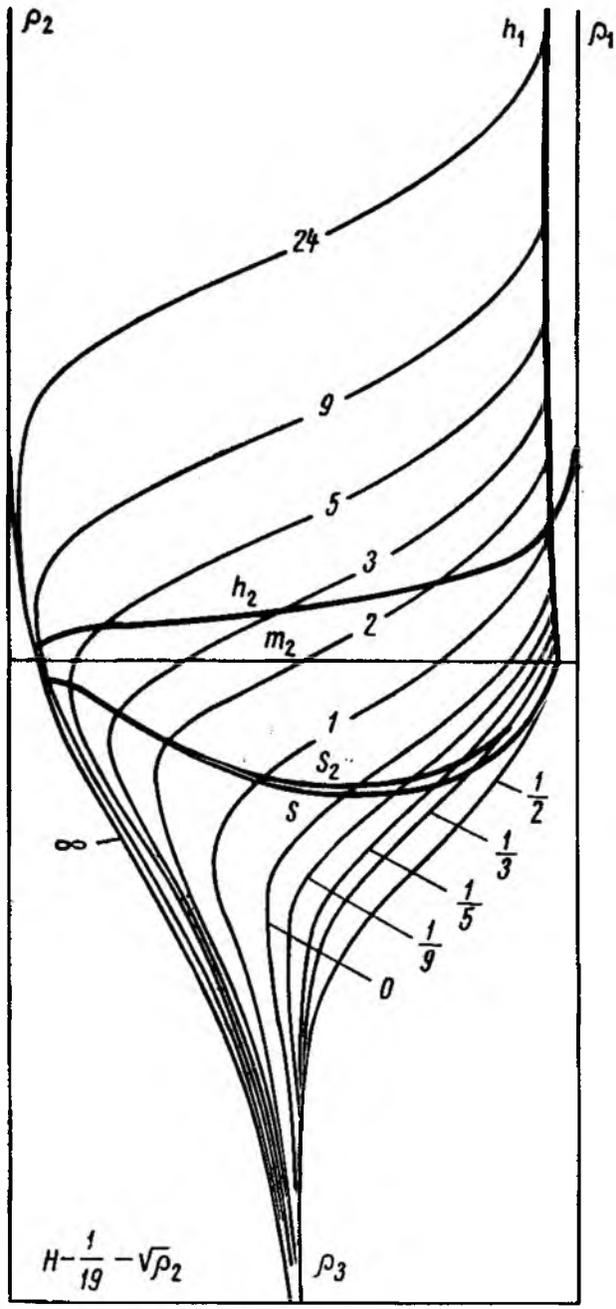


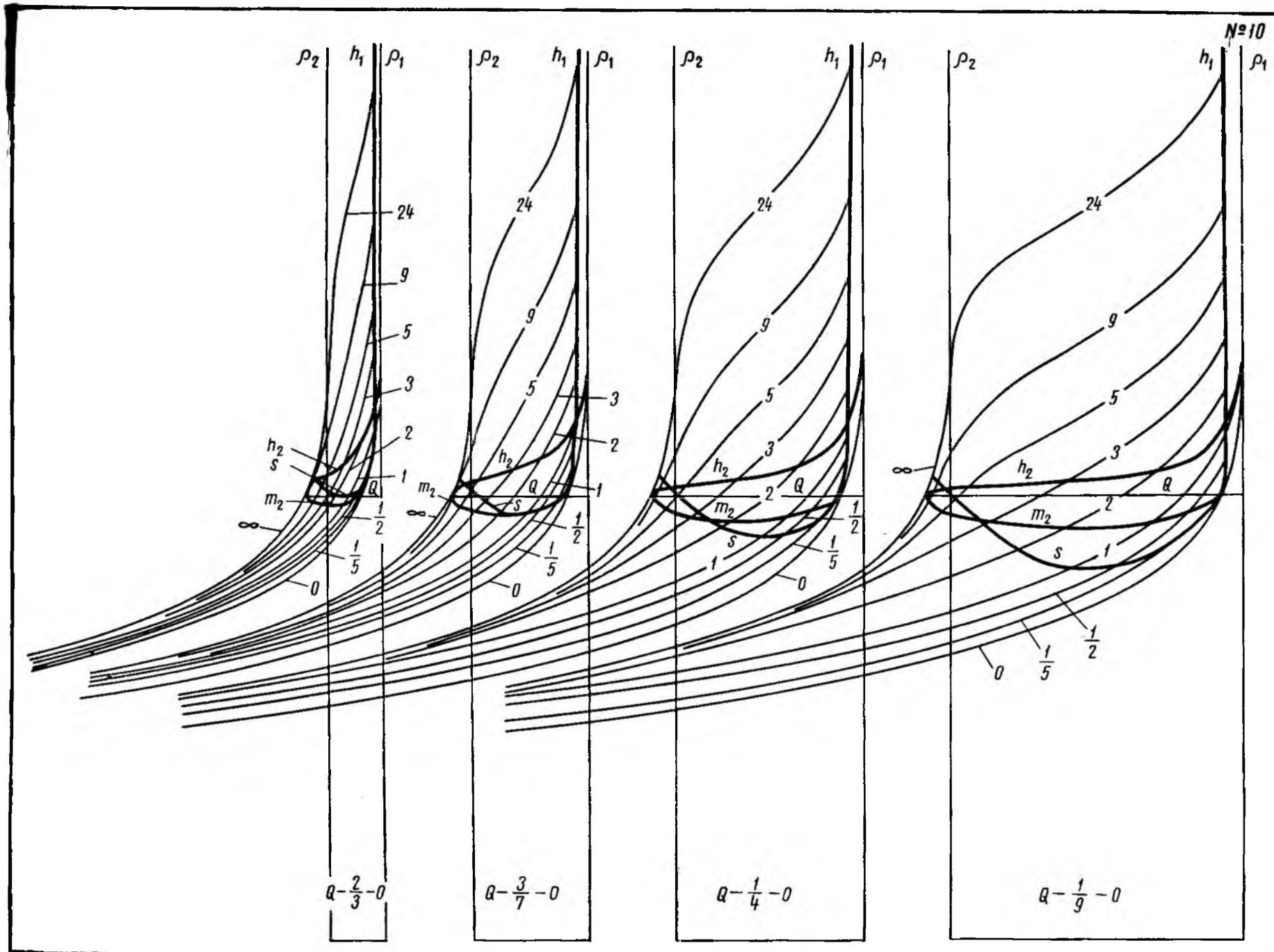
5

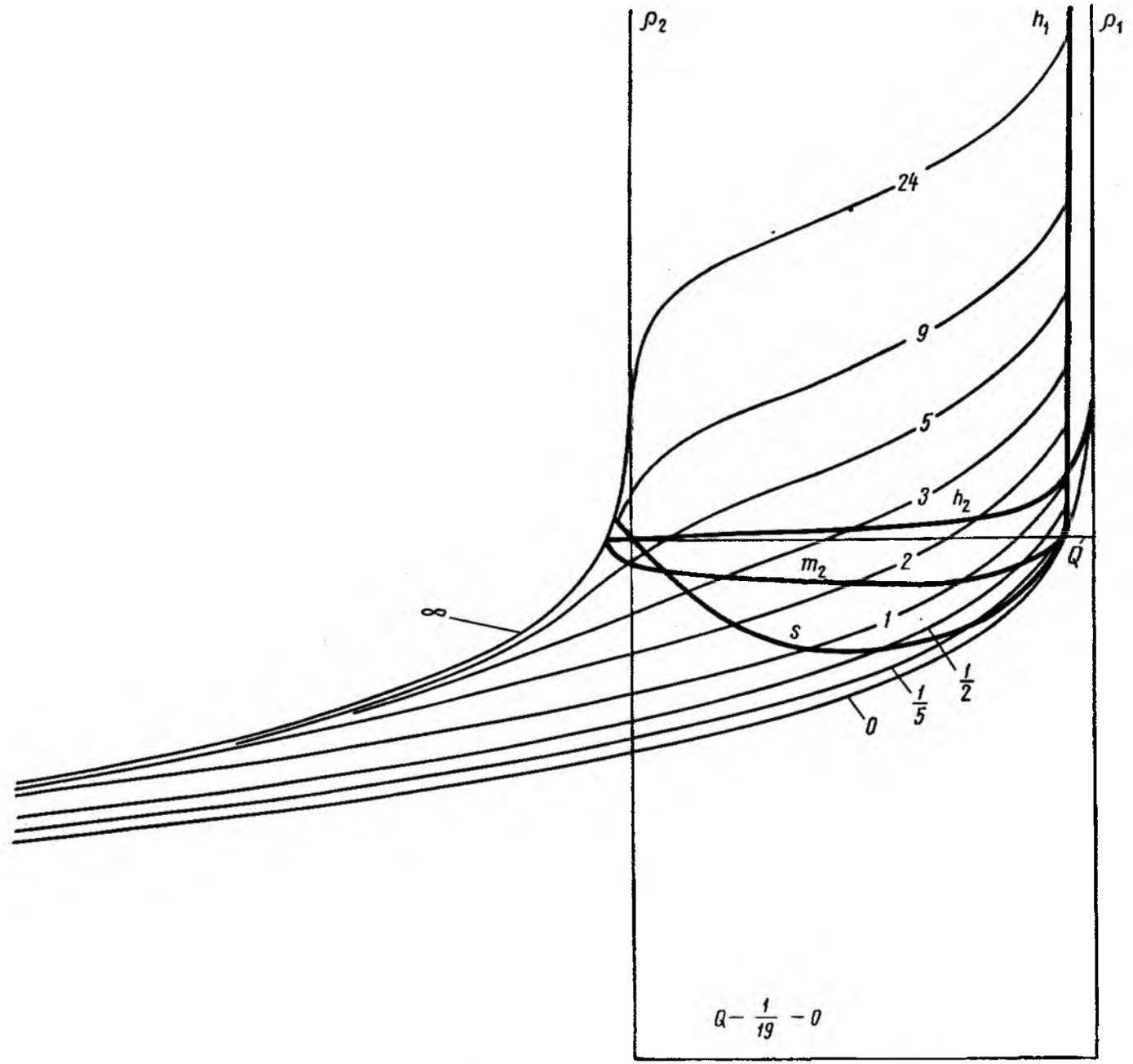


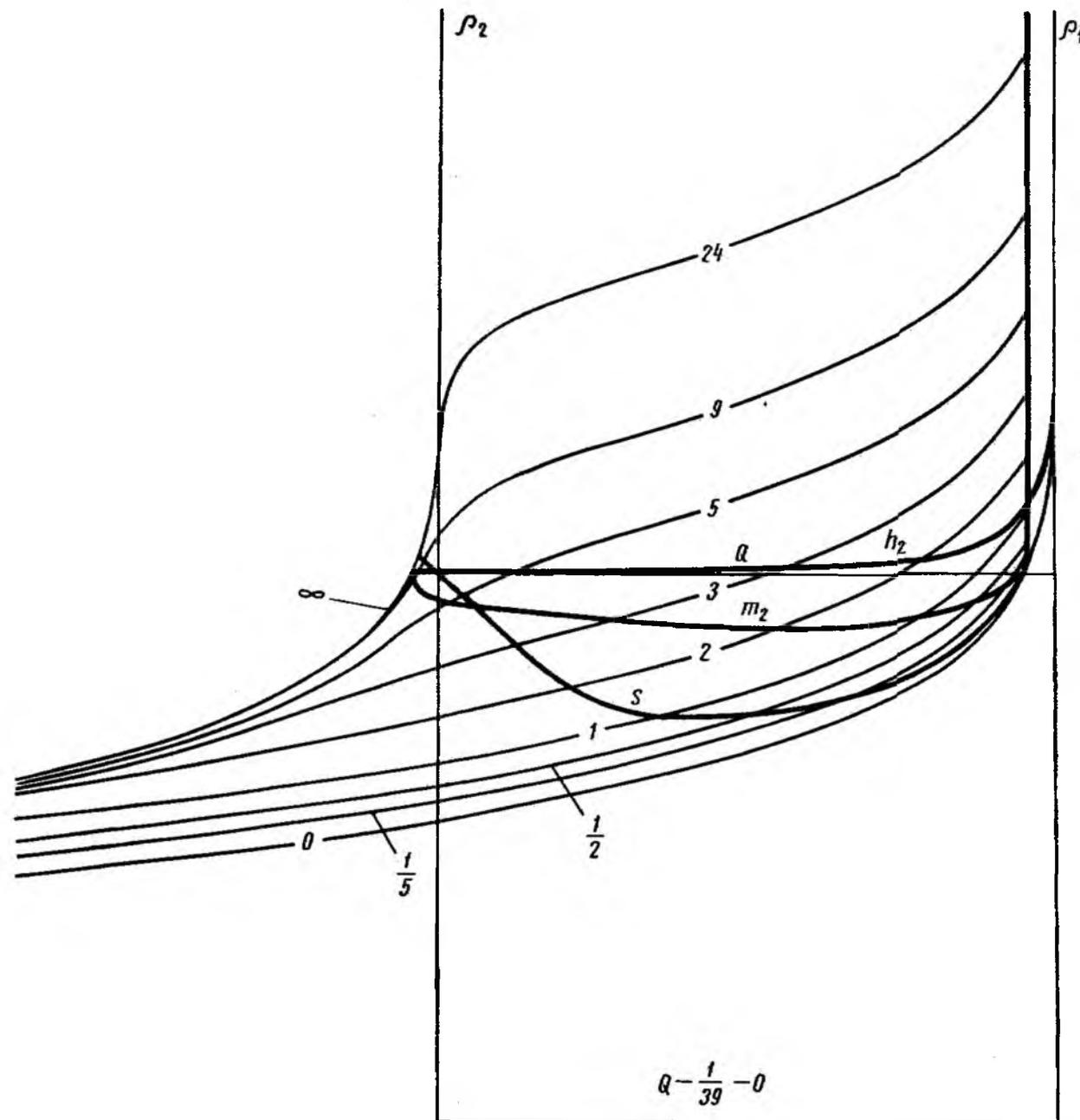


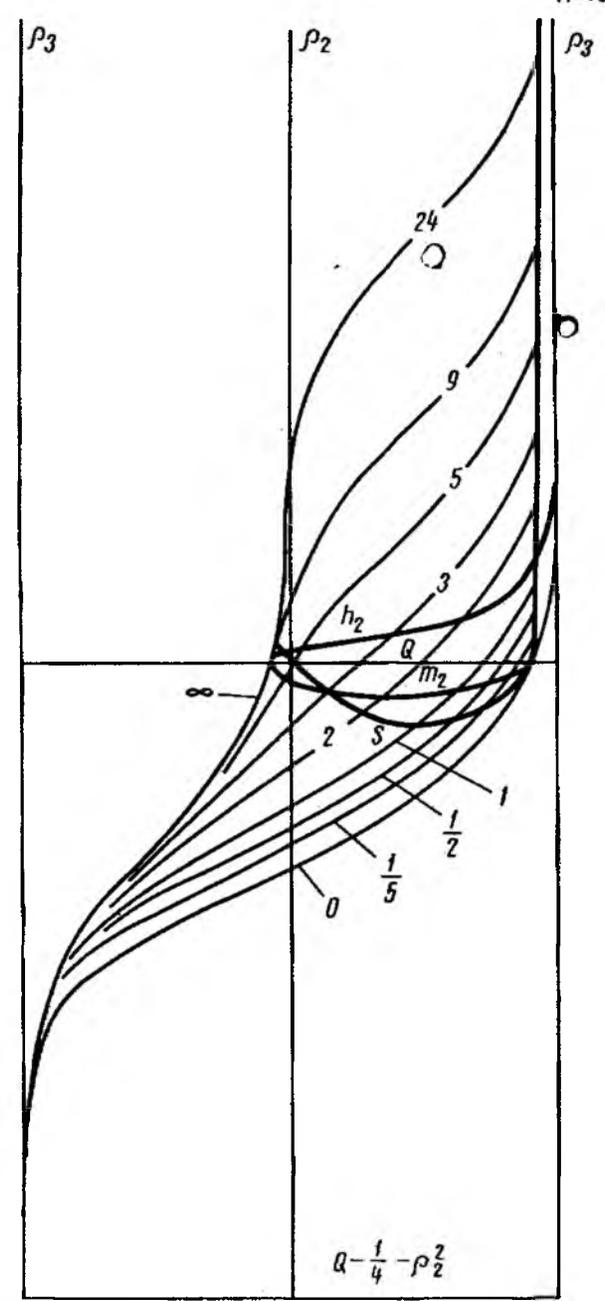
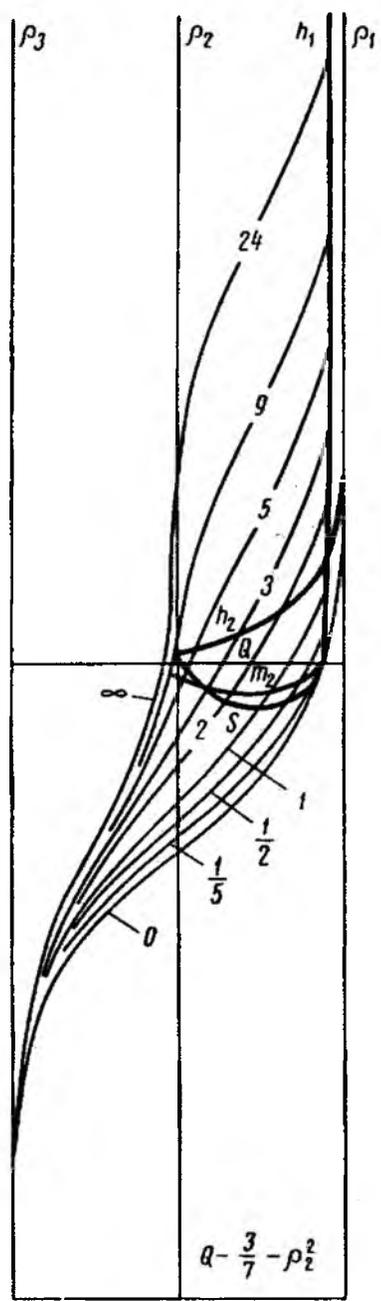
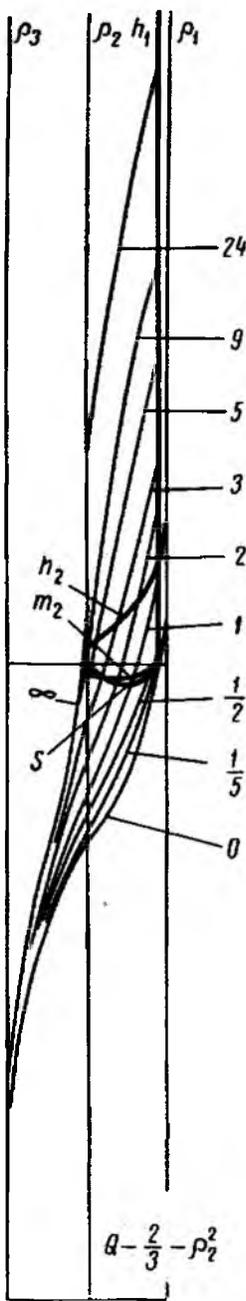


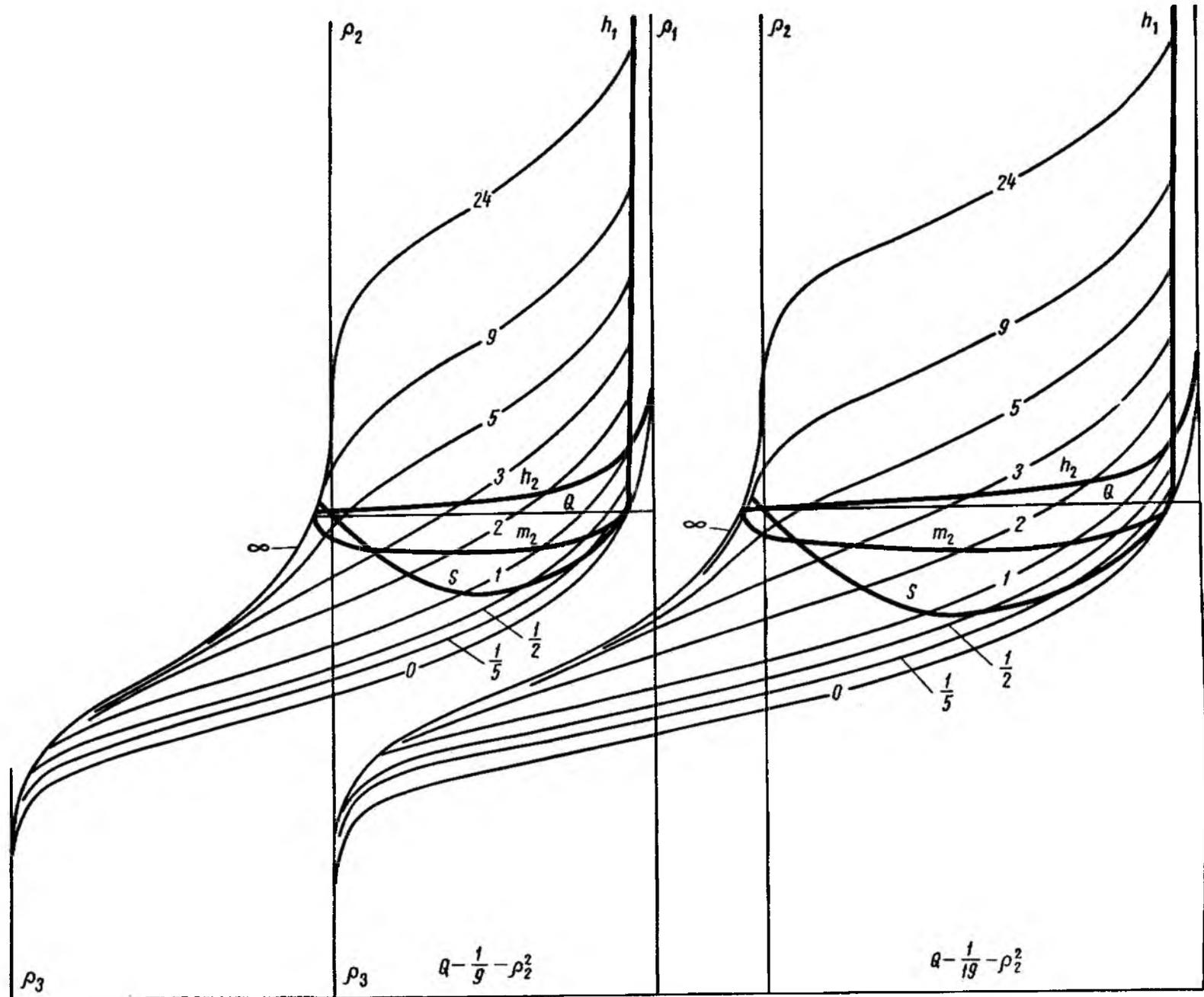


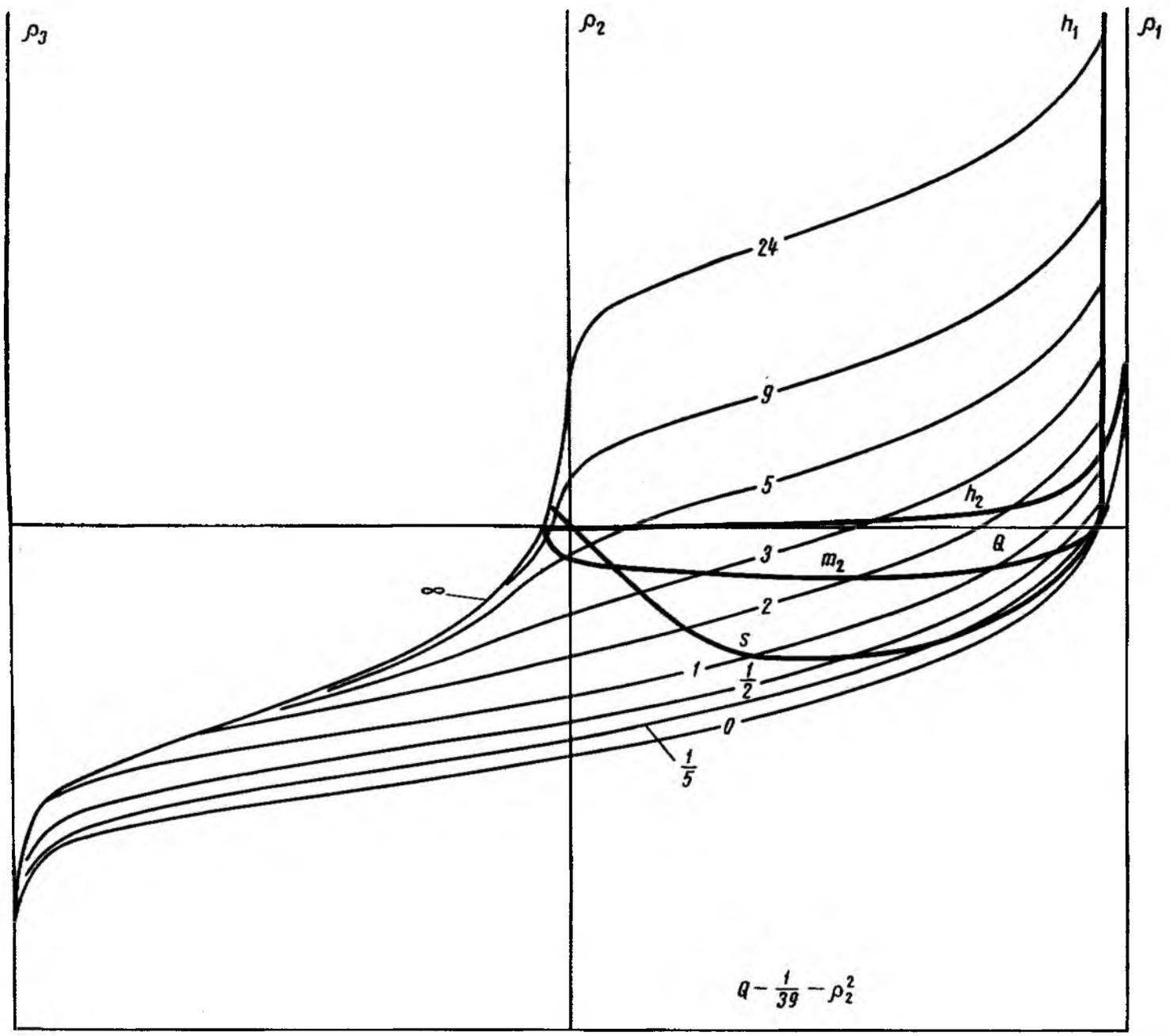


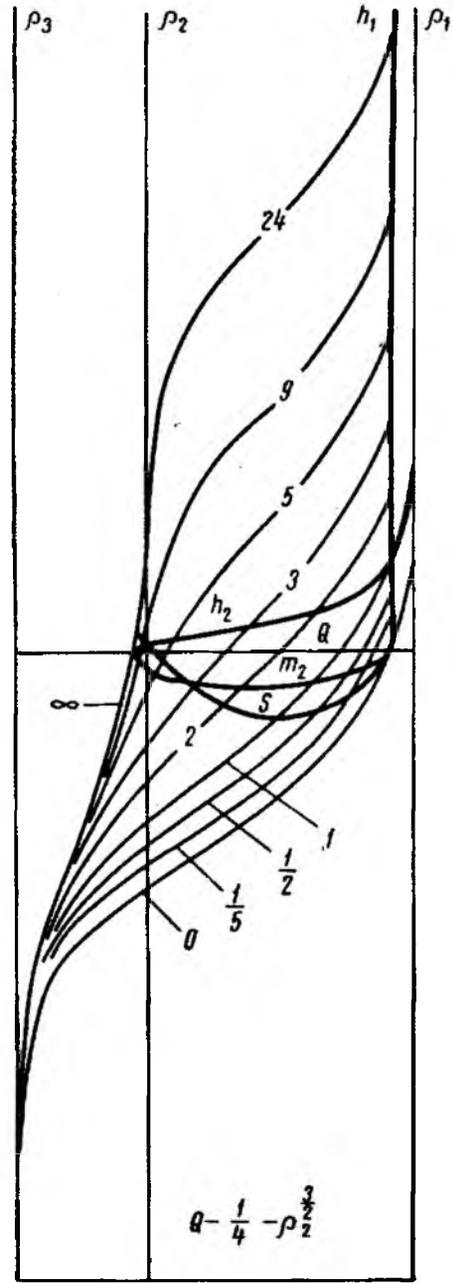
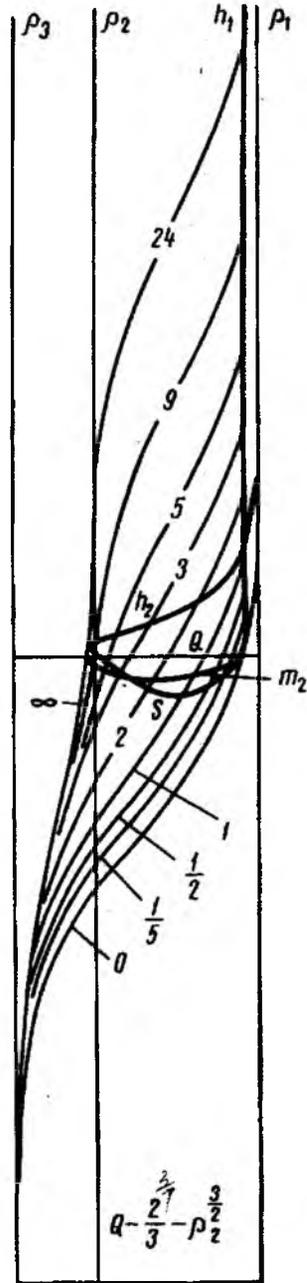
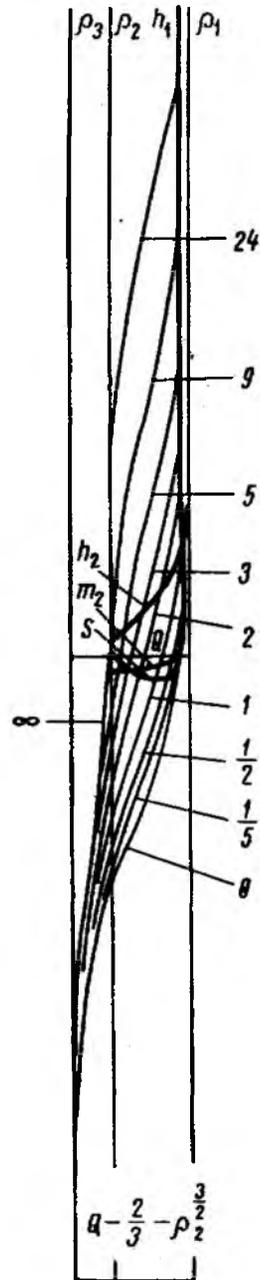


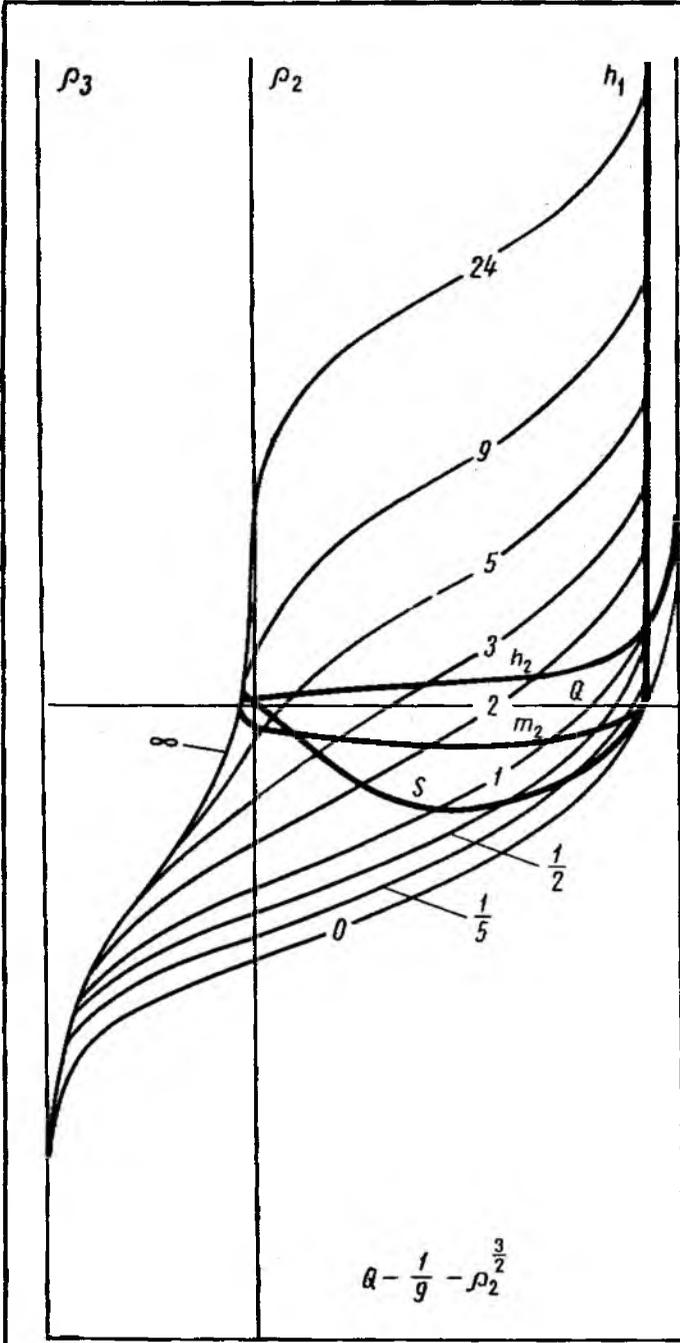




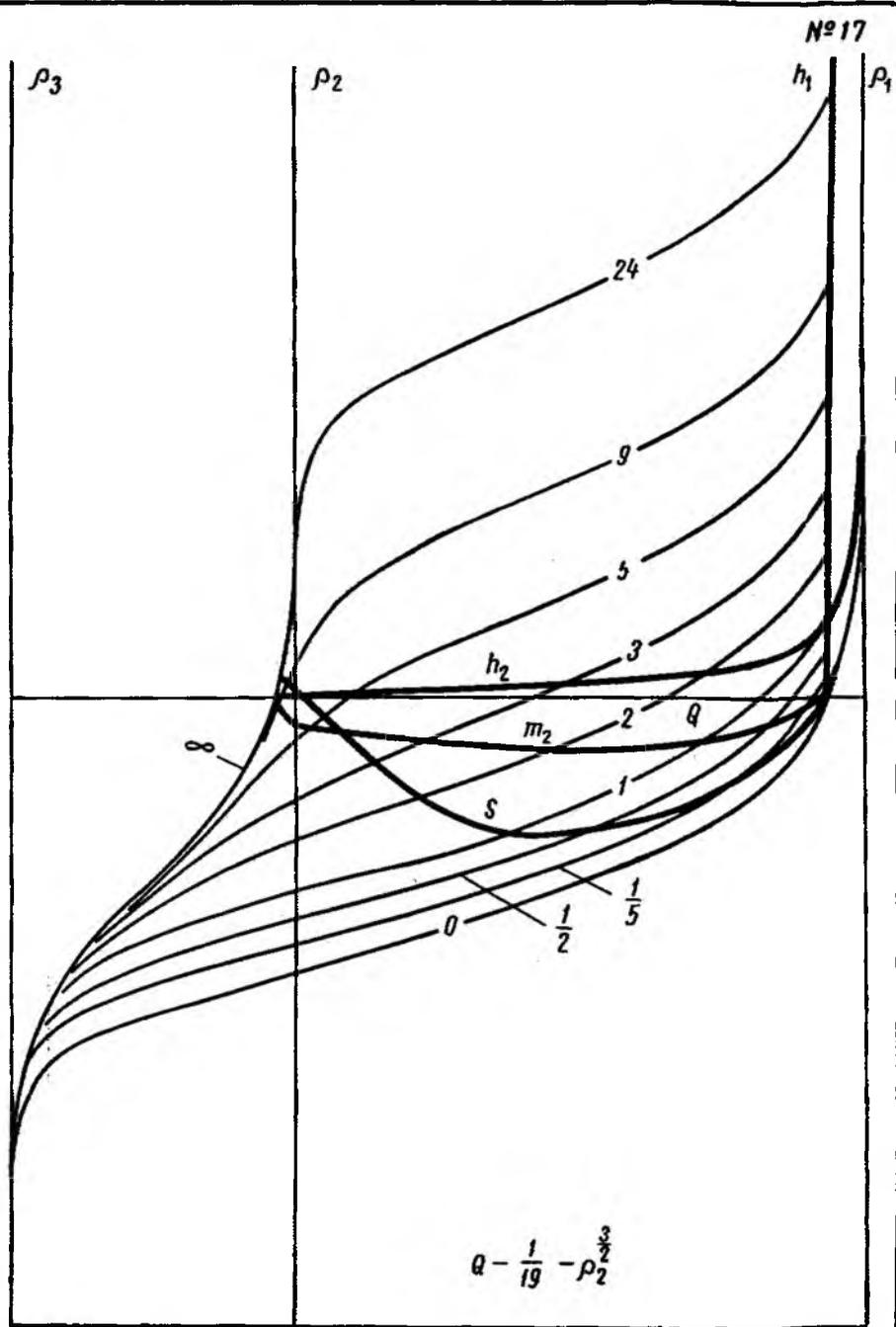




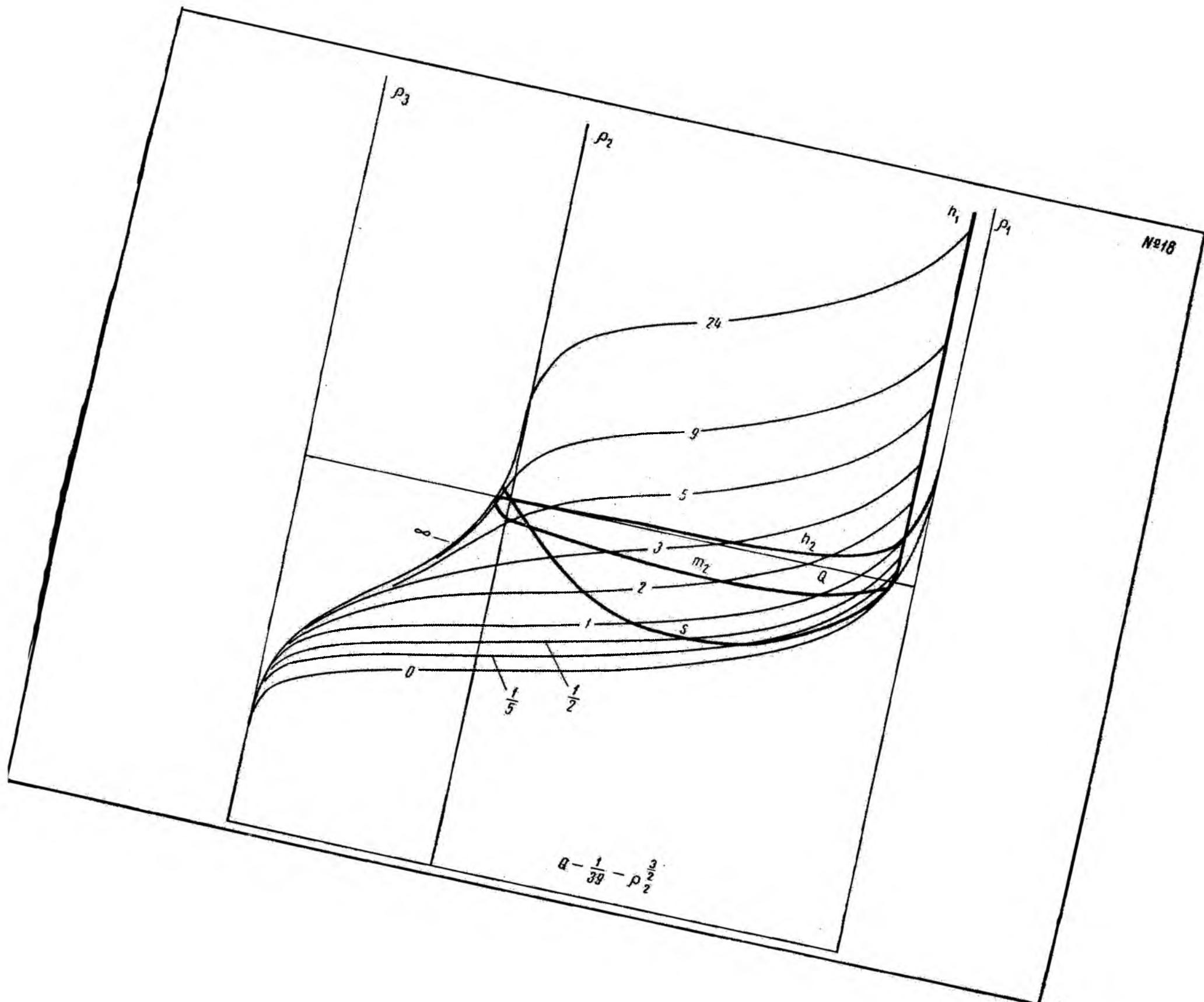




$$Q - \frac{1}{9} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$$

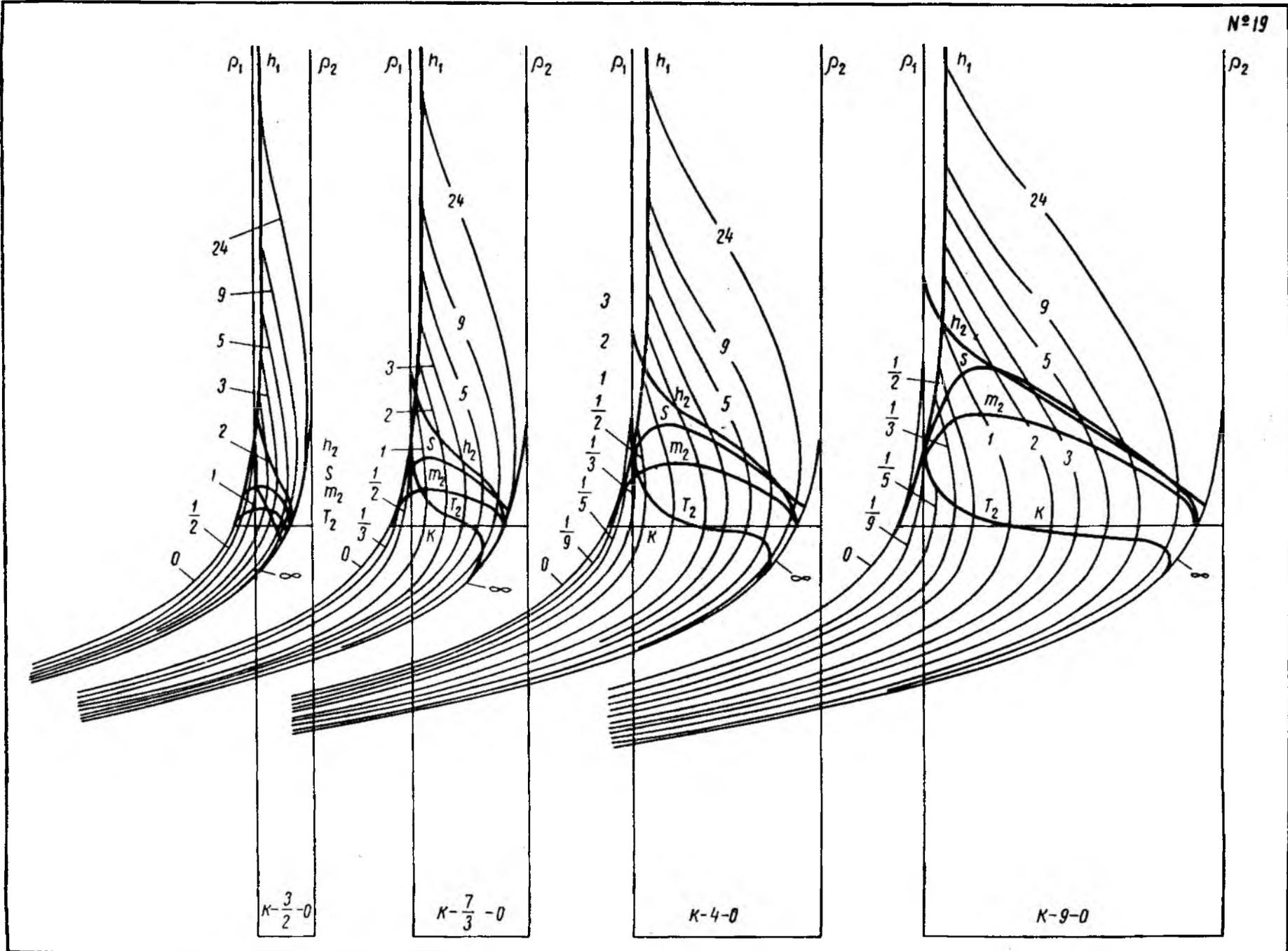


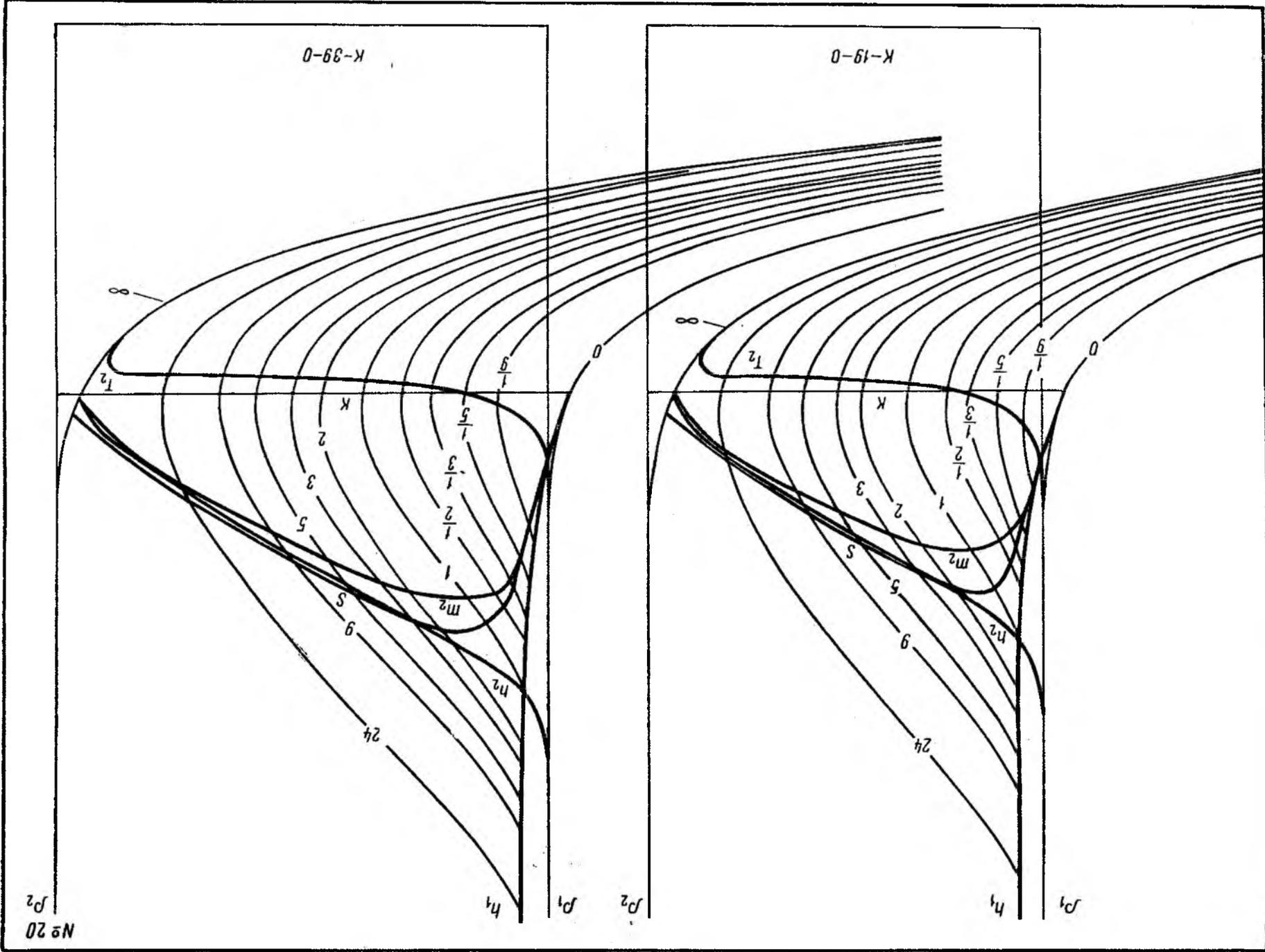
$$Q - \frac{1}{19} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$$

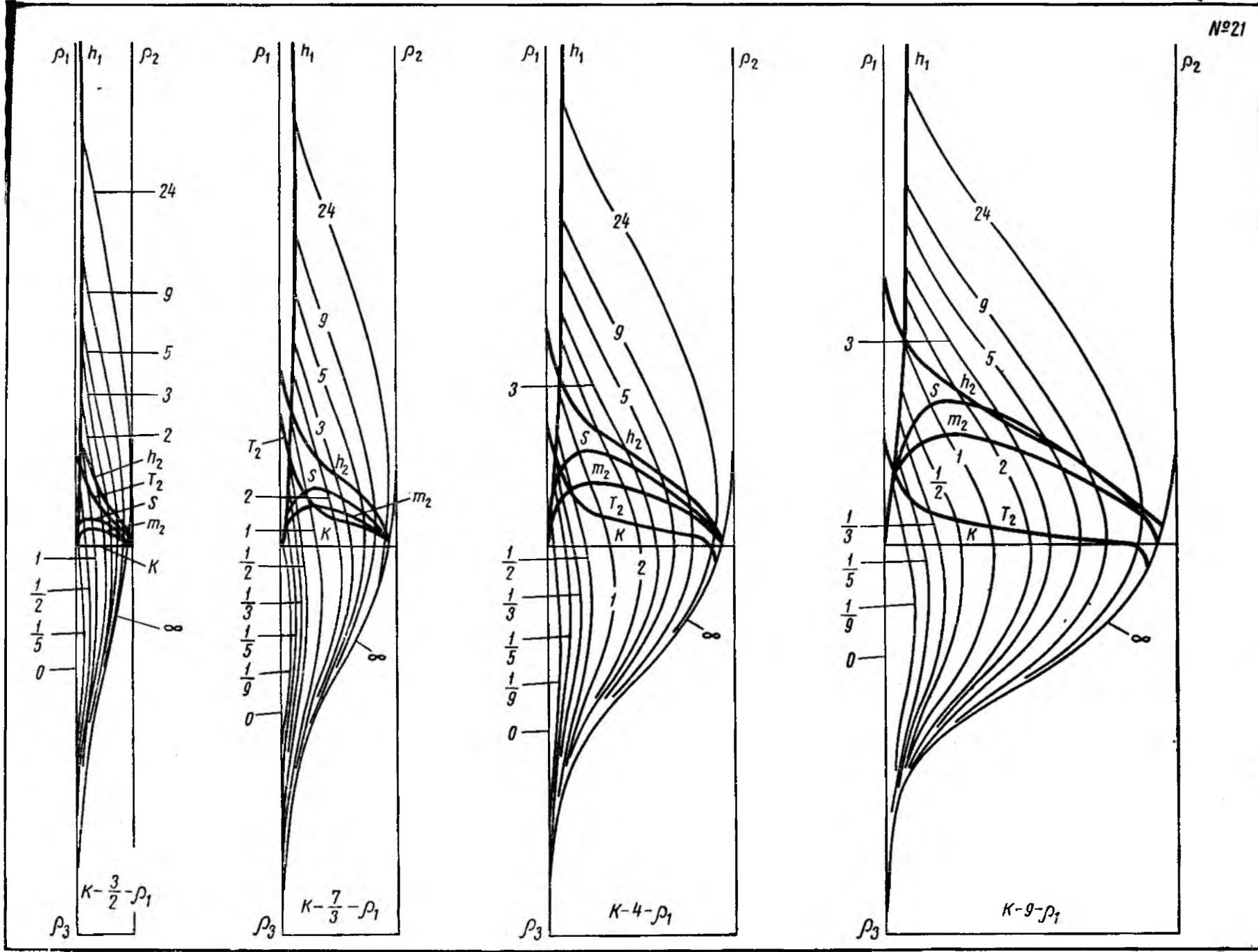


№18

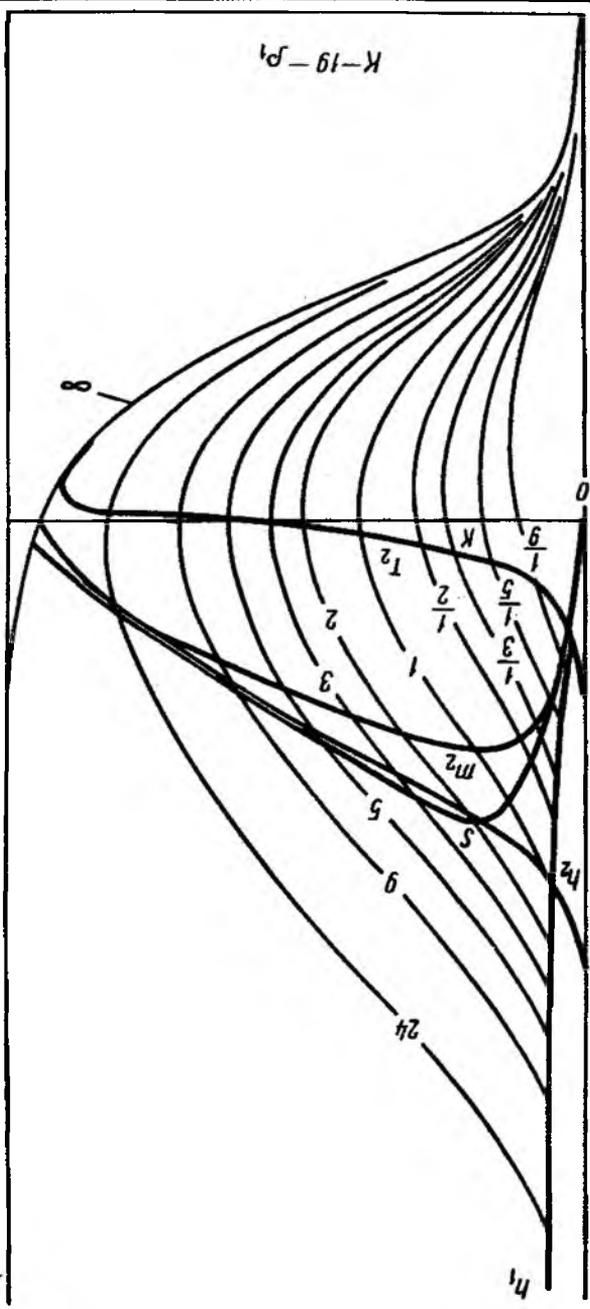
$$a - \frac{1}{39} - \rho_2^{\frac{3}{2}}$$







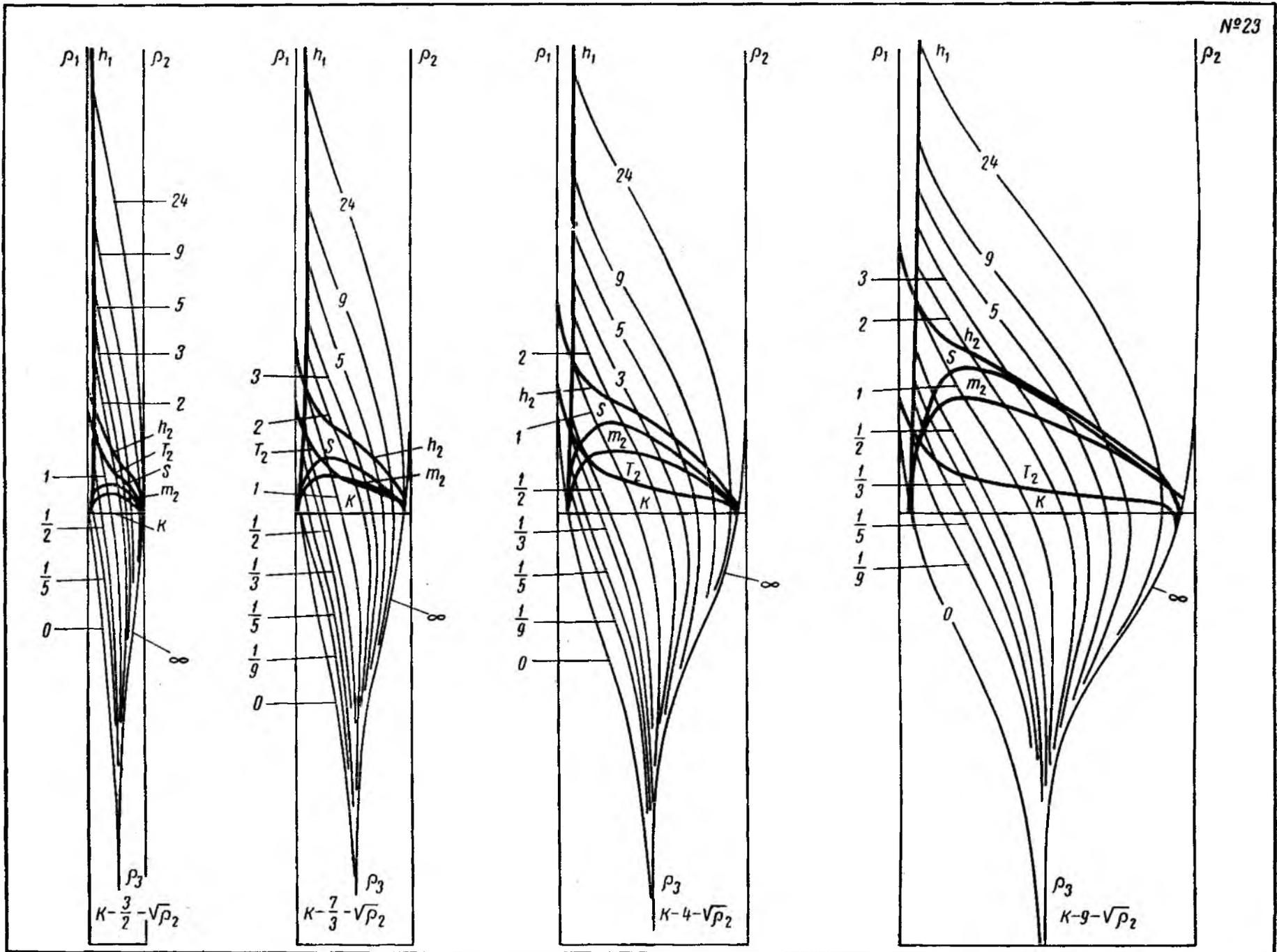
K-19-19

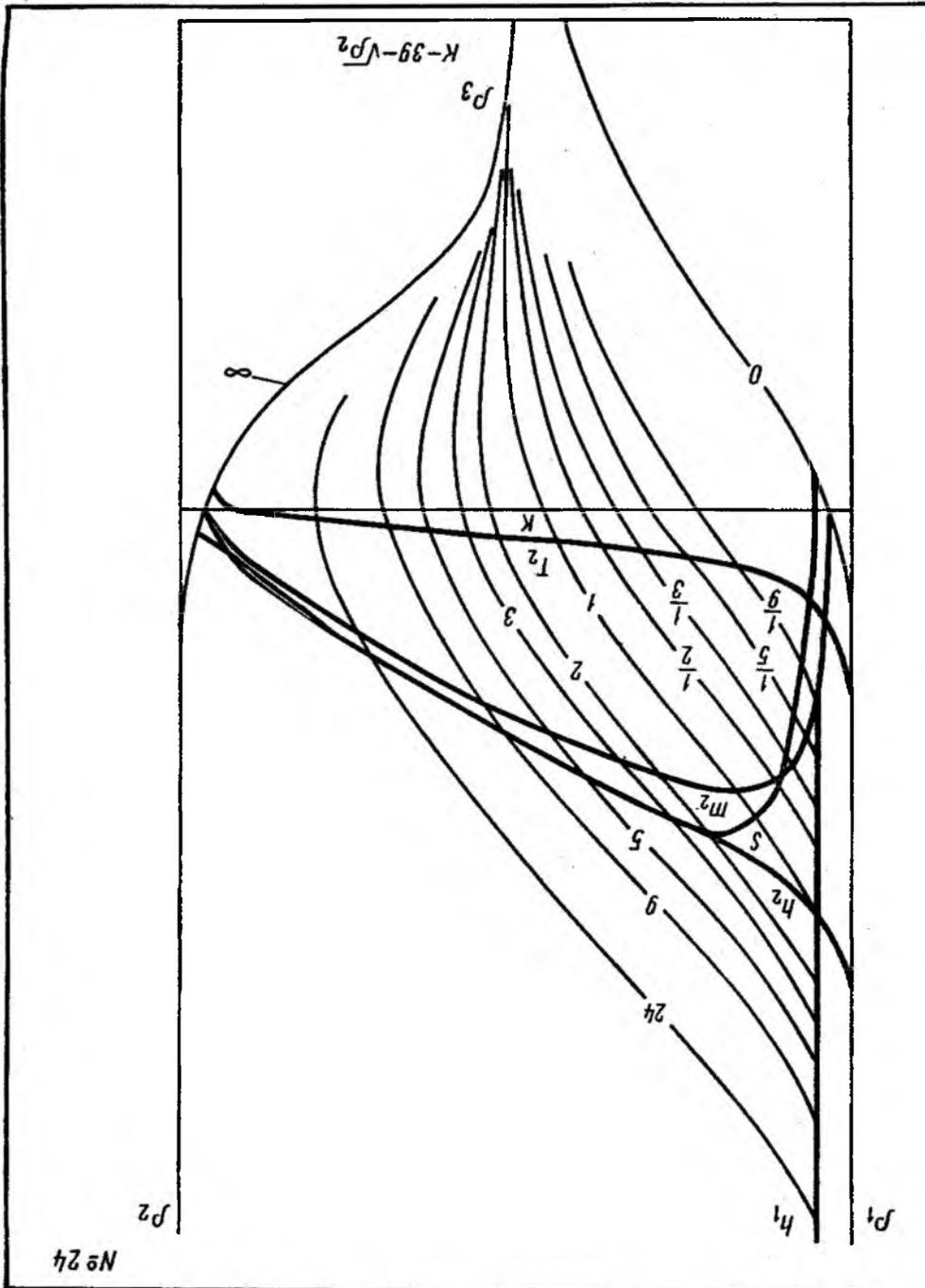


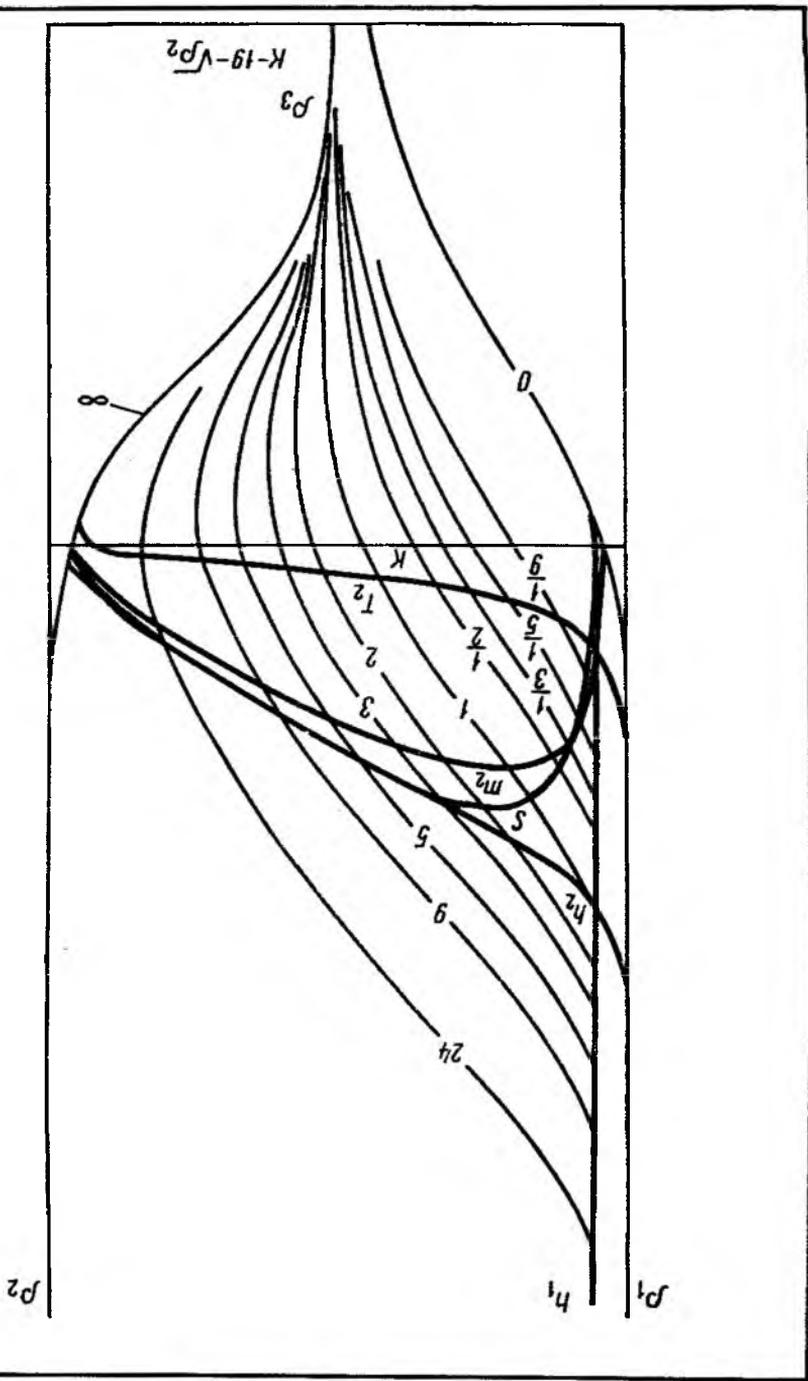
40

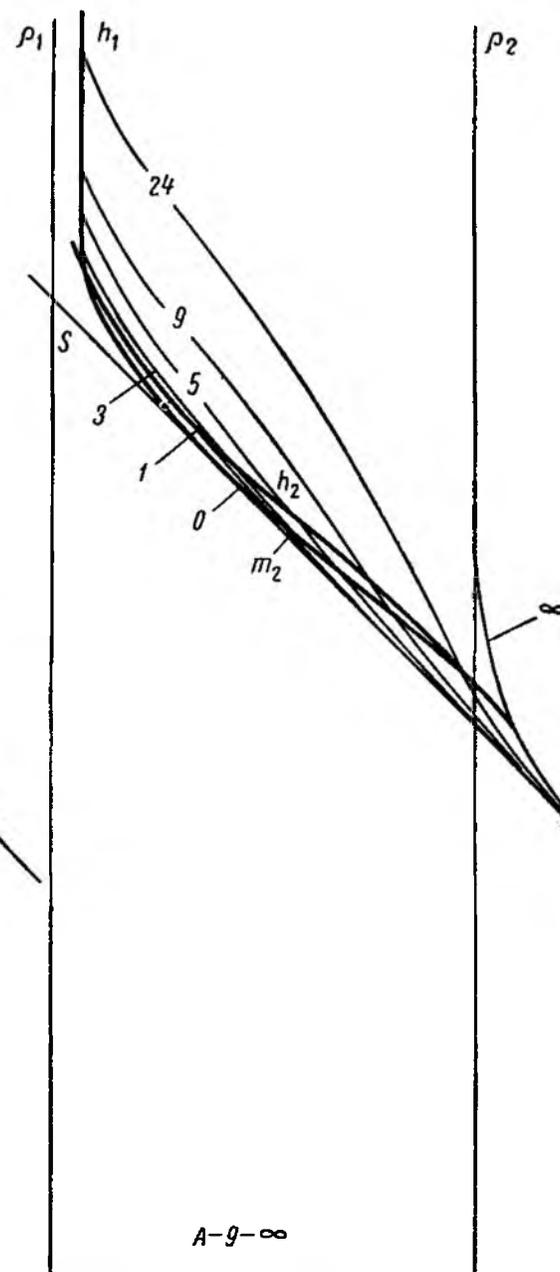
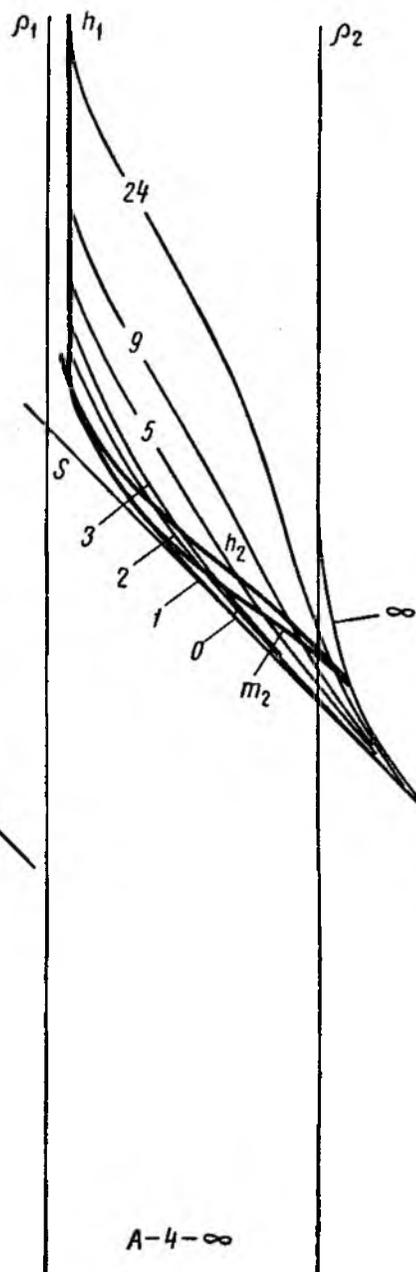
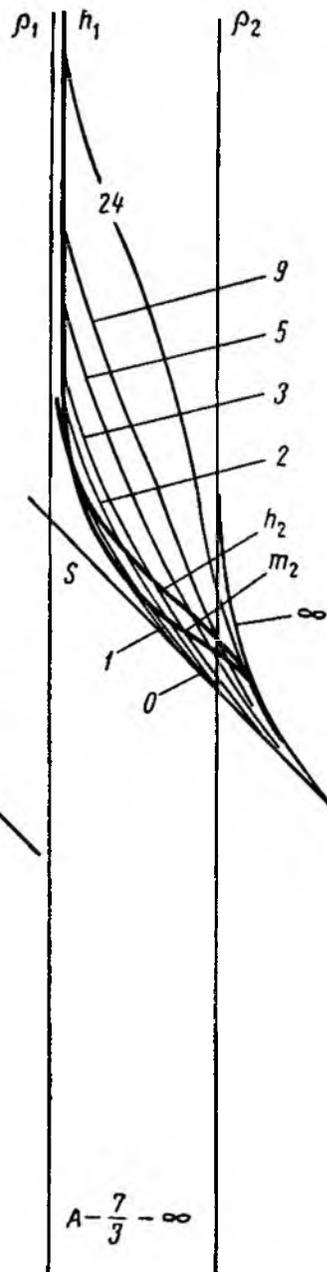
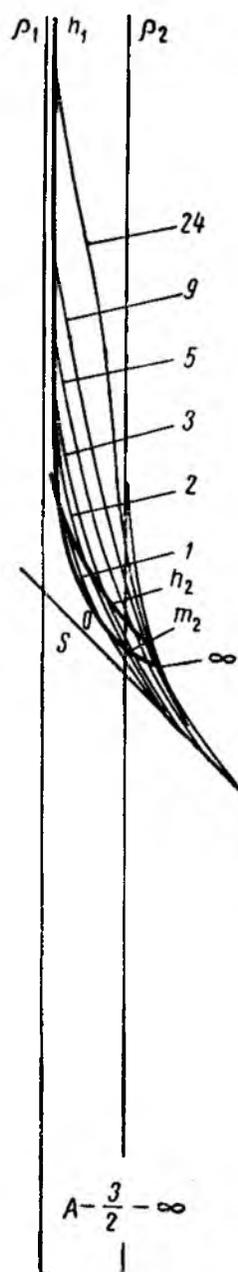
h₁

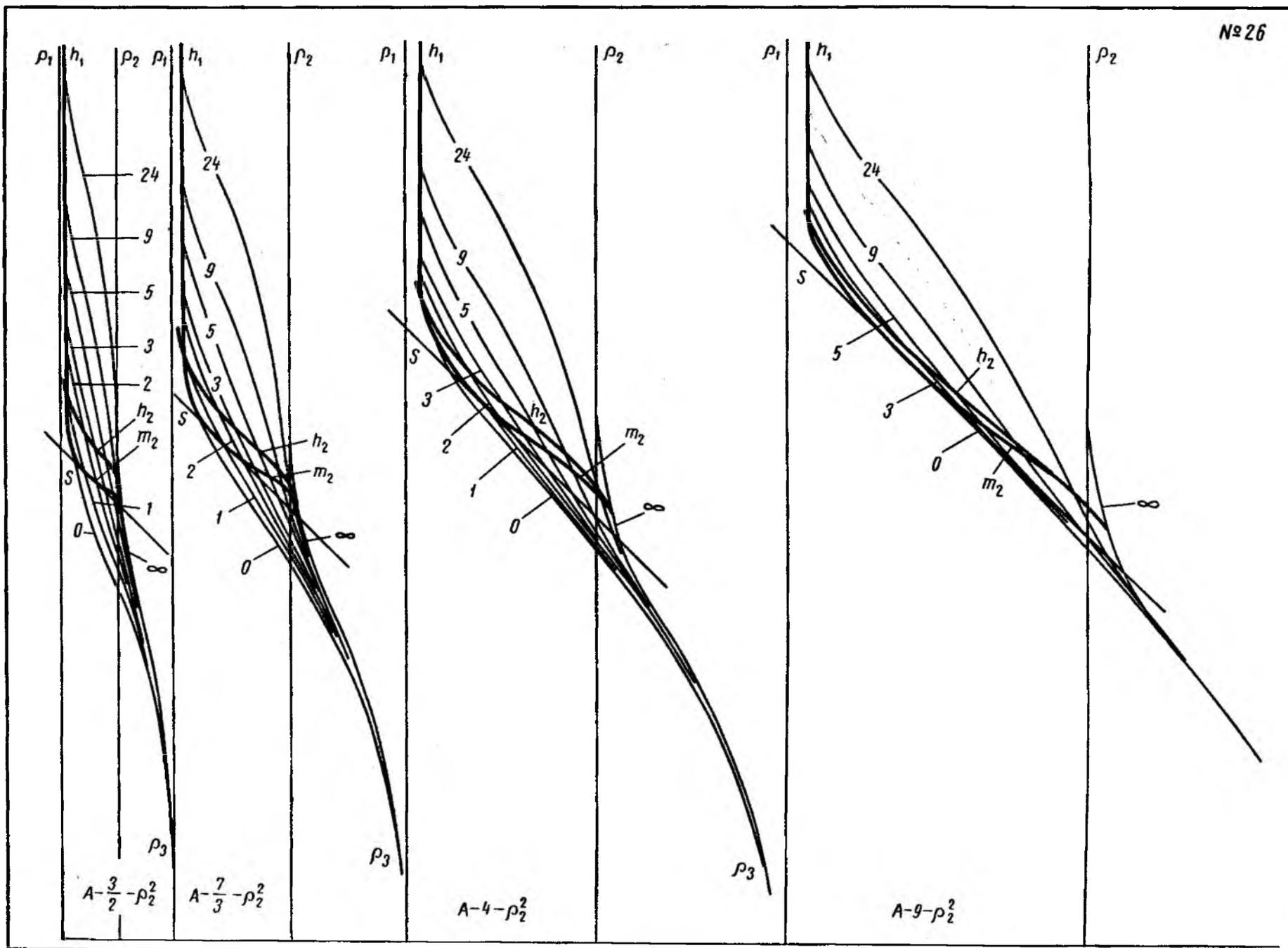
0

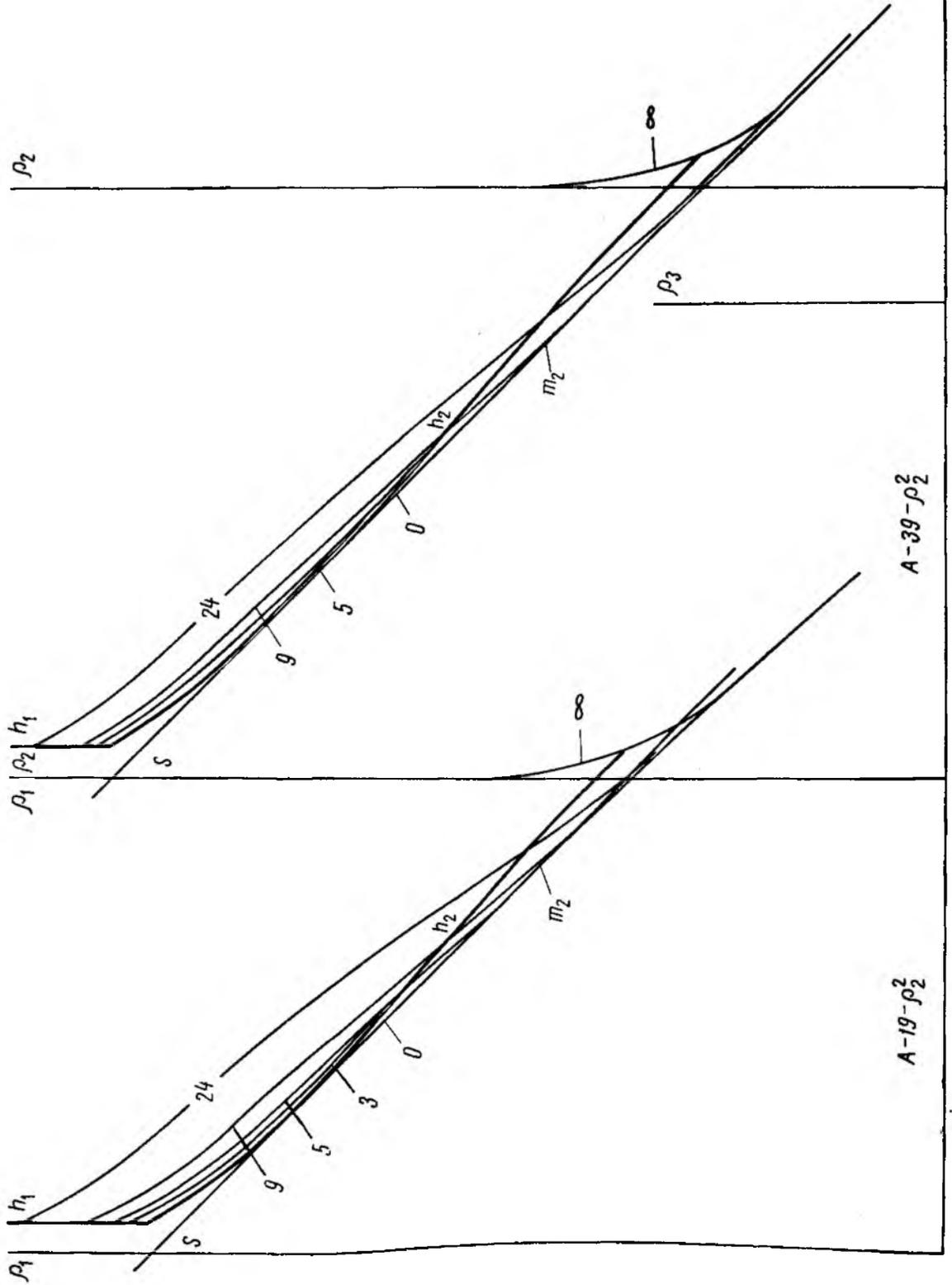


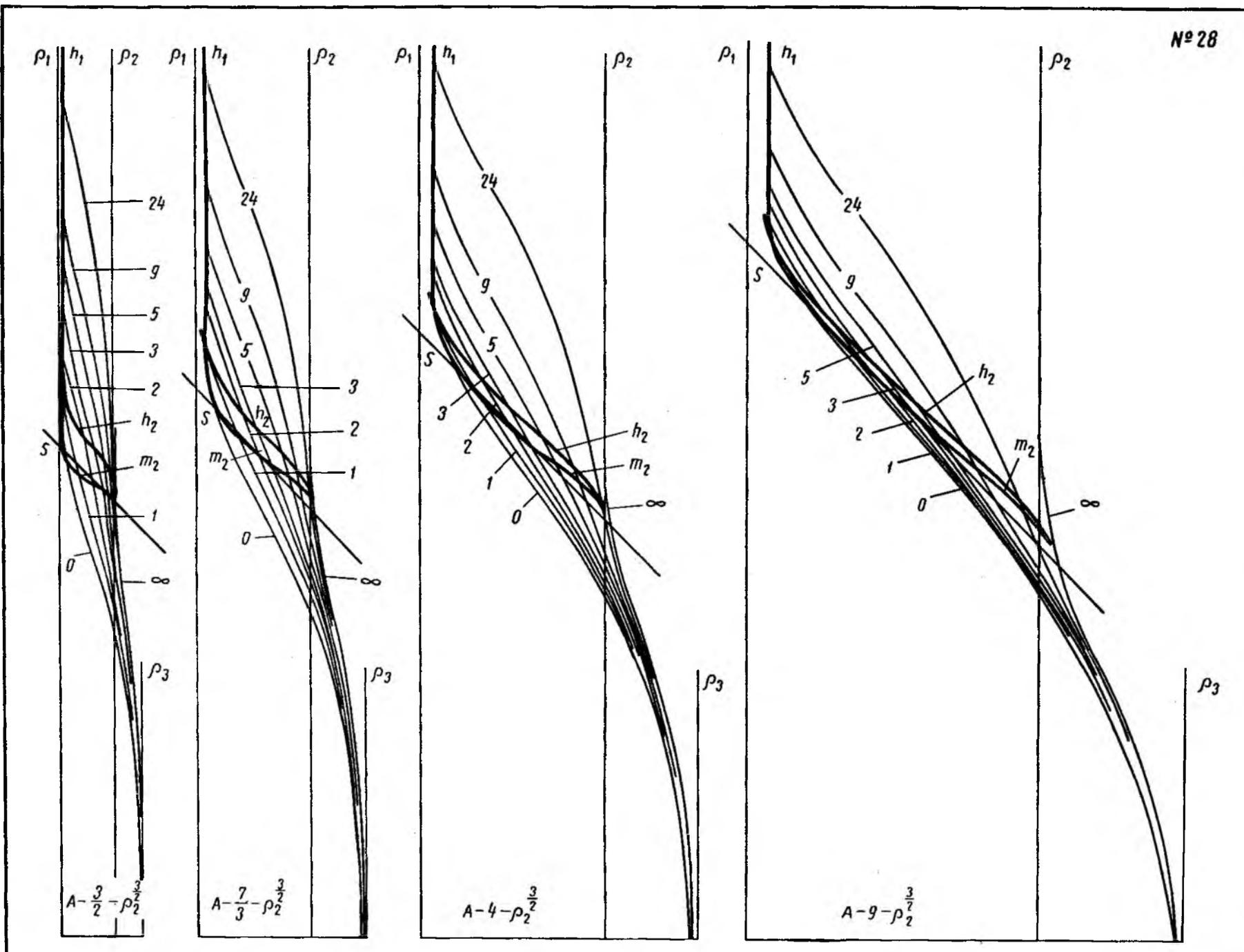


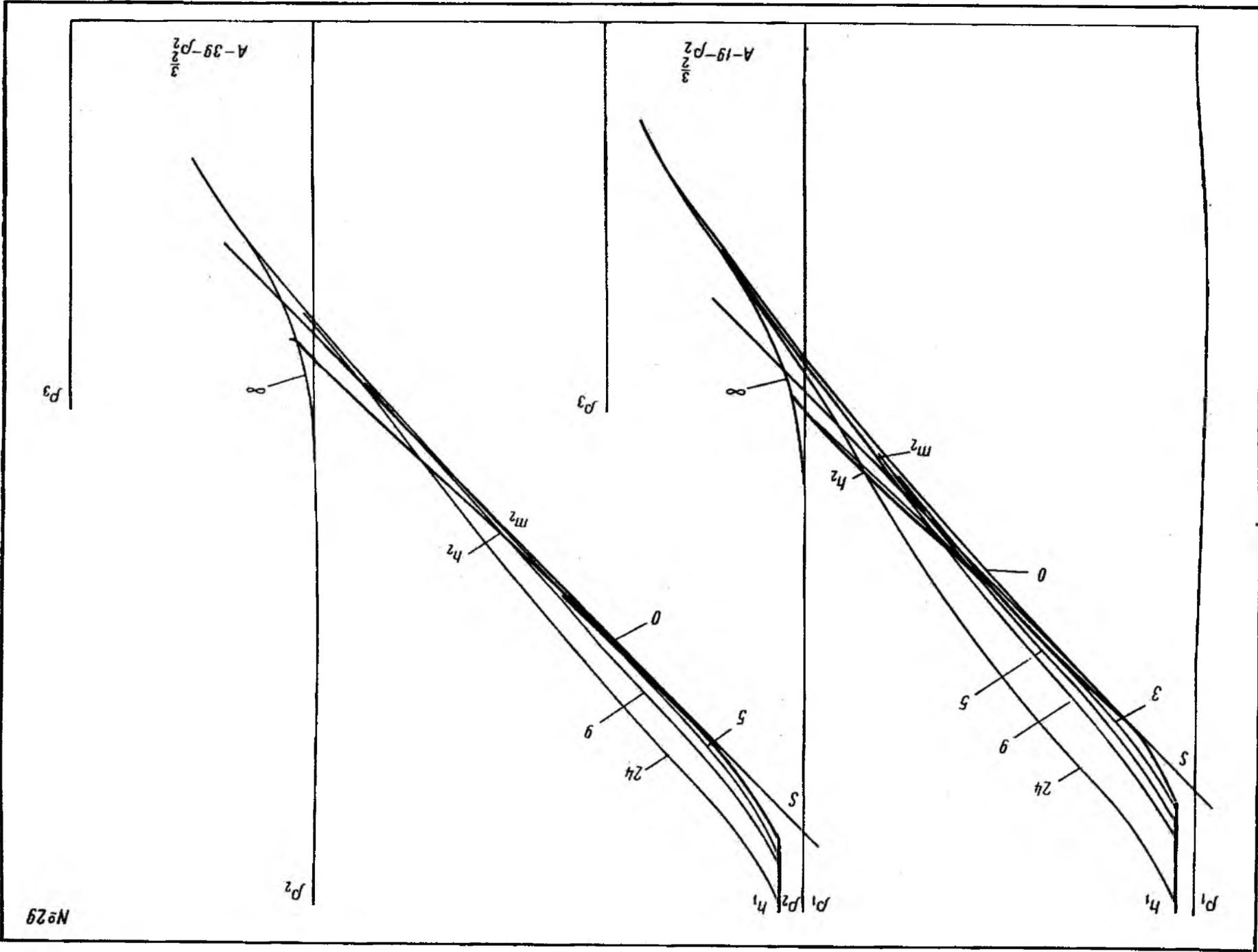


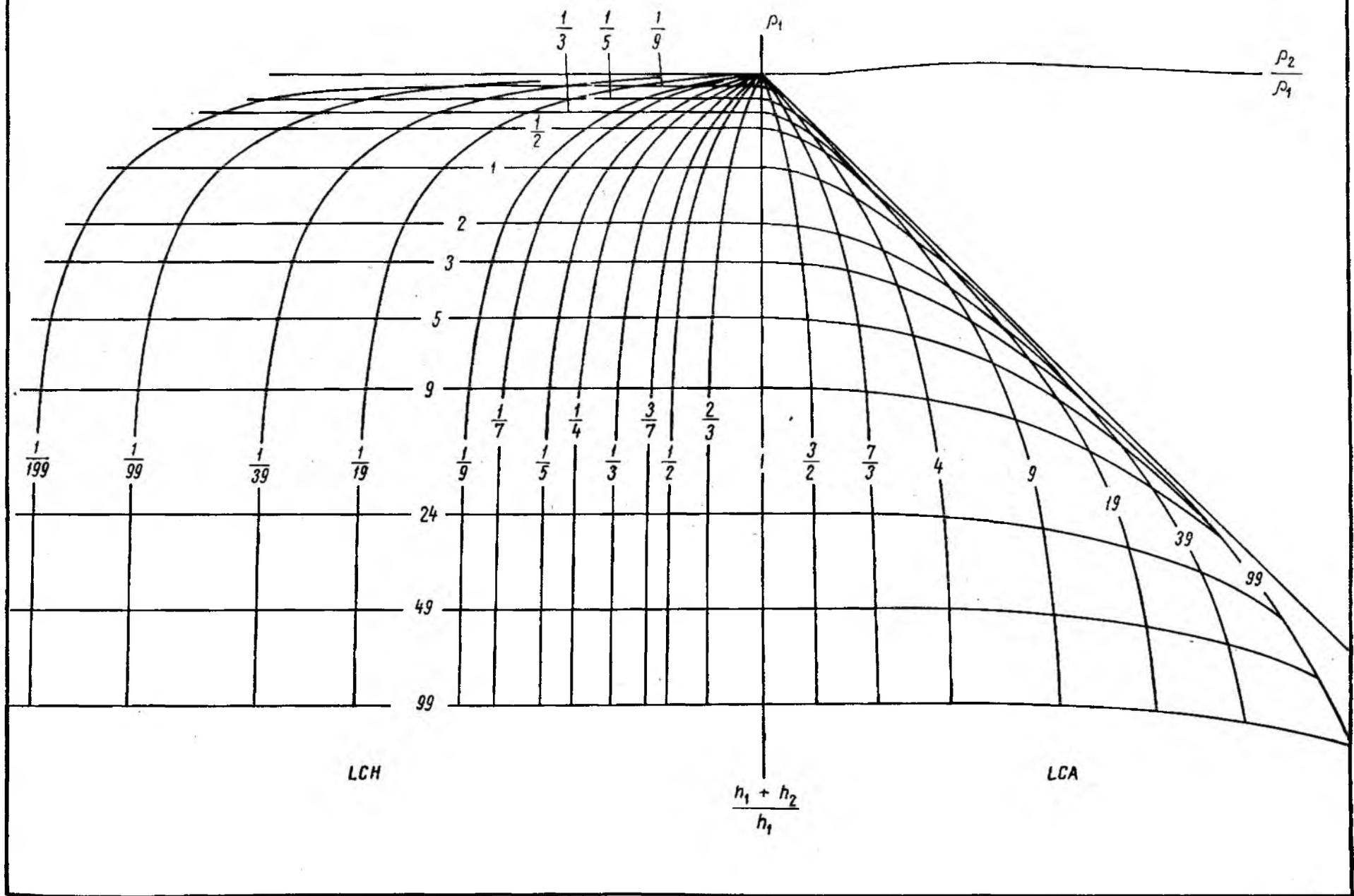


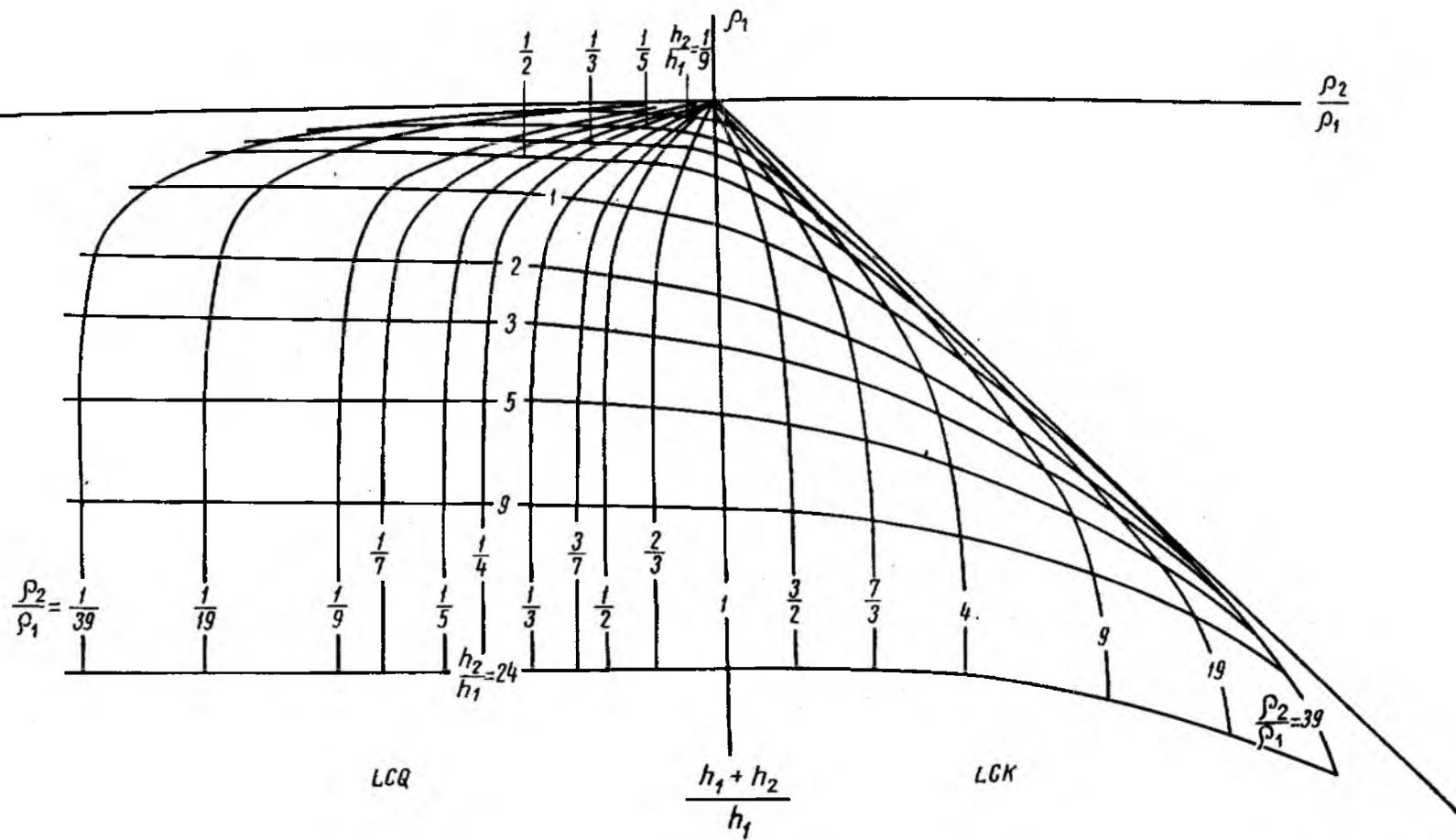












Приложение
к книге *Пылаева А. М.*
«Руководство по интерпретации
электрических зондирований»

Сдано в набор 20/IX 1967 г. Подп. в печ. 14/III 1968 г.
Т-061078. Печ. л. 7,75. Ф-т 60×90^{1/2}. Тираж 4400 экз. Зак. 1124/21-3.
Инд. 1-3-1.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский пр., 1/19.
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский проспект, 91.