

А.91

7

**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

**ИЯФ 41-71**

**В.Т.Астрелин, И.А.Богащенко, Н.С.Бучельникова,**

**Ю.И.Эйдельман**

**ПОДОБИЕ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ РАЗНОГО  
РАЗМЕРА ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ**

**Новосибирск**

**1971**

В.Т.Астрелин, И.А.Богаченко, Н.С.Бучельникова,

Ю.И.Эйдельман

## ПОДОБИЕ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ РАЗНОГО РАЗМЕРА ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Проведено исследование обтекания плоских и объёмных тел (пластинки и цилиндра) потоком разреженной замагниченной плазмы. Экспериментально подтвержден закон подобия для обтекания тел различных размеров ( $R_0/\rho_{m0} \sim 0.5 \pm 1$ ,  $V_0/V_{Ti} \sim 1.4 \pm 2$ ).

Настоящая работа посвящена проверке закона подобия при обтекании тел разреженной замагниченной плазмой в условиях, моделирующих условия обтекания искусственных спутников Земли в ионосфере.

Существование закона подобия при обтекании замагниченной плазмой тел одинакового профиля, но разного размера было показано теоретически /1/. Рассмотрение проводилось в так называемом "нейтральном приближении", не учитывающем электрическое поле, возникающее вследствие возмущения плазмы телом, так что полученные выводы справедливы только в дальней зоне следа. Закон подобия проявляется в том, что профиль следа описывается функцией безразмерных параметров. Так при обтекании тела с круговым сечением радиуса  $R_0$  в однородном магнитном поле профиль относительных плотностей имеет вид /1/

$$\frac{n(\rho, z)}{n_0} = f \left( \frac{R_0}{\rho_{ni}}, \frac{\rho}{R_0}, \frac{z}{z_n} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $z$  - текущие координаты точек в следе за телом;

$V_0$  - скорость потока плазмы ( в (1) предполагается, что плазма движется вдоль магнитного поля  $H$  );  $\rho_{ni} = V_{Ti} / \omega_{ni}$  - ларморовский радиус ионов;  $V_{Ti}$  - их тепловая скорость;  $\omega_{ni}$  - циклотронная частота ионов;  $z_n = 2\pi V_0 / \omega_{ni}$  - расстояние, на котором ион, движущийся со скоростью  $V_0$  вдоль  $H$ , совершает полный оборот по ларморовской орбите.

Из (1) следует, что профили следа одинаковы в координатах  $\rho/R_0, z/z_n$ , если отношение  $R_0/\rho_{ni}$  поддерживается постоянным.

Следует отметить, что для незамагниченной плазмы существование закона подобия показано теоретически не только в "нейтральном приближении" /1/, но и в приближении, учитывающем электрическое поле и справедливом и в ближней зоне следа /2/. Существование закона подобия для незамагниченной плазмы было подтверждено экспериментально /3/.

Эксперименты проводились на установке типа  $Q$ -машины. Воз -

возможность использования её для исследования обтекания тел замедленной плазмой была подробно рассмотрена ранее /4/.

Плазма образуется при термической ионизации газа на вольфрамовом ионизаторе диаметром 4 см, нагретом до температуры

$T \approx 2000^\circ\text{K}$ . Плазма удерживается магнитным полем и представляет собой цилиндрический столб, ограниченный с одного торца ионизатором, а с другого — холодным отрицательно-заряженным электродом ( $\varphi = -7\text{в}$ , так что  $e\varphi/T \gg 1$ ). Плотность плазмы практически однородна вблизи оси столба в области диаметром  $\sim 2,5$  см. Эксперименты проводились в режиме электронного слоя. В этом случае ионы ускоряются в слое, приобретая направленную скорость  $V_0$  и продольную температуру  $T_{i\parallel}$  /5/. Плазма течет от ионизатора к холодному электроду со скоростью  $V_0$ . В режиме электронного слоя поток устойчив.

Электроны имеют максвелловскую функцию распределения с температурой  $T_e \sim T$ , ионы — двухтемпературную максвелловскую функцию с  $T_{i\parallel} < T_{i\perp} \sim T$  /4/. Параметры плазмы таковы, что  $e-i$  и  $e-e$  — столкновения не играют роли (длина свободного пробега  $l \gg L$ ), однако,  $i-i$  — столкновения, приводящие к выравниванию  $T_{i\parallel}$  и  $T_{i\perp}$ , могут оказаться существенными.

Магнитное поле изменялось от 500 до 1600 э, плотность плазмы  $n_0 \sim 2-6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , скорость потока плазмы

$V_0 = (1,4 \div 2,1) \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ , температура ионизатора  $T = 2000 \div 2500^\circ\text{K}$ .

Измерения плотности проводились с помощью цилиндрических вольфрамовых зондов длиной 2 мм и диаметром 0,25 мм; скорость потока определялась по периоду  $Z_H$  продольных осцилляций плотности на оси следа за плоским телом /5/:

$$V_0 = \frac{Z_H \omega_{ni}}{2\pi}$$

Исследовались обтекание пластинок (плоские тела) шириной  $2R_0 = 3,5 ; 5$  и  $7$  мм и цилиндров (объемные тела) диаметром  $2R_0 = 3,5$  и  $7$  мм. Высота пластинок и цилиндров 3 см, так что для описания следа тела достаточно двумерной картины. Иссле -

дуемое тело помещается в плазму перпендикулярно к потоку в зоне однородной плотности. Эксперименты проводились с отрицательно заряженными телами  $- \varphi = -7\text{В}$ .

Условия этих экспериментов хорошо моделируют обтекание тел размером  $R_0 \sim 2\text{ м}$  в ионосфере на высотах  $\sim 200-1000\text{ км}$ , что видно из таблицы 1.

Таблица 1

	Эксперимент	Ионосфера
$R_0/r_0$	$30 \div 100 \gg 1$	$50 \div 1000 \gg 1$
$R_0/\rho_{ne}$	$120 \div 270 \gg 1$	$100 \div 200 \gg 1$
$R_0/\rho_{ni}$	$0,45 \div 1,0$	$0,25 \div 1,0$
$V_0/V_{te}$	$(5 \div 8) 10^{-3} \ll 1$	$\sim 0,01 \ll 1$
$V_0/V_{ti}$	$1,4 \div 2,1$	$0,8 \div 6$
$R_0/l$	$2 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^{-3} \ll 1$	$5 \cdot 10^{-2} \div 10^{-4} \ll 1$

Здесь  $r_0$  - дебаевский радиус,  $\rho_{ne}, \rho_{ni}$  - ларморовский радиус электронов и ионов,  $V_{te}, V_{ti}$  - тепловая скорость электронов и ионов.

Для проверки существования подобия выбирались эксперименты, в которых для тел с разными  $R_0$  сохраняются постоянными величины  $R_0/\rho_{ni}$ ,  $V_0/V_{ti}$ . В таблицах II и III приведены параметры сравниваемых экспериментов для пластинок и цилиндров соответственно.

Таблица II. Обтекание пластинок.

№ ри- сун- ка	Обозначе- ния, $R_0, \text{см}$	$n_0$ $\text{см}^{-3}$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$H$ эрг	$v_0$ $\text{см/сек}$	$-\frac{e\varphi_0}{T}$	$\frac{R_0}{\rho n_i}$	$\frac{v_0}{v_{Ti}}$
1,2	o -0,175	$2 \cdot 10^9$	2150	1000	$1,5 \cdot 10^5$	1,5	0,45	1,5
	• -0,250	$4 \cdot 10^9$	2150	700	$1,4 \cdot 10^5$	1,3	0,45	1,5
	x -0,350	$3 \cdot 10^9$	2150	500	$1,5 \cdot 10^5$	1,5	0,45	1,5
3,4	o -0,175	$6 \cdot 10^9$	2020	1600	$1,4 \cdot 10^5$	1,5	0,74	1,5
	• -0,250	$4 \cdot 10^9$	2150	1100	$1,4 \cdot 10^5$	1,2	0,71	1,4
	x -0,350	$2 \cdot 10^9$	2150	700	$1,5 \cdot 10^5$	1,7	0,63	1,6
5,6	o -0,175	$2 \cdot 10^9$	2150	1600	$2,1 \cdot 10^5$	3,9	0,72	2,2
	• -0,250	$3 \cdot 10^9$	2420	1100	$2,1 \cdot 10^5$	3,2	0,67	2,0
	x -0,350	$2 \cdot 10^9$	2420	800	$2,1 \cdot 10^5$	3,4	0,68	2,1
7,8	• -0,250	$6 \cdot 10^9$	2040	1500	$1,5 \cdot 10^5$	1,8	0,99	1,6
	x -0,350	$4 \cdot 10^9$	2150	1100	$1,5 \cdot 10^5$	1,7	0,99	1,6

Здесь  $\varphi_0$  - потенциал плазмы относительно ионизатора.

Таблица III. Обтекание цилиндров

№ ри- сун- ка	Обозначе- ния, $R_0, \text{см}$	$n_0$ $\text{см}^{-3}$	$T$ $^{\circ}\text{K}$	$H$ эрг	$V_0$ $\text{см/сек.}$	$-\frac{e\varphi_0}{T}$	$\frac{R_0}{\rho_{\text{нi}}}$	$\frac{V_0}{V_{\text{тi}}}$
9,10	-0,175	$2 \cdot 10^9$	2000	1000	$1,5 \cdot 10^5$	1,7	0,47	1,6
	-0,350	$3 \cdot 10^9$	2150	500	$1,5 \cdot 10^5$	1,5	0,45	1,5
11,12	-0,175	$5 \cdot 10^9$	2040	1400	$1,5 \cdot 10^5$	1,6	0,65	1,6
	-0,350	$2 \cdot 10^9$	2150	700	$1,6 \cdot 10^5$	1,8	0,63	1,6
13,14	-0,175	$2 \cdot 10^9$	2150	1600	$2,0 \cdot 10^5$	3,3	0,72	2,0
	-0,350	$2 \cdot 10^9$	2415	800	$2,1 \cdot 10^5$	3,4	0,68	2,1

Следует отметить, что измерения для тел разных размеров проводились в разных экспериментах после переборки экспериментальной системы. При этом погрешности измерений, связанные с воспроизводимостью режима, распределения плотности и т.п. могут оказаться довольно большими.

Для выяснения вопроса, существует ли подобие, следует построить сечения следа  $n(\rho, z)/n_0$  в координатах  $\rho/R_0, z/z_n$ .

Поскольку 
$$\frac{z}{z_n} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{z}{R_0} \cdot \frac{R_0}{\rho_{\text{нi}}} \cdot \frac{V_{\text{тi}}}{V_0}$$
 и

$R_0/\rho_{\text{нi}}, V_{\text{тi}}/V_0$  постоянны, координату  $z/z_n$  можно заменить на  $z/R_0$ . На рис. 1-14 показаны распределения относительной плотности вдоль следа на различных расстояниях от оси (рис. с нечётными номерами) и распределения плотности поперёк следа на различных расстояниях от тела (рис. с чётными номерами).

Из рисунков видно, что в области внутри следа ( $\rho/R_0 < 2$ ) картина практически одинакова для тел разных размеров. Существенные различия наблюдаются, как правило, при больших  $\rho/R_0$  и не имеют систематического характера. Причина их, по-видимому, заключается в больших погрешностях измерений, связанных с недостаточной воспроизводимостью условий эксперимента.

Таким образом, можно утверждать, что в условиях проведенных экспериментов ( $R_0/\rho_{ни} \sim 0,5 \div 1$ ,  $V_0/V_{Ti} \sim 1,4 \div 2$ ) закон подобия выполняется как для плоских, так и для объемных тел. Подобие наблюдается как в дальней зоне, в соответствии с предсказанием "нейтрального приближения" теории / 1 /, так и в ближней зоне, для которой в случае замагниченной плазмы теоретическое рассмотрение не проводилось.

Авторы благодарны А.В.Гуревичу за постоянное сотрудничество и ценные обсуждения и К.Тинчурину за помощь в измерениях.



## Л и т е р а т у р а

1. Я.Л.Альперт, А.В.Гуревич, Л.П.Питаевский "Искусственные спутники в разреженной плазме", Наука, М., 1964.
2. А.В.Гуревич, Л.П.Питаевский, В.В.Смирнова УФН, 99, 3, 1969.
3. В.В.Скворцов, Л.В.Носачев. Космические исследования, 6, 855, 1968.
4. И.А.Богашенко, А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман, ЖЭТФ, 59, 1540, 1970.
5. А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Н.С.Бучельникова. ТВТ, 7, 852, 1969.

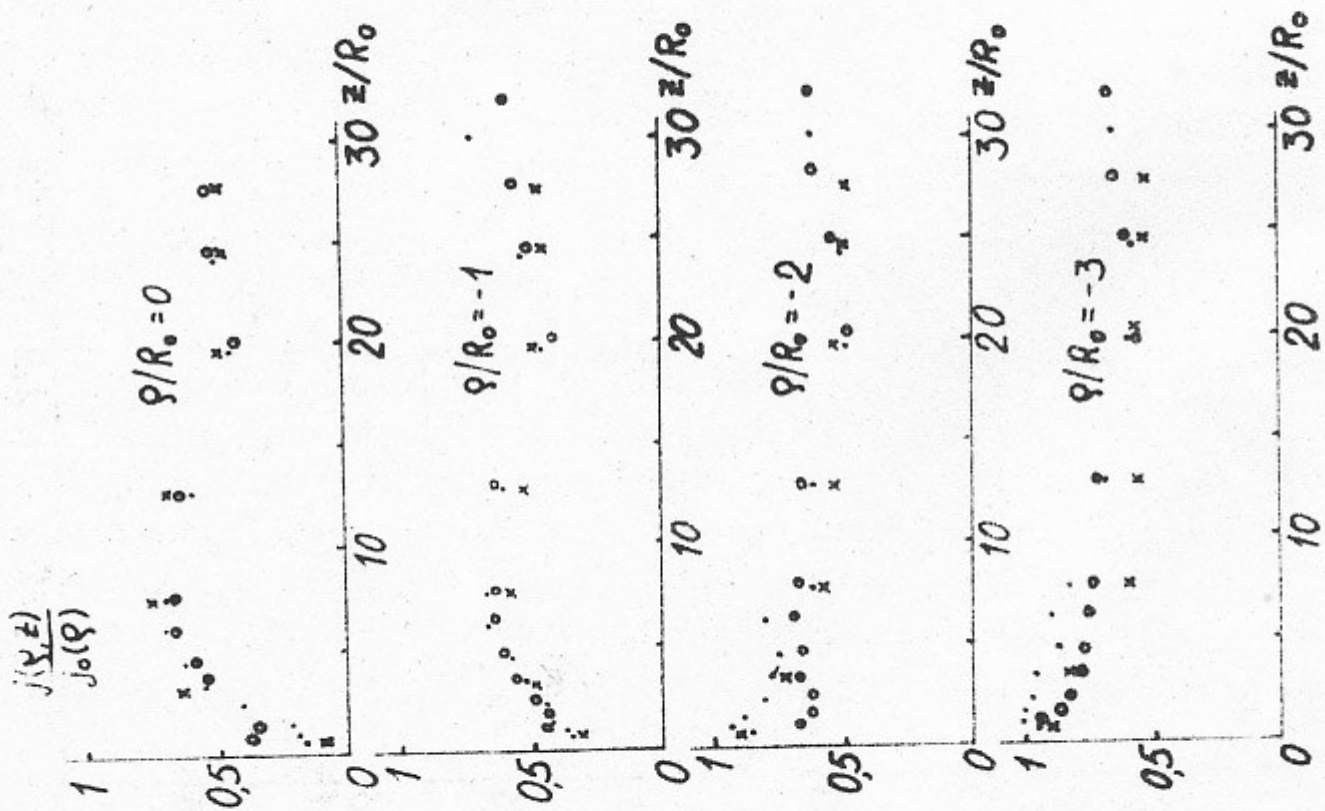


Рис.1.

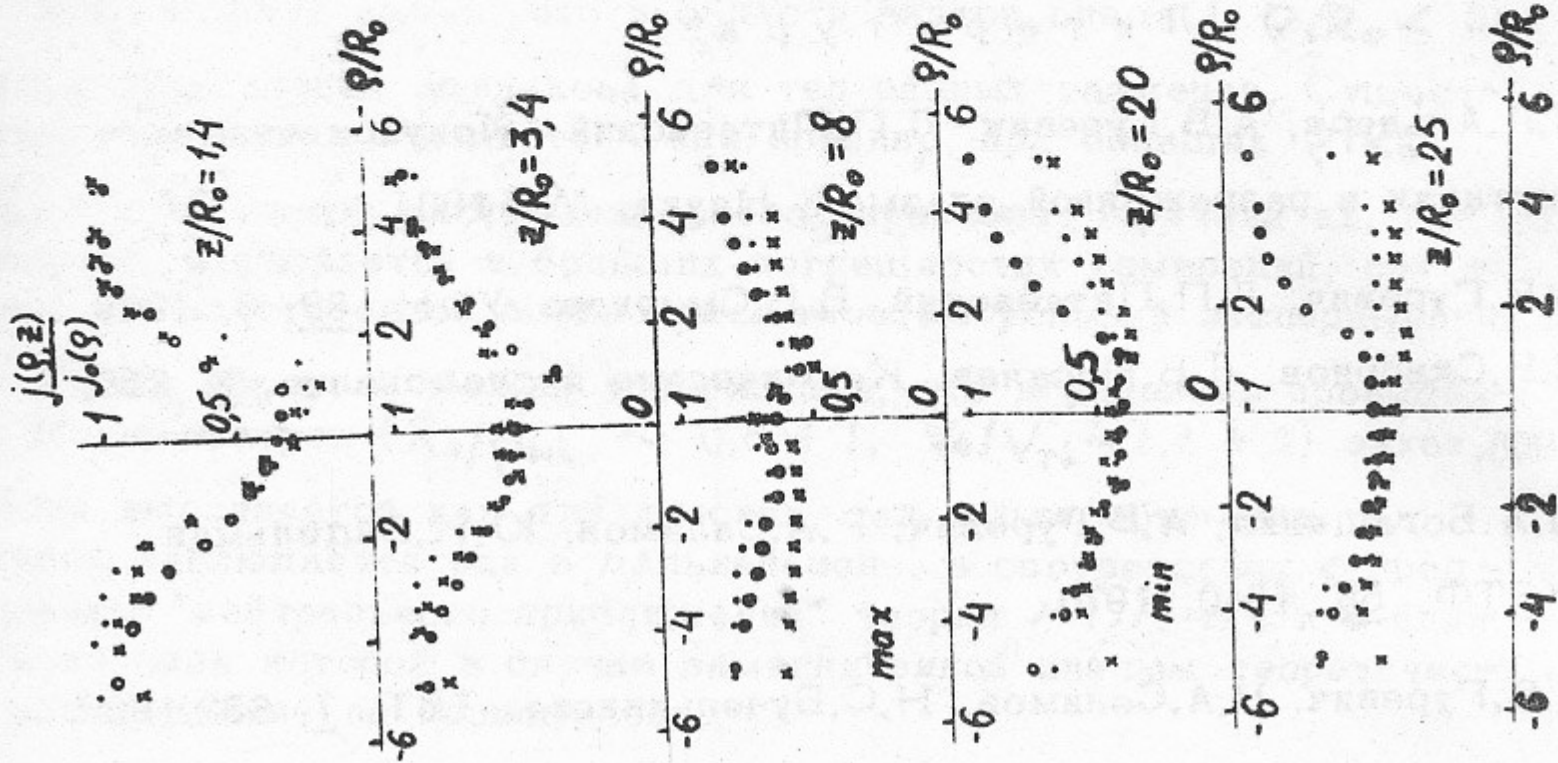


Рис.2.

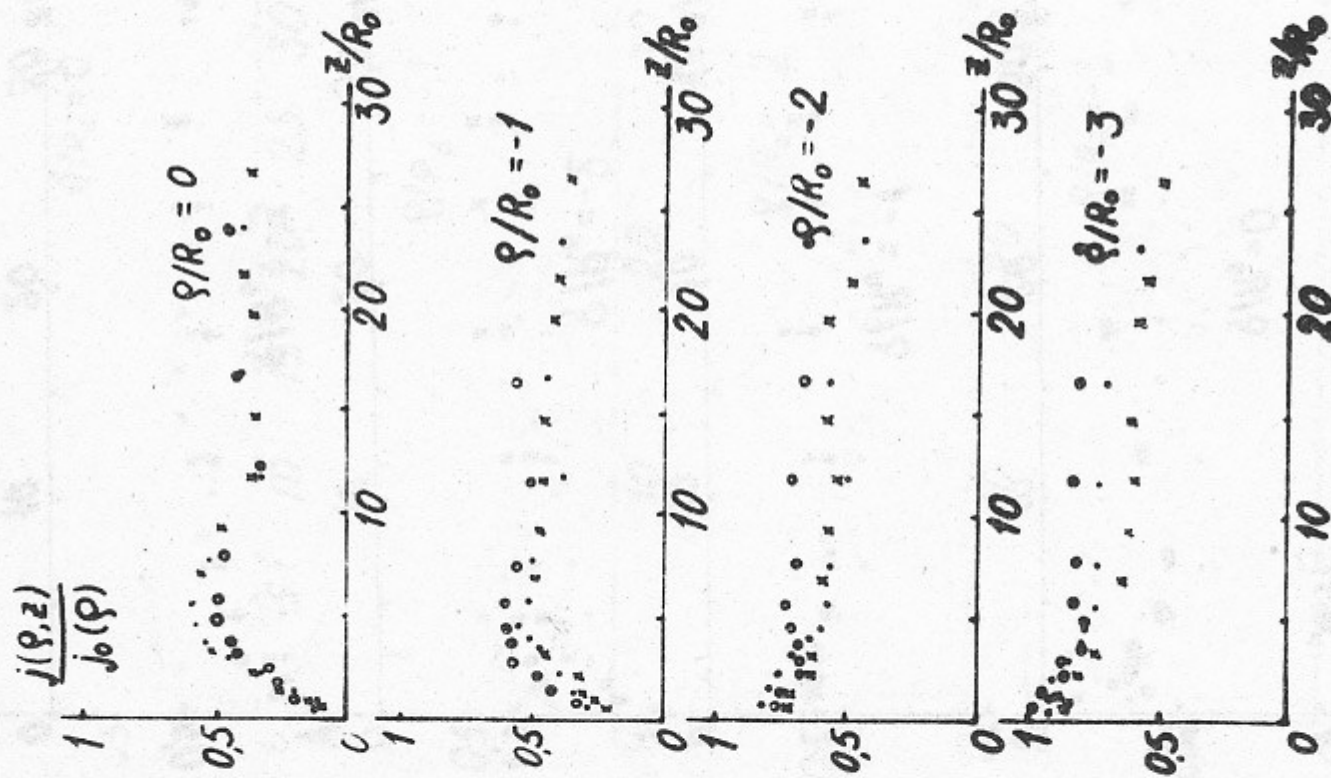


Рис.3.

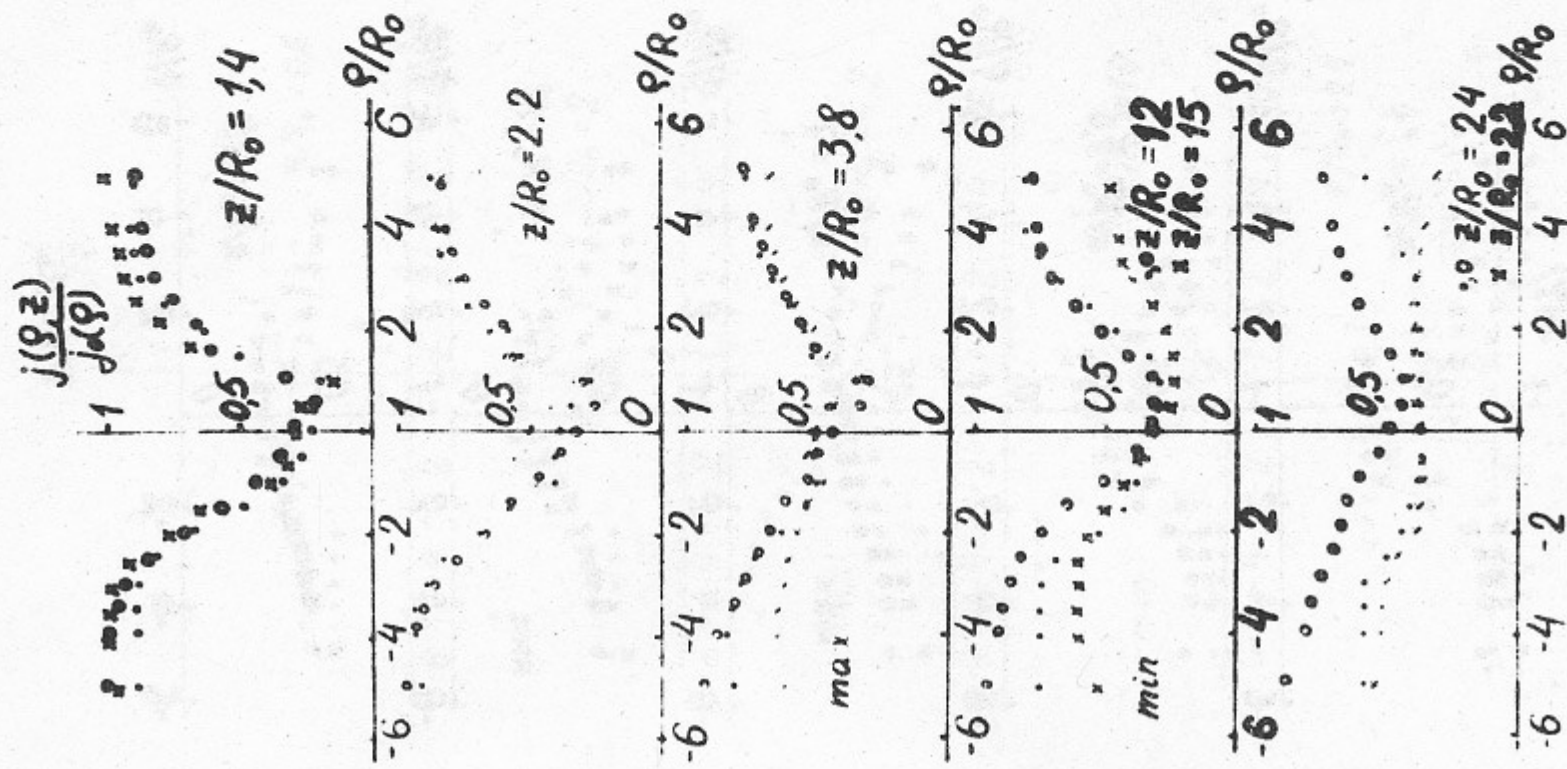


Рис.4.

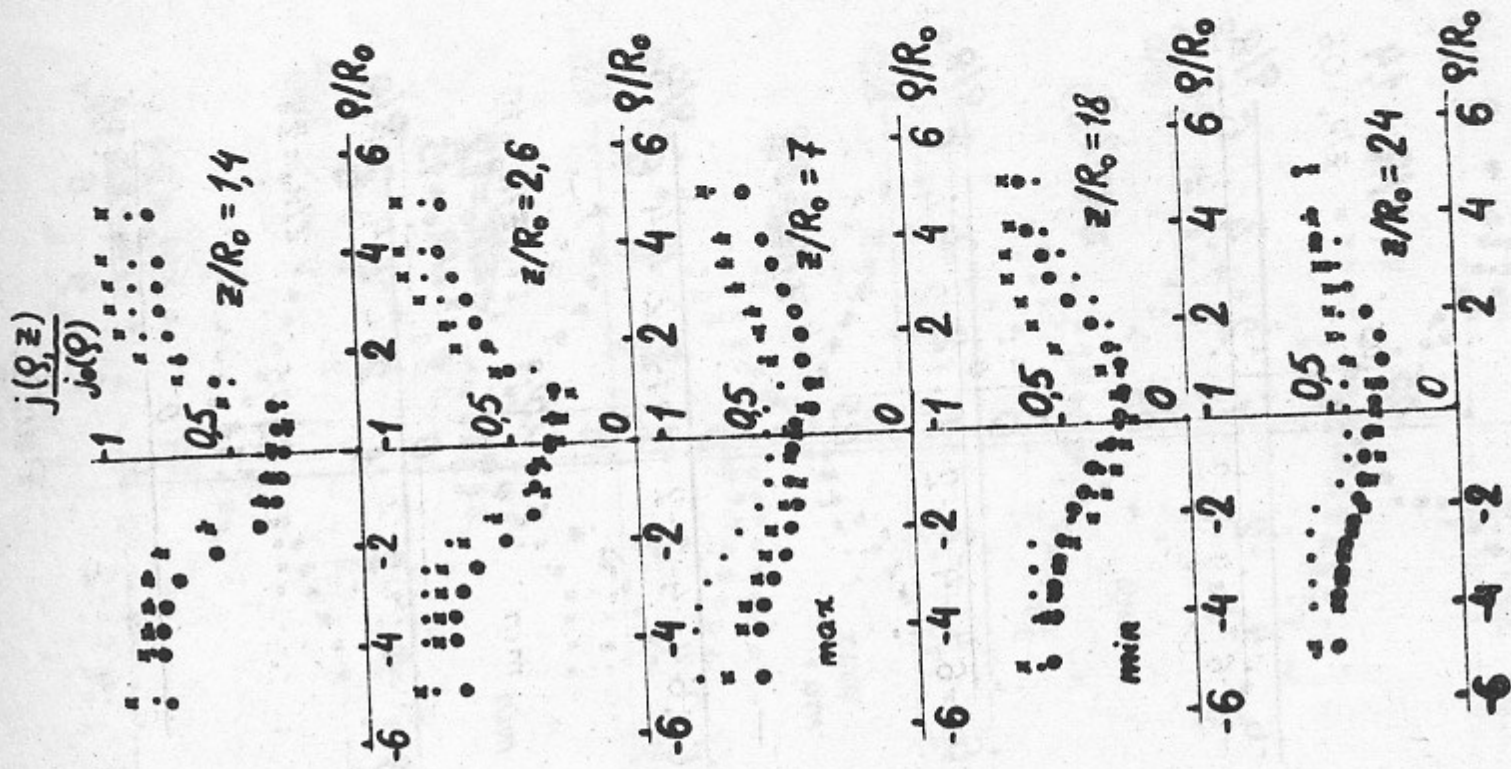


Рис. 6.

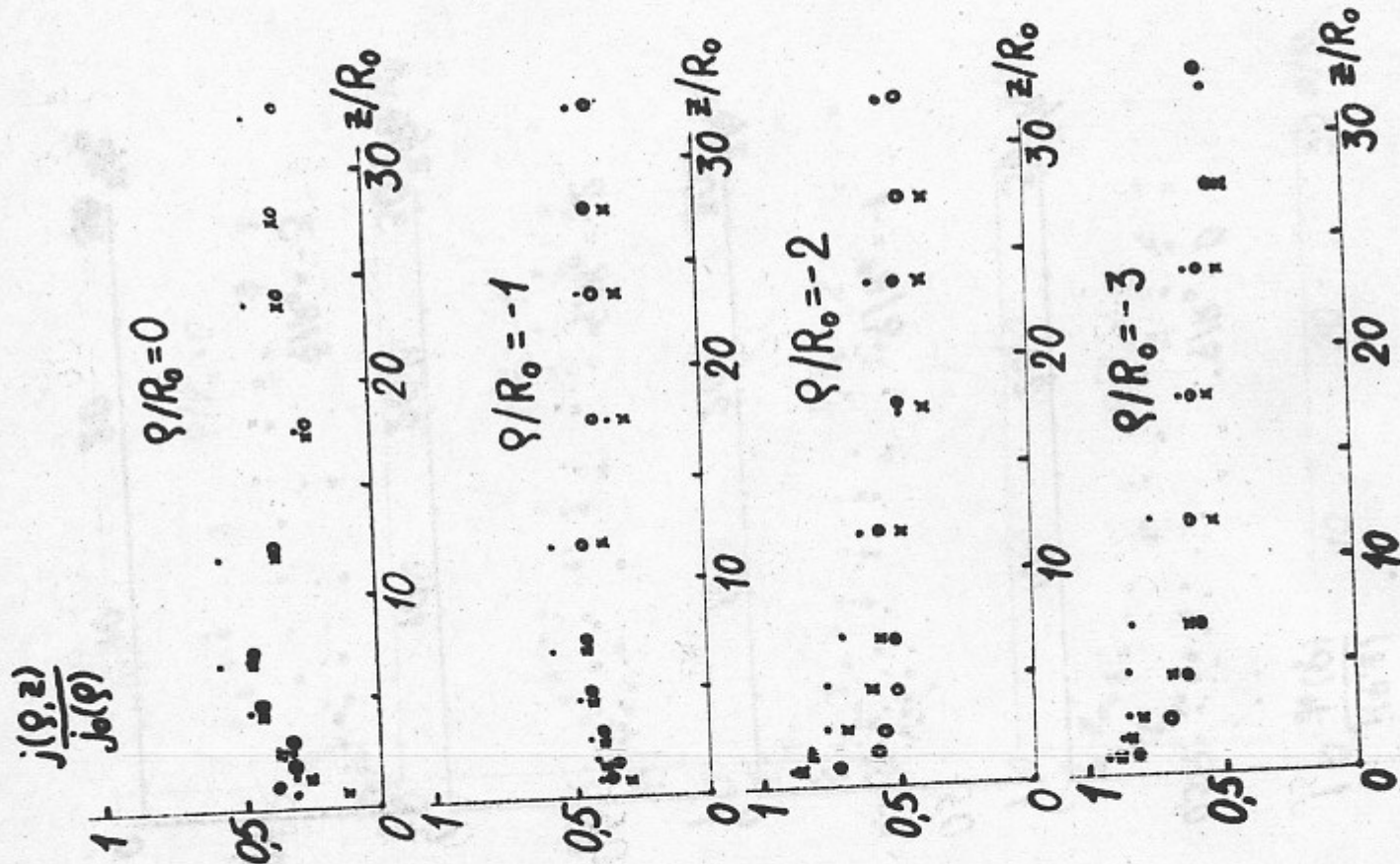


Рис. 5.

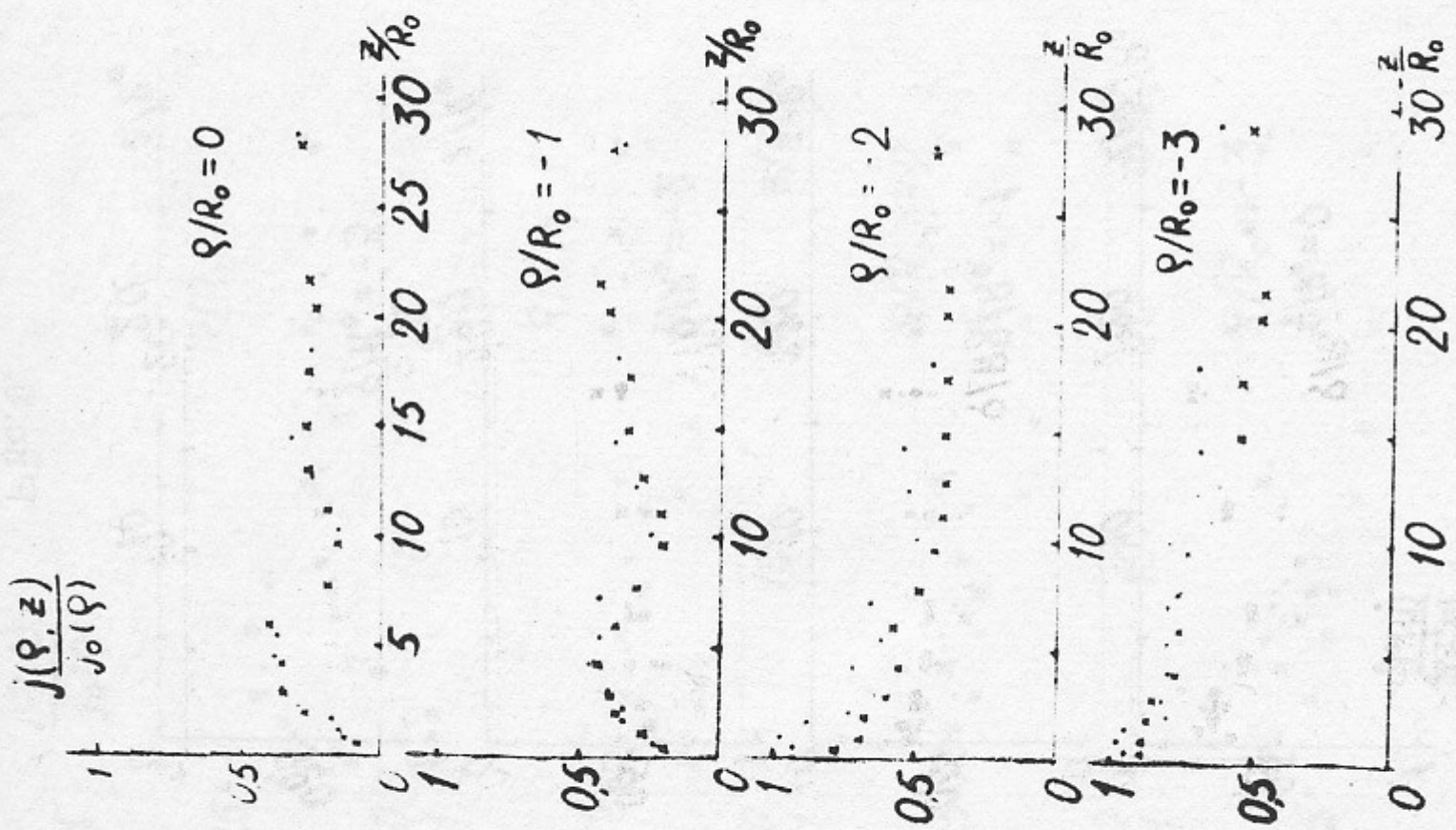


Рис. 7.

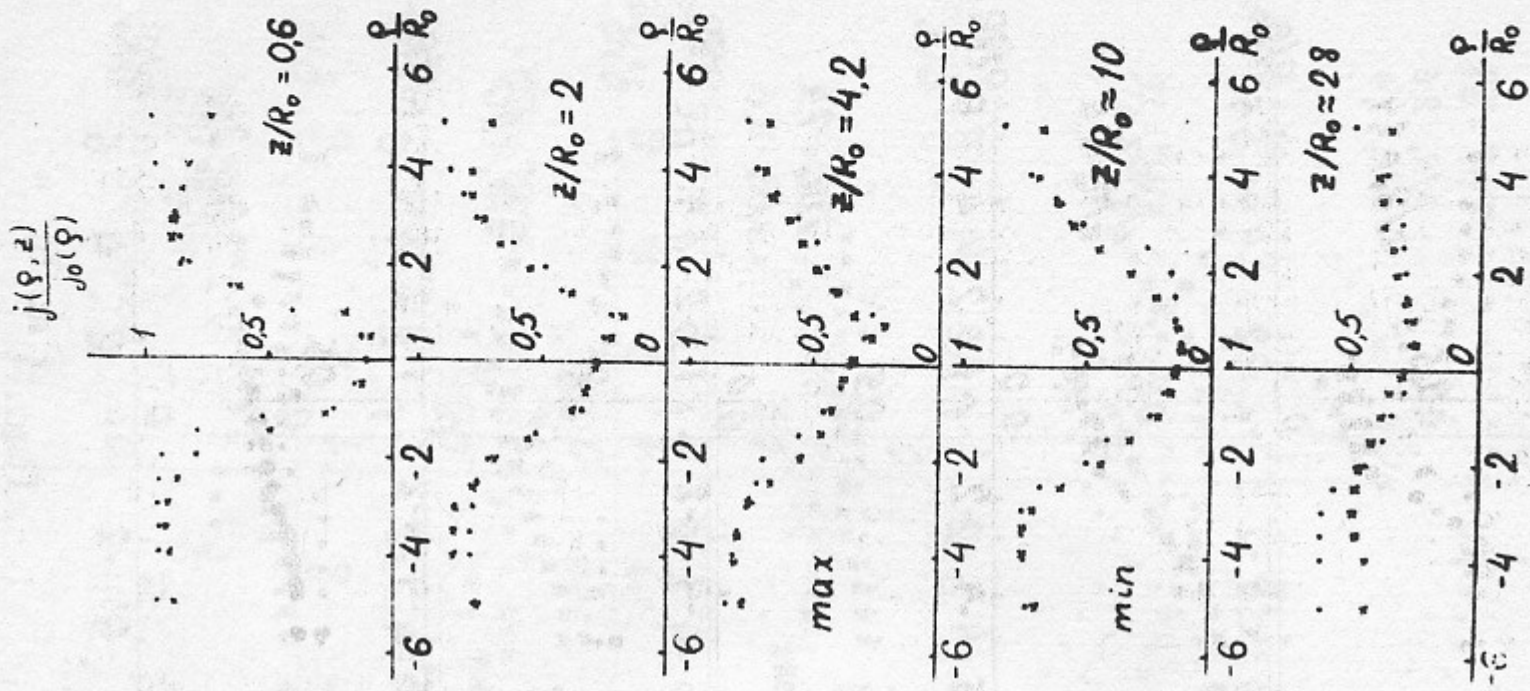


Рис. 8.

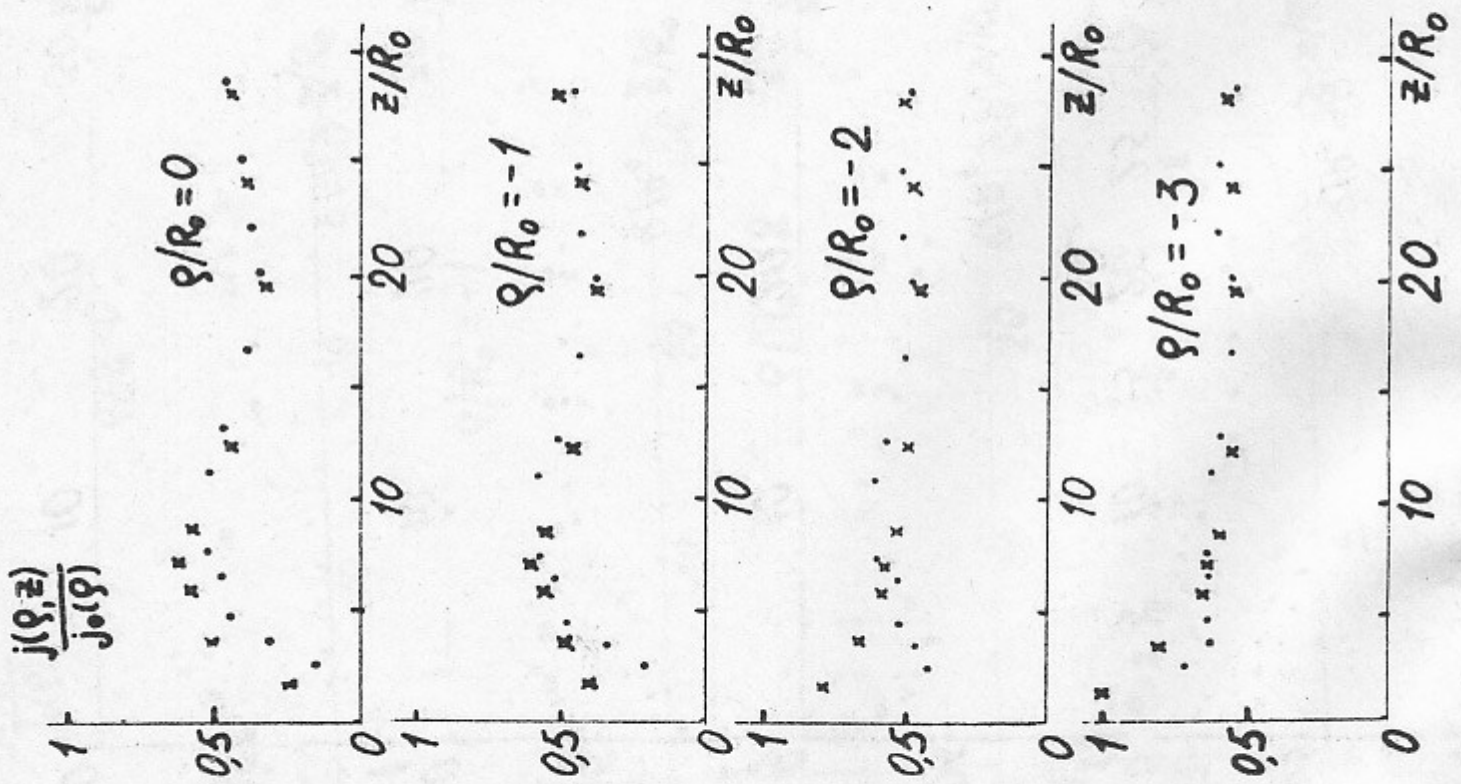


Рис.9.

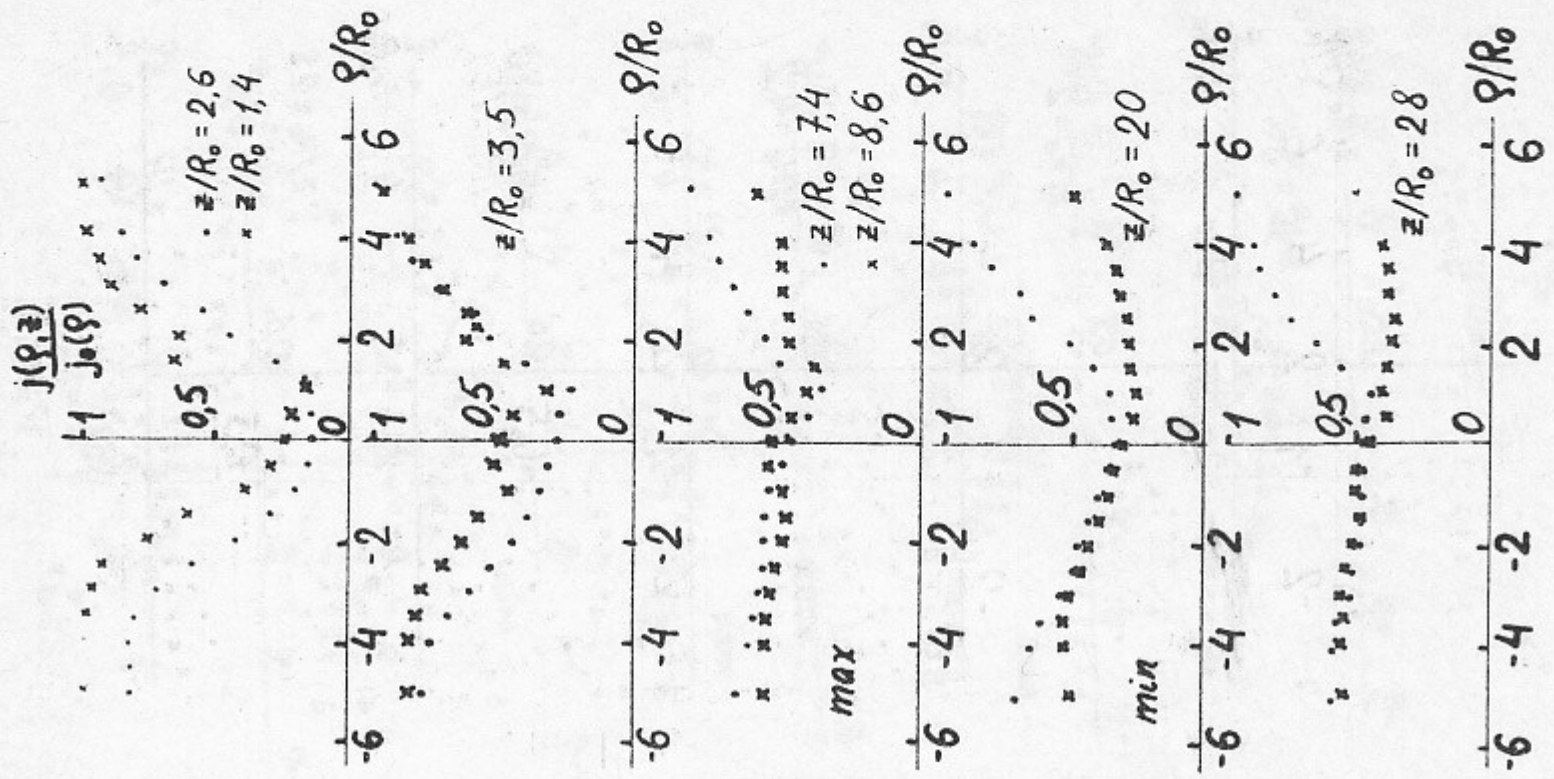


Рис.10



Рис.11.

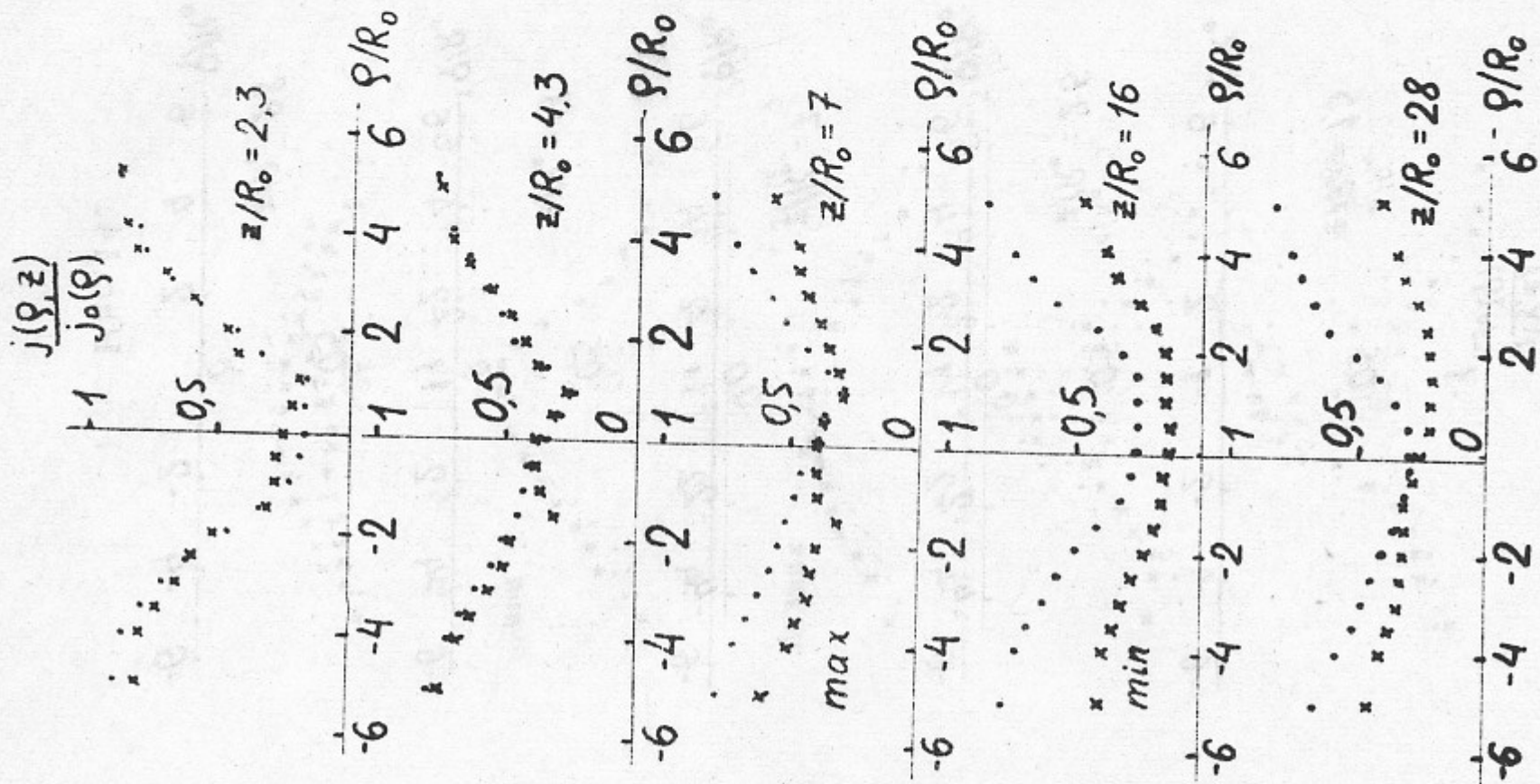


Рис.12.

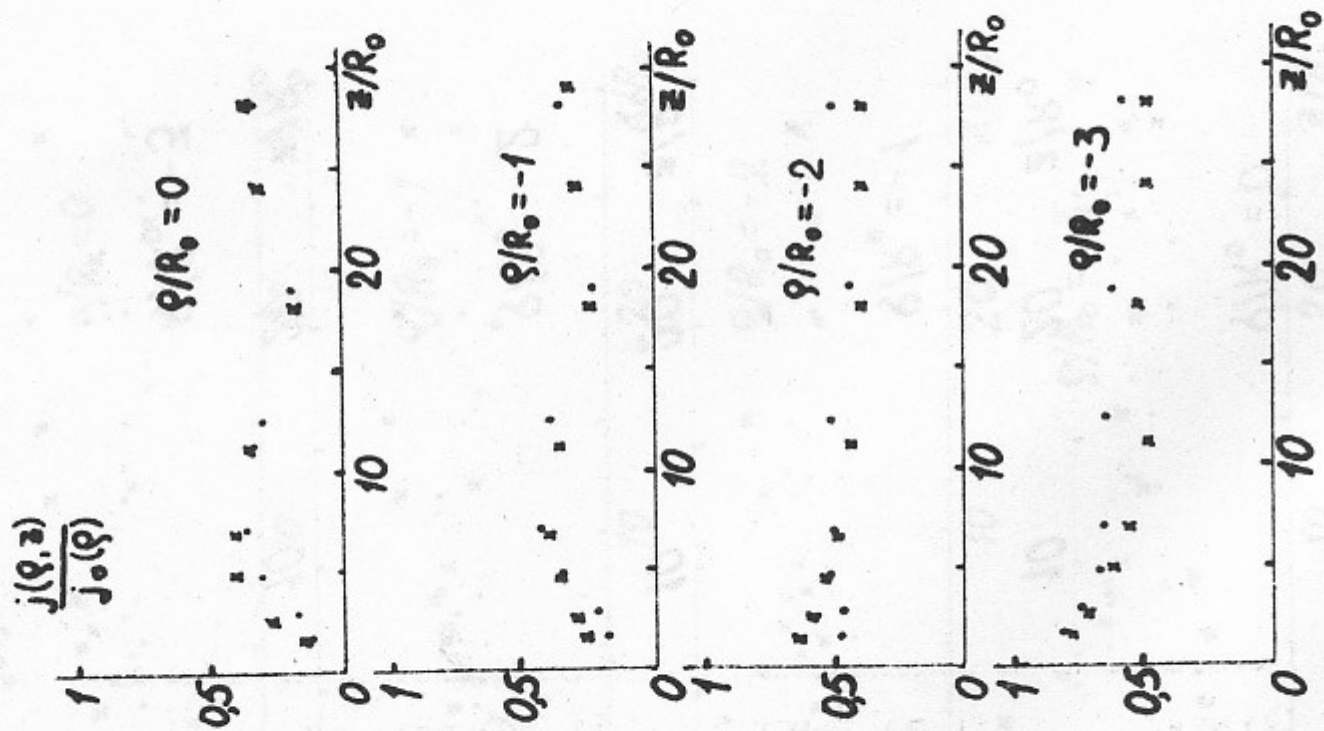


Рис.13.

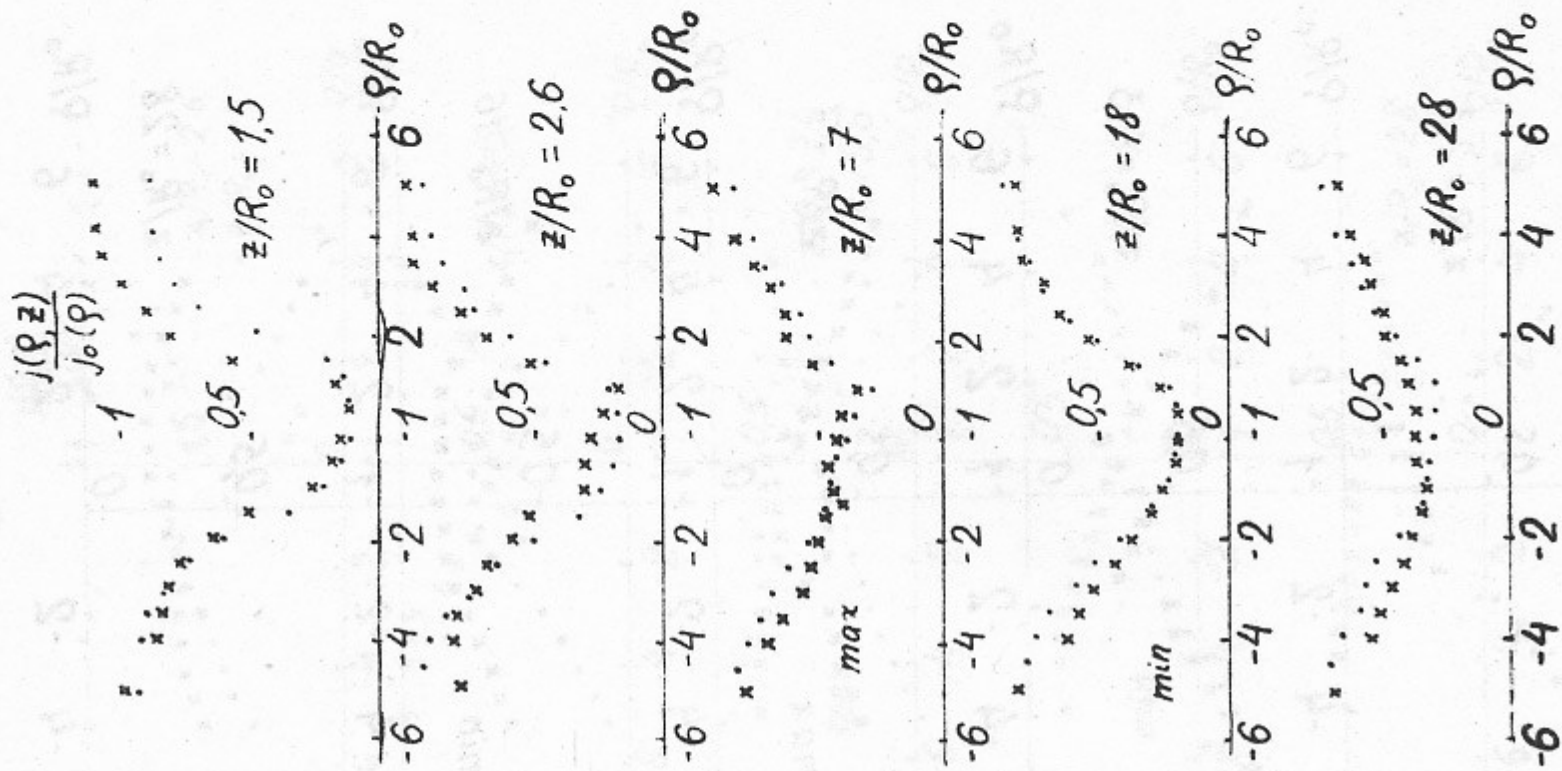


Рис.14.



---

Ответственный за выпуск Ю.И.Эйдельман

Подписано к печати **11.6.71**

Усл. **0,85** печ.л., тираж **200** экз. Бесплатно.

Заказ № **41** . ПРЕПРИНТ

---

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.