

**Министерство высшего и среднего специального образования  
РСФСР**

**Ордена Трудового Красного Знамени  
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)**

**Препринт № 113**

**К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ  
ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ  
НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ  
МЕТОДОМ ФОКУСИРОВКИ**

**В.В.Снегирева**

**Горький 1978 г.**

## А н н о т а ц и я

Приводятся результаты расчетов диаграммы направленности и КНД сфокусированной в ближней зоне линейной ФАР. Исследуется влияние на указанные параметры взаимной связи между элементами, а также ошибок, возникающих при фокусировке в направлении главного лепестка диаграммы направленности. Оцениваются предельные расстояния  $R_{\min}$ , на которых можно измерять диаграмму направленности и КНД антенной решетки с заданной точностью.

Общеизвестно значение метода измерения параметров остронаправленных антенн по источникам, расположенным на близких расстояниях, путем соответствующей фокусировки антенны. Этот метод применительно к зеркальным антеннам был предложен в [1, 2] и разработан в [3-8].

Применительно к другому классу антенн - фазированным антенным решеткам, метод фокусировки рассматривался в [9, 10] и затем в [13, 14]. В частности, в [10] впервые было обращено внимание на то, что минимальное допустимое расстояние определяется в основном влиянием фокусировки на изменение взаимного сопротивления между элементами решетки.

В дальнейшем основное внимание уделялось повышению точности определения диаграммы направленности решеток по измерениям в ближней зоне при все большем сокращении расстояния. В этой цели в [11] была предложена дополнительная фокусировка по каждому направлению измеряемой диаграммы направленности. В [12] было обращено внимание на то, что при измерениях на расстояниях порядка размера апертуры возникают весьма значительные амплитудные ошибки, обусловленные направленностью элементов и разностью расстояний элементов до точки фокусировки. В принципе, как отмечено в [12], точный учет всех этих ошибок и их компенсация путем соответствующего изменения амплитудного распределения по элементам ФАР дает возможность практически точного моделирования диаграммы направленности в дальней зоне в широком секторе углов по измерениям на близком расстоянии. Од-

нако, в [11] и [12] не учитывалось взаимное влияние элементов решетки, которое, естественно, меняется при фокусировке, и эти изменения могут внести заметные искажения в измеряемую диаграмму направленности и КНД (по сравнению с дальней зоной) в том случае, если это взаимное влияние является существенным. Поэтому для ФАР с существенной связью между элементами необходимо эту связь учитывать. Более того, поскольку при фокусировке связь меняется, возникает сомнение в целесообразности в этом случае проводить фокусировку по каждому направлению. Возможно, по-видимому, попытаться ограничиться только фокусировкой в направлении главного лепестка, что значительно проще<sup>+</sup>). Для реализации этой возможности необходимо, естественно, исследовать предварительно как зависят параметры сфокусированной решетки от расстояния, направленности элементов и взаимной связи между элементами.

В настоящей работе проводятся соответствующие расчеты диаграммы направленности и коэффициента направленного действия (КНД) линейной решетки, сфокусированной в ближней зоне, из которых следует, что при известных условиях можно, не фокусируя антенную решетку по каждому направлению, измерять главный и несколько ближних боковых лепестков, а также КНД, с погрешностью, связанной с расстоянием. Как и следовало ожидать, величина взаимного импеданса элементов оказывает существенное влияние на точность измерений и допустимое расстояние и при достаточной взаимной связи практически сводит на нет все преимущества, даваемые фокусировкой по каждому направлению. В работе также определены границы применимости "квадратичной" фокусировки, рассмотренной в [10], как наиболее простой и удобно реализуемой<sup>++)</sup>.

---

<sup>+</sup>) На это обратил внимание Д.А.Дмитренко.

<sup>++)</sup> При фокусировке, рассмотренной в [10], компенсируется лишь квадратичная часть фазовой ошибки.

# I. Основные соотношения

Рассмотрим линейную ФАР длиной  $L$  - систему  $2M + 1$  излучателей, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, с диаграммами направленности  $f_m(\theta) = \cos^q \theta$ . Дальняя зона каждого отдельного излучателя находится на расстоянии  $a$ , естественно, гораздо меньшем, чем для всей решетки. Пусть излучатели возбуждаются комплексными амплитудами  $I_m$ . Тогда поле на расстояниях  $R \gg a$  с точностью до несущественного постоянного множителя можно записать в виде очевидного соотношения<sup>+</sup>)

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=-M}^M I_m f_m^{(1)}(\theta, \varphi) z_m^{-1} \cdot \exp\{-ikz_m\}, \quad (1)$$

где

$$f_m^{(1)}(\theta, \varphi) = f_m(\theta_m, \varphi_m);$$

$$z_m = (R^2 + x_m^2 - 2Rx_m \sin \theta \cos \varphi)^{1/2}. \quad (2)$$

В (2)  $z_m$  - расстояние от излучателя с координатой  $x_m$  ( $x_m = md$ ) до точки наблюдения  $P(x, y, z)$ , сферические координаты которой  $(R, \theta, \varphi)$ . Величины  $\theta_m, \varphi_m$  в (2) являются угловыми координатами точки  $P(x, y, z)$  в сферической системе координат с центром в точке  $(x_m, 0, 0)$ , оси которой параллельны соответствующим осям системы  $OXYZ$  (см. рис. 1). Углы  $\theta_m, \varphi_m$  как видно из рис. 1 нетрудно выразить через  $\theta, \varphi, R, x_m, z_m$ :

<sup>+</sup>) Последующие соотношения (1, 2, 3) аналогичны полученным С.Д.Кременецким и В.А.Завадским.

$$\cos \theta_m = z_m^{-1} R \cos \theta ;$$

$$\cos \varphi_m = [z_m^{(1)}]^{-1} (R \sin \theta \cos \varphi - x_m) ; \quad (3)$$

$$\sin \varphi_m = [z_m^{(1)}]^{-1} R \sin \theta \sin \varphi$$

$$z_m^{(1)} = (R^2 \sin^2 \theta + x_m^2 - 2R x_m \sin \theta \cos \varphi)^{1/2}.$$

Поле при фокусировке данной ФАР в дальней зоне имеет вид

$$E^{(0)}(\theta, \varphi) = \frac{e^{-ikR}}{R} \sum_{m=-M}^M I_m^{(0)} f_m(\theta, \varphi) e^{ikm d \sin \theta \cos \varphi}, \quad (4)$$

где  $I_m^{(0)}$  — комплексные амплитуды токов, возбуждающих излучатели. Преобразуем (1) к виду (4):

$$E(\theta, \varphi) = \frac{e^{-ikR}}{R} \sum_{m=-M}^M I_m f_m^{(1)}(\theta, \varphi) e^{-ik \tilde{z}_m R \cdot z_m^{-1}}, \quad (5)$$

где

$$\tilde{z}_m = z_m - R = R (\sqrt{1 + \alpha_m(\theta, \varphi)} - 1), \quad (6)$$

$$\alpha_m(\theta, \varphi) = -2 \frac{m d}{R} \sin \theta \cos \varphi + \left( \frac{m d}{R} \right)^2. \quad (7)$$

Для фокусировки поля на ближнее расстояние  $R$  необходимо токи в элементах решетки возбуждать с опережением по фазе, зависящем от порядкового номера элемента. При фокусировке в направлении, перпендикулярном апертуре ( $\theta = 0$ ) этот набег фазы должен быть равен

$$\Phi_m = kR \left( \sqrt{1 + \alpha_m(0,0)} - 1 \right). \quad (8)$$

Тогда поля в этом направлении будут складываться в фазе, а в остальных направлениях фазовая ошибка отлична от аналогичной величины в дальней зоне. Чтобы по всем направлениям поля складывались на расстоянии  $R \ll 2L^2/\lambda$  от решетки так же как в дальней зоне, фазовое распределение по элементам должно меняться в зависимости от угла в процессе измерения диаграммы (см. [11], [12]):

$$\Phi_m(\theta, \varphi) = kmd \sin \theta \cos \varphi + k \tilde{z}_m(\theta, \varphi). \quad (9)$$

Рассмотрим фазовые ошибки, возникающие при фокусировке в направлении  $\theta = 0$ :

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_m(\theta, \varphi) &= \Phi_m - k \tilde{z}_m(\theta, \varphi) = \\ &= \Phi_m - kmd \sin \theta \cos \varphi \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{md}{R} \right)^2 + \dots \right] \\ &= \frac{k(md)^2}{2R} + \frac{k(md)^4}{8R^3} + \dots - \frac{k(md)^4}{2R^3} \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

При точной фокусировке в направлении  $\theta = 0$  (8) по всем остальным направлениям возникает фазовая ошибка (по сравнению с дальней зоной, где  $\Delta \Phi_m(\theta, \varphi) = kmd \sin \theta \cos \varphi$ )

$$|\Delta \Phi_{m_1}(\theta, \varphi)| \leq \frac{kmd}{2} \sin \theta \cos \varphi \cdot \left( \frac{md}{R} \right)^2, \quad (11)$$

которая приводит к уширению диаграммы направленности сфокусированной решетки по сравнению с диаграммой в дальней зоне. Для расстояний  $R = \rho L$  таких, что  $\rho \gg \sqrt{n_\theta}$  эта ошибка не превышает  $\pi/8$  в направлениях  $\theta \leq \theta_{r1} \cdot n_\theta$  ( $n_\theta$  - номер лепестка). При квадратичной фокусировке, рассматриваемой в [10]

$$\Phi_m = \frac{k(md)^2}{2R} \quad (12)$$

и по главному направлению  $\theta = 0$  возникает фазовая ошибка  $\Delta\Phi_{m2} \leq \frac{k(md)^2}{8R^3}$  несущественная для расстояний  $R = \rho L$ ,  $\rho \gg \sqrt{L/\theta\lambda}$ . Например, для решетки длиной  $L \sim 50\lambda$  это условие выполняется вплоть до расстояний  $R \sim 2L$ .

При фокусировке на достаточно близкие расстояния нужно учитывать также отмеченное в [12] обстоятельство, что распределение амплитуд поля по волновому фронту  $W$ , как это видно из (5), сходящейся в точку фокусировки сферической волны (см. рис. 1) будет отличаться от соответствующего распределения по волновому фронту  $W^{(0)}$  при фокусировке в дальнюю зону. Эти амплитудные ошибки обусловлены двумя факторами: 1) разностью расстояний отдельных элементов до точки фокусировки

$$K_{m_1}(\theta, \varphi) = \frac{R}{z_m} = [1 + \alpha_m(\theta, \varphi)]^{-1/2} \quad (13)$$

2) направленностью каждого элемента, т.е. необходимо принимать во внимание угол, образуемый направлением максимума д.н. элемента и направлением на точку фокусировки

+) Отметим, что в [10] приводятся соответствующие оценки  $R_{min}$ , полученные из условия  $\Delta\Phi_{m2} \leq \pi/2$ . Однако, проведенные нами расчеты показали, что допустимые изменения КНД и диаграммы направленности соответствуют  $R > L \sqrt[3]{L/\theta\lambda}$  и резко растут при меньших расстояниях, превышая 20% при условии, использовавшемся в [10].



$$K_{m_2}(\theta, \varphi) = \frac{f_m(\theta_m, \varphi_m)}{f_m(\theta, \varphi)}. \quad (14)$$

Поскольку  $K_{m_1}(0,0) \leq 1$ ,  $K_{m_2}(0,0) \leq 1$ , то при фокусировке в направлении  $\theta = 0$  оба сорта амплитудных ошибок ведут к уширению диаграммы направленности сфокусированной решетки в ближней зоне и падению КНД, так как распределение амплитуд по волновому фронту  $W$  становится более неравномерным. При известной диаграмме направленности элементов влияние этих факторов на диаграмму направленности ФАР в ближней зоне можно устранить (см. [12]), если соответствующим образом изменить амплитудное распределение по элементам

$$I_m = \frac{I_m^{(0)}}{K_{m_1} K_{m_2}}. \quad (15)$$

При наличии взаимной связи между элементами фокусировка влияет на величину взаимно наведенных сопротивлений  $\tilde{z}_{mn}$ , делая их зависящими от номера элемента [10]. Полное сопротивление каждого элемента  $\tilde{z}_m$  получается различным, что приводит к отличию комплексных амплитуд токов на элементах от требуемого распределения. Вместо  $I_m^{(0)}$  или (15) получается соответственно

$$\tilde{I}_m = I_m^{(0)} K_{m_3} e^{i\Delta\Phi_{m_3}} \quad (16)$$

или

$$\tilde{I}_m = I_m K_{m_3} e^{i\Delta\Phi_{m_3}}, \quad (16a)$$

где  $K_{m_3} = \left| \frac{\tilde{z}_m^{(0)}}{\tilde{z}_m} \right|$  — амплитудная и

$\Delta \Phi_{m_3} = a z_0 \frac{\chi_m^{(0)}}{z_m}$  — фазовая ошибки, возникающие при фокусировке из-за взаимного влияния элементов, а

$$\chi_m^{(0)} = \sum_{n=-M}^M \frac{I_n^{(0)}}{I_m^{(0)}} \chi_{mn} \quad (17)$$

$\chi_m = \sum_{n=-M}^M \frac{I_n}{I_m} \chi_{mn} e^{i(\Phi_n - \Phi_m)}$  — импеданс элемента соответственно при фокусировке антенны в дальнюю и ближнюю зону. В результате этого параметры сфокусированной решетки в ближней зоне будут отличаться от соответствующих параметров в дальней зоне. Основное влияние здесь оказывает амплитудная ошибка  $K_{m_3}$ , так как оценки, проведенные на основании расчетов взаимной связи элементов с диаграммой направленности вида  $f_m(\theta) = \cos^4 \theta$  (см. [15]) показывают, что (по крайней мере) при  $R = 1,5L$  для  $d \geq 0,25 \lambda$   $|\Delta \Phi_{m_3}| \leq \frac{\pi}{\theta}$ .

Для эквидистантной линейной системы одинаковых элементов в первом приближении можно ограничиться учетом влияния двух ближайших элементов, тогда [10]

$$\chi_m \approx \chi_{mm} + 2 \chi_{m,m-1} e^{i \frac{kd^2}{R}} \cos \frac{mkd^2}{R} \quad (18)$$

Будем считать, что собственные сопротивления элементов чисто активные, т.е. антенна полностью согласована с питающим фидером при отсутствии взаимной связи,  $\chi_{mm} = z_{11}$ . Поскольку все элементы одинаковы, решетка эквидистантная, то взаимные импедансы в отсутствии фокусировки можно считать равными;

$$\chi_{m,m-1} = \chi_{m,m+1} = \chi_{12} = z_{12} + i x_{12} = z_{11} (z'_{12} + i x'_{12}), \quad (18a)$$

где  $z_{12}$  и  $x_{12}$  соответственно активная и реактивная составляющие взаимного импеданса двух элементов, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга. Зависимости  $z'_{12}$  и  $x'_{12}$  от расстояния между элементами

ми имеют знакопеременный и убывающий характер, поэтому можно надеяться, что изменения диаграммы и КНД в реальной решетке не будут превышать соответствующих величин, рассчитанных при учете взаимного влияния только двух соседних элементов.

Как известно, КНД антенны  $D$  определяется соотношением

$$D = \frac{4\pi P_{\max}}{P_{\Sigma}} \quad (19)$$

где  $P_{\max}$  — мощность, излучаемая в единицу телесного угла в направлении главного максимума,  $P_{\Sigma}$  — полная излучаемая антенной мощность. Принимая во внимание взаимную связь только между соседними излучателями, нетрудно показать, что, когда излучателей в решетке много, т.е. можно считать  $|I_{m \pm 1}| = |I_m|$ , то

$$P_{\Sigma} = C z'_{11} \sum_{m=-M}^M |I_m|^2 \left( 1 + 2z'_{12} \cos \frac{mkd^2}{R} \right), \quad (20)$$

где  $z'_{12} = z_{12} / z_{11}$ .

Расчеты диаграммы направленности по мощности

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|^2}{|E_{\max}|^2} = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{\max}} \quad (21)$$

и относительного изменения КНД сфокусированной в ближнюю зону антенной решетки проводились суммированием на ЭВМ (4), (5), (20) для различных расстояний  $R \geq L$  ( $\rho \geq 1$ ) при соответствующих этим расстояниям фазовых распределениях по элементам (9) (только для диаграммы направленности), (8) и (12) как с учетом ( $z'_{12} \neq 0$ , амплитудные распределения по элементам (16) и (16а)), так и без учета взаимной связи между элементами ( $z'_{12} = 0$ , амплитудные распределения и (15)). Искажения диаграммы и изменение КНД определяются не только параметром  $\rho = R/L$  и направлен-

ностью элементов (различное  $q$ )<sup>+</sup>, но и величиной и знаком активной составляющей взаимного импеданса элементов  $z'_{12}$ , связанной согласно [15] с диаграммой элементов и расстоянием между ними  $d$ , поскольку в основном от  $z'_{12}$  зависит характер амплитудных ошибок взаимной связи, т.е. получающиеся при фокусировке амплитудные распределения по элементам. Расчеты проводились для  $d = 0,75 \lambda$ , диаграммы направленности элемента  $f_m(\theta) = \cos^2 \theta$ . Соответствующие значения относительных величин активной и реактивной составляющих взаимного импеданса приведены в табл. № 1, полученной на основании результатов расчетов [15].

Таблица 1

$q$	0	0,5	1	2	3	4
$z'_{12}$	-0,212	-0,119	-0,029	-0,124	0,241	0,331
$x'_{12}$	0	-0,113	-0,164	-0,182	-0,154	-0,110

Расчеты для решетки, сфокусированной в направлении главного лепестка, проводились для значения  $L = 50 \lambda$  ( $M = 32$ ) с учетом взаимного влияния двух соседних элементов. Относительные изменения диаграммы направленности и КНД при сделанных предположениях относительно  $z_m$  и  $z_m^{(0)}$  (см. (18), (18а)) не зависят от числа элементов в решетке, а полностью определяются указанными выше величинами ( $\rho$ ,  $q$ ,  $z'_{12}$ ) и амплитудным распределением. Диаграммы направленности при фокусировке ФАР по каждому направлению (фазовое распределение  $(\theta)$ , амплитудное распределение (18а) с изменением  $K_{m1}$  и  $K_{m2}$  в зависимости от угла  $\theta$ ) рассчитывались с учетом взаимного влияния нескольких соседних элементов, для

<sup>+</sup> На эту зависимость указывалось также в [10] и [12].

которых  $|\xi'_{12}| > 0.01$ . Хотя в последнем случае учитывалось различие  $\xi_{m}^{(0)}$  для краевого и центральных элементов, при достаточно большом количестве элементов в решетке (например, при  $2M + 1 = 33$ , для которого были проведены расчеты) относительные изменения КНД и диаграммы также практически не зависят от числа элементов. Таким образом, выигрыш в расстоянии при фокусировке в ближнюю зону  $n_{\max} = R_0/R_{\min} \cdot (R_0 - 2L^2/\lambda)$  тем больше, чем больше сама решетка

$$n_{\max} = \frac{2 \frac{L}{\lambda}}{p_{\min}} \quad (23)$$

## 2. Диаграмма направленности сфокусированной на конечное расстояние ФАР.

На рис 2-6 представлены графики, позволяющие судить о величине искажения главного и первых трех боковых лепестков диаграммы направленности в "главном сечении" ( $\varphi = 0$ ) при фокусировке в направлении главного лепестка (8) ФАР с равномерным амплитудным распределением по элементам и при учете взаимной связи между ними. Все эти искажения определяются изменением амплитудно-фазового распределения по волновому фронту  $W$  при фокусировке на близкие расстояния  $R$ .

На рис. 4+ 6 для сравнения приведены также графики соответствующих величин, рассчитанные при тех же диаграммах элементов  $f_m(\theta)$ , но без учета взаимной связи ( $\xi'_{12}$  полагалось равным 0). Это, с одной стороны, позволяет выделить влияние на диаграмму направленности амплитудных ошибок  $K_{m_1}$  и  $K_{m_2}$  и фазовой ошибки  $\Delta\varphi_{m_1}$ , возникающих при фокусировке ФАР в направлении главного лепестка, а с другой стороны, сравнение соответствующих величин, рассчитанных при  $\xi'_{12} = 0$  и

+) Это обстоятельство впервые отмечалось в [10], где из оценки минимального расстояния получалось  $n_{\max} = 0.2 L/d$  (т.е.  $p_{\min} = 10 L/d$ , для  $d = 0.75\lambda$   $p_{\min} = 7.5$ ).

$Z'_{12} \neq 0$ , дает некий критерий, по которому можно судить о том, при каких значениях активной составляющей взаимного импеданса можно пренебречь изменением взаимной связи при фокусировке и с какой точностью.

Основное влияние на искажения главного лепестка диаграммы направленности ФАР со слабой взаимной связью<sup>†)</sup> при фокусировке оказывают амплитудные ошибки  $K_{m_1}$  и  $K_{m_2}$  (см. рис. 2а, 2б, 4б). В этом случае учет и компенсация этих ошибок в соответствии с (15) позволяет значительно уменьшить уширение главного лепестка (с 15 до 5% при  $R = L$ , как это видно из рис. 4б). Это, однако, ведет к заметному росту уровня боковых лепестков из-за фазовой ошибки  $\Delta \Phi_{m_1}$ . Этот факт объясняется тем, что и амплитудные и фазовая ошибки в данном случае таковы, что приводят к уширению диаграммы направленности, однако, влияние обоих факторов на уровень боковых лепестков взаимно компенсируется (амплитудные ошибки способствуют уменьшению, а фазовая — росту боковых лепестков). В результате этого при амплитудном распределении  $I_m^{(0)}$  изменение уровня боковых лепестков не превышает 1 дБ даже при  $R = L$ , в то время как компенсация амплитудных ошибок в соответствии с (15) приводит к росту боковых лепестков на 3 дБ при фокусировке на то же расстояние. В обоих случаях изменение главного лепестка  $\delta \theta_{0,5}$  не превышает 5%, а изменение уровня боковых лепестков не превышает 1 дБ при фокусировке на расстояния  $R \geq 2L$ .

При существенной величине взаимной связи к указанным выше ошибкам добавляются амплитудные и фазовые ошибки, обусловленные изменением взаимного импеданса при фокусировке. При  $Z'_{12} < 0$  это изменение способствует увеличению общей амплитудной ошибки ( $K_{m_3} \leq 1$ )

†) Расчеты показали, что, например, при  $Z'_{12} = -0,029$  искажения диаграммы направленности при фокусировке практически не отличаются от соответствующих величин, рассчитанных без учета взаимной связи (см. рис. 4б). Этот же вывод, естественно, справедлив и для меньших (по модулю) значений  $Z'_{12}$ .

и главный лепесток уширяется больше (см. рис. 4а). Расстояние, на котором он не меняется с точностью до 5%, составляет  $R = 3 + 4L$ . На этом же расстоянии и уровень ближних боковых лепестков меняется не более чем на 1 дБ. Поскольку амплитудные ошибки, обусловленные направленностью элемента, растут с ростом последней, то при  $q < 1$  она незначительна по сравнению с амплитудной ошибкой, обусловленной изменением взаимной связи при фокусировке, поэтому компенсация  $K_{m_1}$  и  $K_{m_2}$  (16а) практически не меняет точности определения главного лепестка для ФАР с  $\gamma'_{12} < 0$ . При  $\gamma'_{12} > 0$  ( $q > 1$  в случае  $d = 0,76\lambda$ ) амплитудная ошибка взаимной связи в значительной степени компенсирует ( $K_{m_3} \geq 1$ ) амплитудные ошибки, обусловленные направленностью элементов ( $K_{m_2} \leq 1$ ) и разностью их расстояний до точки фокусировки; главный лепесток не меняется с точностью 5% при фазовой фокусировке вплоть до расстояния  $R = L$  (см. рис. 4в). Однако, с другой стороны, поскольку  $K_{m_1}$  и  $K_{m_2}$ , делающие распределение по волновому фронту  $W$  более неравномерным (что способствует уменьшению уровня боковых лепестков) скомпенсированы, то сильно возрастает на столь близких расстояниях уровень боковых лепестков из-за фазовой ошибки  $\Delta\Phi_{m_1}$ . Наименьшее расстояние, при котором уровень боковых лепестков не меняется более чем на 1 дБ составляет в этом случае  $R = 2L$ .

Результаты расчетов диаграммы направленности ФАР с взаимной связью при фокусировке по каждому направлению [11, 12] приведены на рис. 7 и 8<sup>+</sup>). Они показывают, что ценой значительного усложнения процесса измерения можно сократить допустимое расстояние, на котором мож-

<sup>+</sup>) О том, какая доля в изменении диаграммы направленности при фокусировке происходит только из-за изменения взаимной связи дает также сравнение соответствующих величин, рассчитанных с учетом и без учета взаимной связи и представленных на рис. 4+6. Некоторые расхождения с более точными значениями, приведенными на рис. 7 и 8 (для  $\gamma'_{12} \leq 0$ ) объясняются тем, что в последнем случае учитывалось взаимовлияние не только соседних элементов, но и более далеких, расположенных на расстояниях  $d' \leq 6d$ .

Т а б л и ц а 2

Фокусировка		фазовая (12)	фазовая (8)		фазовая (8)	
Амплит. распределение		$I_m^{(0)}$	$I_m^{(0)}$	(16)	(15)	(16а)
	$I_m^{(0)}$					
$P_{\min}(q=0)$	1	1,8	1,25	4,0	1,25	3,7
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	1,25	1,0	3,2	1,0	3,1
$P_{\min}(q=0,5)$	1	1,8	1,7	2,8	1,8	2,8
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	1,4	1,2	2,1	1,0	2,1
$P_{\min}(q=1)$	1	2,0	1,8	2,0	1,8	2,2
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	1,5	1,4	1,5	1,2	1,4
$P_{\min}(q=2)$	1	2,3	2,1	1,2	2,3	1,4
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	1,7	1,7	1 <sup>+</sup>	1,45	1,0
$P_{\min}(q=3)$	1	2,8	2,5	1,2	2,8	1,55
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	2,0	2,0	1 <sup>++</sup>	1,7	1,0
$P_{\min}(q=4)$	1	3,2	2,9	1,25	3,2	1,55
	$1 - \frac{m^2}{M^2}$	2,3	2,1	1	2,0	1,0

+ )  $|\delta D| \leq 0,5\%$  для  $I_m^{(0)} = 1 - \frac{m^2}{M^2}$  ;  $|\delta D| \leq 2\%$  для

$I_m^{(0)} = 1 - 0,7 \frac{m^2}{M^2}$  при  $p \geq 1$ .

++)  $|\delta D| \leq 2\%$  при  $p \geq 1$ ;  $I_m^{(0)} = 1 - \xi \frac{m^2}{M^2}$  ,  $\xi \geq 0,7$ .



но измерить диаграмму с заданной точностью, примерно в два раза ( $\delta\theta_{0,5} \leq 5\%$ ,  $|\Delta F_{\text{бок}}| \leq 1$  дБ при  $R \geq 1,5 + 2L$ ), если не принимать никаких мер по компенсации изменений амплитудно-фазового распределения при фокусировке, обусловленных взаимной связью.

### 3. КНД сфокусированной на ближнее расстояние ФАР.

На рис. 9 и 10 представлены графики относительного изменения КНД линейной ФАР при фокусировке чисто фазовой (8) и с учетом изменения амплитудного распределения (15) на расстояния  $R = \frac{R_0}{n} = \rho L$  ( $R_0 = \frac{2L^2}{\lambda}$  — условная граница дальней зоны,  $n$  — число "сокращений" дальней зоны), рассчитанные для трех различных величин взаимного импеданса (см. табл. 1). Здесь же приведены соответствующие кривые, рассчитанные для тех же амплитудных распределений и диаграмм элементов, но без учета взаимной связи ( $\xi'_{12}$  полагалось равным 0). Это позволяет выделить долю изменений в КНД, приходящуюся на амплитудные ошибки, связанные с фокусировкой ( $K_{m_1}$ ,  $K_{m_2}$ ) и амплитудные и фазовые ошибки, связанные с изменением взаимного импеданса при фокусировке. Пользуясь результатами расчета, можно определить величину минимального расстояния  $R_{\min}$ , при котором можно измерять КНД с заданной точностью по источнику в ближней зоне. В таблице 2 приведены значения  $\rho_{\min} = R_{\min}/L$ , удовлетворяющие условию, что ошибка в КНД не превосходит 5% для различной направленности элементов.

Как видно из таблицы 2,  $R_{\min}$  существенно зависит от диаграммы элемента, величины активной составляющей взаимного импеданса (см. табл. 1), а также первоначального амплитудного распределения по элементам (рассматривалось равномерное  $I_m^{(0)} = 1$  и спадающее  $I_m^{(0)} = 1 - m^2/M^2$  распределения). Результаты расчетов, приведенные в таблице 2, а также на рис. 9 (а, в), 10 (а, в) свидетельствуют о заметном влиянии на КНД амплитудных ошибок, связанных с изменением взаимного импеданса при фокусировке. При  $|\xi'_{12}| \sim 0,2$  КНД сфокусированной на  $R = 2L$  решетки отличается от соответствующих значений, рассчитанных без учета взаимной связи на 7–12%

(см. рис. 9а, в). На этом же расстоянии при  $\alpha'_{12} = -0,029$  эта разница составляет не более 2%. КНД меньше меняется при спадающем амплитудном распределении, что естественно, так как амплитудные и фазовые<sup>4)</sup> ошибки возрастают по краям решетки, а при спадающем распределении вклад крайних элементов уменьшается. При фокусировке антенны на ближнюю зону мы, как известно, моделируем в области фокальной точки  $P_0$  условия, присущие настроенной на "бесконечность" антенне в дальней зоне. КНД такой сфокусированной антенны в ближней зоне определяется отношением плотности мощности в фокальной точке ( $P_{max}$ ) и полной излучаемой мощности ( $P_{\Sigma}$ ), то есть

$$D = \frac{4\pi P_{max}}{P_{\Sigma}}$$

причем в этом случае  $P_{max}$  определяется амплитудно-фазовым распределением на волновом фронте  $W$ , а  $P_{\Sigma}$  - амплитудным распределением на апертуре антенны. В результате этого  $P_{\Sigma}$ , излучаемая сфокусированной решеткой всегда соответствует большему  $P_{max}$ , чем получается в фокальной точке  $P_0$ . Действительно, в решетке с незначительной взаимной связью ( $\alpha'_{12} \approx 0$ ) падение КНД при фокусировке объясняется амплитудными ошибками  $K_{m1}$ ,  $K_{m2}$ , связанными с разностью элементов до точки фокусировки и с направленностью элементов, в результате чего  $P_{max} < P_{max}^{(0)}$ , но  $P_{\Sigma} = P_{\Sigma}^{(0)}$ , т.к. амплитудное распределение на апертуре антенны в этом случае не меняется.

При изменении амплитудного распределения по элементам решетки в соответствии с (15) по волновому фронту  $W$  создается распределение, требуемое для того, чтобы  $P_{max} = P_{max}^{(0)}$ , однако, это достигается за счет увеличения  $P_{\Sigma}$  по сравнению с  $P_{\Sigma}^{(0)}$  и КНД сфокусированной решетки получается также как в первом случае меньше.  $D^{(0)} = 4\pi P_{max}^{(0)} / P_{\Sigma}^{(0)}$ , КНД решетки в дальней зоне.

+ ) Имеются в виду фазовая ошибка  $\Delta\Phi_{m3}$ , обусловленная изменением взаимного импеданса при фокусировке, а также фазовая ошибка, возникающая при "квадратичной" фокусировке (12).

В решетке с существенной взаимной связью фокусировка на ближнее расстояние вызывает искажение амплитудного распределения по элементам, а, следовательно, изменение  $P_{\Sigma}$  и  $P_{\max}$ :  $P_{\Sigma} = P_{\Sigma}^{(0)} + \Delta P_{\Sigma}$ ,  $P_{\max} = P_{\max}^{(0)} + \Delta P_{\max}$ . Однако, как и в предыдущем случае  $P_{\max}$  в фокальной точке  $P_0$  оказывается меньшей, чем  $\tilde{P}_{\max}$  — плотность потока мощности, получающаяся при настройке на "бесконечность" той же решетки с полной излучаемой мощностью  $P_{\Sigma}$ , с тем же (искаженным) амплитудным распределением. Если первоначальное (до фокусировки) амплитудное распределение по элементам  $I_m^{(0)}$  — равномерное, это всегда ведет к уменьшению КНД, т.к. равномерное распределение соответствует максимальному КНД. При спадающем распределении возможно некоторое увеличение КНД по сравнению с дальней зоной: при  $\gamma'_1 > 0$  амплитудное распределение при изменении взаимного импеданса вследствие фокусировки становится более равномерным, поэтому, хотя по-прежнему  $P_{\max} < \tilde{P}_{\max}$ , но  $P_{\max} > P_{\max}^{(0)}$ .

При измерении КНД фокусировка проводится по главному направлению, поэтому КНД, измеренный в ближней зоне, соответствует искаженной диаграмме направленности, получающейся при такой фокусировке (см. п. 2). Если при этом фокусировка предусматривает компенсацию амплитудных и фазовых ошибок, обусловленных изменением взаимного импеданса, то в точке фокусировки  $P_{\max}$  совпадает с  $P_{\max}^{(0)}$ , но при этом меняется  $P_{\Sigma}$  (см. выше), поэтому КНД не совпадает с КНД дальней зоны, в то время как такая фокусировка, проводимая по каждому направлению, очевидно, будет оптимальной при измерениях диаграммы направленности [12]. Таким образом, по-видимому, для каждого конкретного случая измерения КНД существует более оптимальная фокусировка, в принципе не совпадающая с оптимальной фокусировкой при измерении диаграммы направленности, предусматривающая компромисс между изменением  $P_{\max}$  и  $P_{\Sigma}$  зависящая как от расстояния, так и от взаимного импеданса и направленности элементов — величин, которые не всегда известны с достаточной точностью.

### З а к л ю ч е н и е

Проанализировано с учетом взаимной связи элементов поведение диаграммы направленности в главном сечении и КНД линейной ФАР при фокусировке на ближнее расстояние  $R$  порядка нескольких размеров решетки. На основании полученных результатов можно оценить величину минимального расстояния, на которое можно фокусировать решетку в каждом конкретном случае, а также сделать некоторые общие выводы о методе фокусировки ФАР.

На точность моделирования диаграммы направленности ФАР по измерениям на расстояниях  $R \ll 2L^2/\lambda$  оказывает влияние как способ фокусировки, так и величина взаимного импеданса элементов<sup>†</sup>). Как следует из расчета, можно измерять КНД и ширину главного лепестка диаграммы направленности (при всех рассмотренных значениях взаимного импеданса между элементами) с погрешностью не хуже 5%, а уровень ближних боковых лепестков с точностью до 1 дБ при фокусировке (8) в направлении лишь главного лепестка на расстояние  $R \approx 3 \div 4L$ . Если известно, что  $\alpha'_{12} \geq 0$ , то эти же точности реализуются даже на расстоянии  $R = 2L$ , а также при всех рассмотренных значениях взаимного импеданса и фокусировке по каждому направлению измеряемой диаграммы (см. [11], [12]) на расстояния  $R \sim 1,5 - 2L$ . Для реализации точного моделирования диаграммы направленности по измерениям на меньшем расстоянии рассмотренная в [11], [12] фокусировка должна проводиться с учетом ошибок, вызванных изменением взаимного импеданса при фокусировке.

При измерении КНД фокусировка проводится только в направлении главного лепестка, и оптимальная фокусировка в силу этого, а также других причин, указанных в п. 3, в принципе отличается от фокусировки, обеспечивающей

<sup>†</sup>) В статье рассмотрены значения  $|\alpha'_{12}| \leq 0,24$  ;

$$|\alpha'_{12}| < 0,2$$

точное измерение диаграммы направленности. Вопрос об оптимальной фокусировке для измерений КНД требует дополнительного рассмотрения, так как возможно, что в некоторых случаях она ненамного увеличивает точность измерений КНД по сравнению с рассмотренной в данной работе, требуя в то же время знания величины взаимного импеданса и направленности элементов.

Автор благодарит Н.М. Цейтлина и Д.А. Дмитренко за полезную дискуссию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Есепкина Н.А., Докл. АН СССР, 1957, 113, 1, 82, Приборы и техника эксперимента, 1959, 2, 24.
2. D.Cheng, *Wireless Engr.*, 1956, 33, 10, 107;  
Вопросы радиолокационной техники, 1957, 2, 38.
3. Цейтлин Н.М. Изв.вузов.Радиофизика, 1964, 7, 3, 571.
4. Саломонович А.Е., Брауде Б.В., Есепкина Н.А., Радиотехника и электроника, 1964, 9, 6, 1069.
5. Андрианов В.И., Владимирова О.Н., Волков В.Г. Вопросы радиозлектроники, 1967, сер. Общетеχνическая, вып. 1, 49.
6. Дмитренко Д.А., Романычев А.А., Цейтлин Н.М. Радиотехника и электроника, 1969. 14, 12, 2108.
7. Брауде Б.В., Есепкина Н.А. Радиотехника и электроника, 1970, 15, 6.
8. Дмитренко Д.А., Аникина В.В. Изв. вузов, Радиофизика, 1973, 16, 2, 262.
9. Ricardi L.J., in "Electromagnetic Theory and Antennas", E.C.Jordan, Ed. New York, Pergamon Press, 1963, p.1301.
10. Вольперт А.Р. Сб. Антенны, 1969. вып. 6.
11. Рунов А.В., Сацункевич Л.И. Автор. свид. СССР № 319018, 1971, Бюллетень № 32.
12. Дмитренко Д.А., Фарфель В.А.  
Радиотехника и электроника, в печати.
13. Johnson R.C., Ecker H.A., Hollis J.S., *Proceedings IEEE*, 1973, vol.61, n.12; ТИИЭР, 1973, № 12.

14. Shaffman R.C., August G., "Focused antenna pattern techniques for phased array radar", Stanford Res.Inst., Final Rep., Project 7528, 1970.

15. Вендик О.Г.

"Антенны с немеханическим движением луча",  
Изд. "Сов. радио", М., 1965.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 2. Диаграммы направленности сфокусированной на расстояние  $R = \rho L$  антенной решетки со слабой взаимной связью  $f_m(\theta) = \cos \theta$ ,  $z_{12} = 0.029$ ,  $d = 0.75 \lambda$ ).

- а) фокусировка фазовая (8); амплитудное распределение  $I_m^{(a)}$ ;
- б) фокусировка фазовая (8), амплитудное распределение (15);
- в) фокусировка фазовая (12), амплитудное распределение  $I_m^{(a)}$ .

Рис. 3. Диаграмма направленности ФАР с взаимной связью, сфокусированной на расстояние  $R = \rho L$ ;

- а)  $f_m(\theta) = 1$ ,  $z'_{12} = -0.212$ ,  $x'_{12} = 0$ ;
- б)  $f_m(\theta) = \cos^3 \theta$ ,  $z'_{12} = 0.241$ ,  $x'_{12} = -0.154$ .

Фокусировка фазовая (8), амплитудное распределение (16а).

Рис. 4. Относительные изменения ширины главного лепестка диаграммы направленности (на уровне 0,5 мощности) ФАР, сфокусированной на расстояние  $R = \rho L$ . Фокусировка фазовая (8);  $z'_{12} = 0$ ;

- амплитудное распределение  $I_m^{(a)}$ ;
- амплитудное распределение (15);  $z'_{12} \neq 0$ ,
- - - - амплитудное распределение (16), - - -
- амплитудное распределение 16 а.

Штриховка графиков на рис. 5, 6, 8, 10 аналогична рис. 4.

Рис. 5. Изменение уровня 1-го бокового лепестка диаграммы направленности ФАР, сфокусированной на расстоянии  $R = \rho L$ .



Рис. 6. Изменение уровня 2-го и 3-го бокового лепестка диаграммы направленности ФАР, сфокусированной на расстояние  $R = \rho L$ .

Рис. 7. Относительное изменение ширины лепестка диаграммы направленности (на уровне 0,5 мощности) при фокусировке ФАР по каждому направлению измеряемой диаграммы ( $\theta$ ), (16а) на расстояния  $R = \rho L$  ;  
 - - - - -  $z'_{12}(d) < 0$  ; ————  $z'_{12}(d) \approx 0$  ;  
 — · — · —  $z'_{12}(d) > 0$ .

Рис. 8. Изменение уровня 1-го бокового лепестка диаграммы направленности при фокусировке ФАР ( $\theta$ ), (16а) на расстояние  $R = \rho L$  ; - - - - -  $z'_{12}(d) < 0$  ;  
 ————  $z'_{12}(d) \approx 0$  ; — · — · —  $z'_{12}(d) > 0$ .

Рис. 9. Относительное изменение КНД сфокусированной на  $R = \rho L$  ФАР с равномерным амплитудным распределением по элементам. (фокусировка (8)):  
 ————  $z'_{12} = 0$  ; - - - - -  $z'_{12} \neq 0$  ;  
 фокусировка (8) и (15): — · — · —  $z'_{12} = 0$  ;  
 ————  $z'_{12} \neq 0$  ).

Рис. 10. Относительное изменение КНД сфокусированной на расстояние  $R = \rho L$  ФАР со спадающим амплитудным распределением по элементам  $I_m^{(0)} = 1 - \frac{m^2}{M^2}$  ;  
 (фокусировка (8)): ————  $z'_{12} = 0$  ; - - - - -  $z'_{12} \neq 0$  ;  
 (фокусировка (8) и (15): — · — · —  $z'_{12} = 0$  ;  
 ————  $z'_{12} \neq 0$  ).

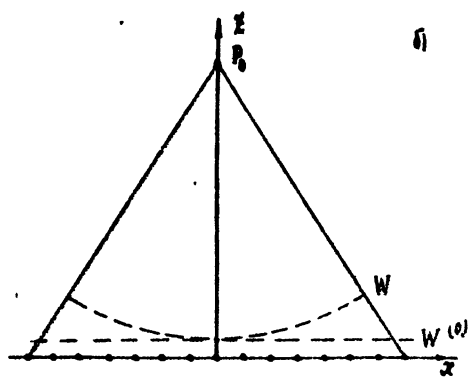
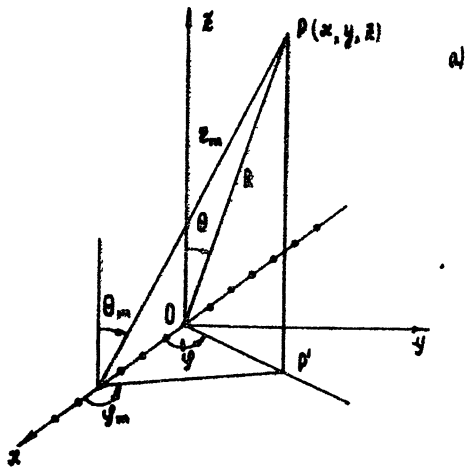


рис 1

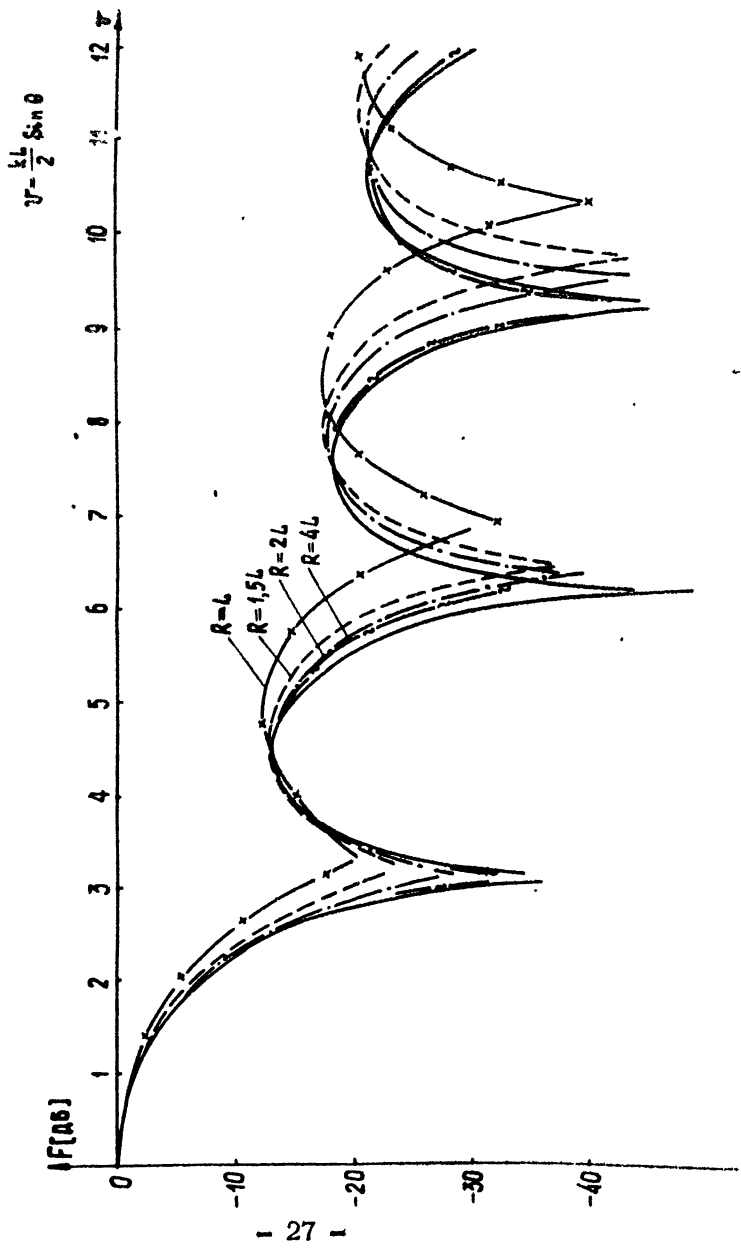


Fig. 2a.

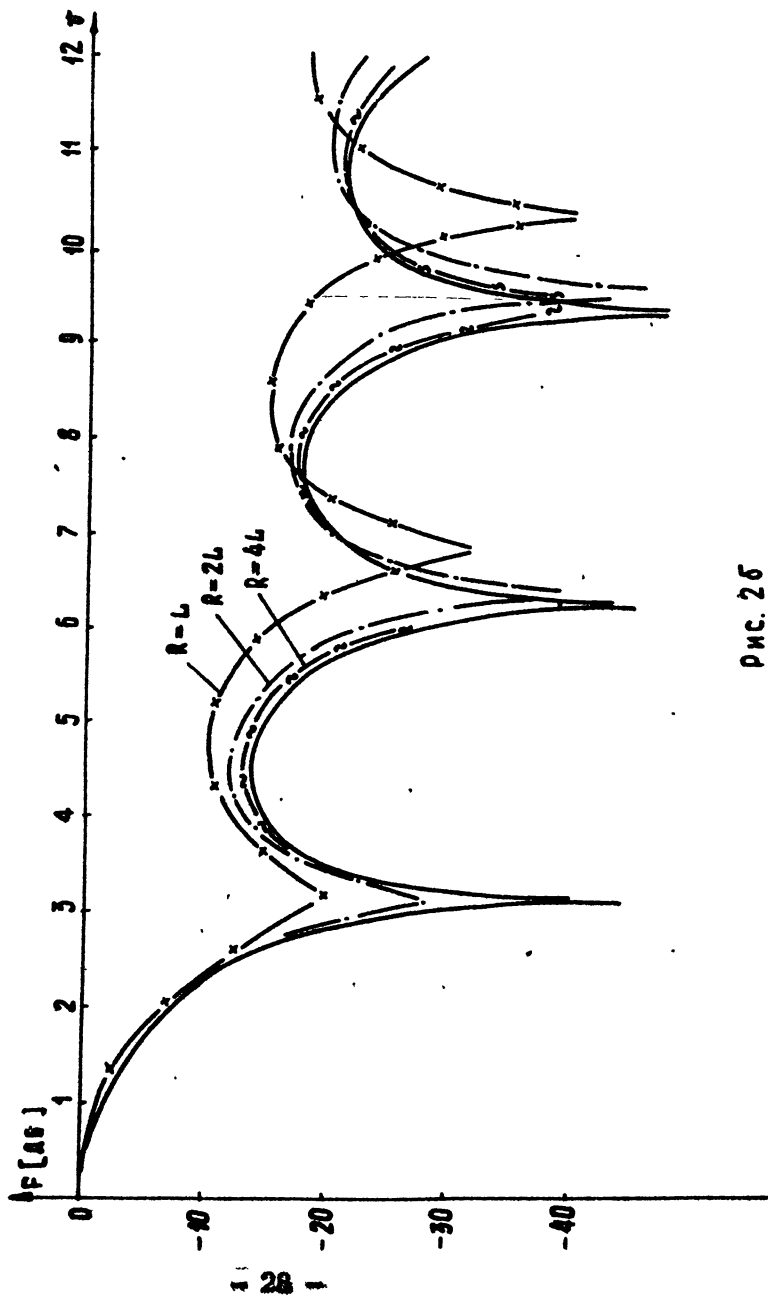


Рис. 2б

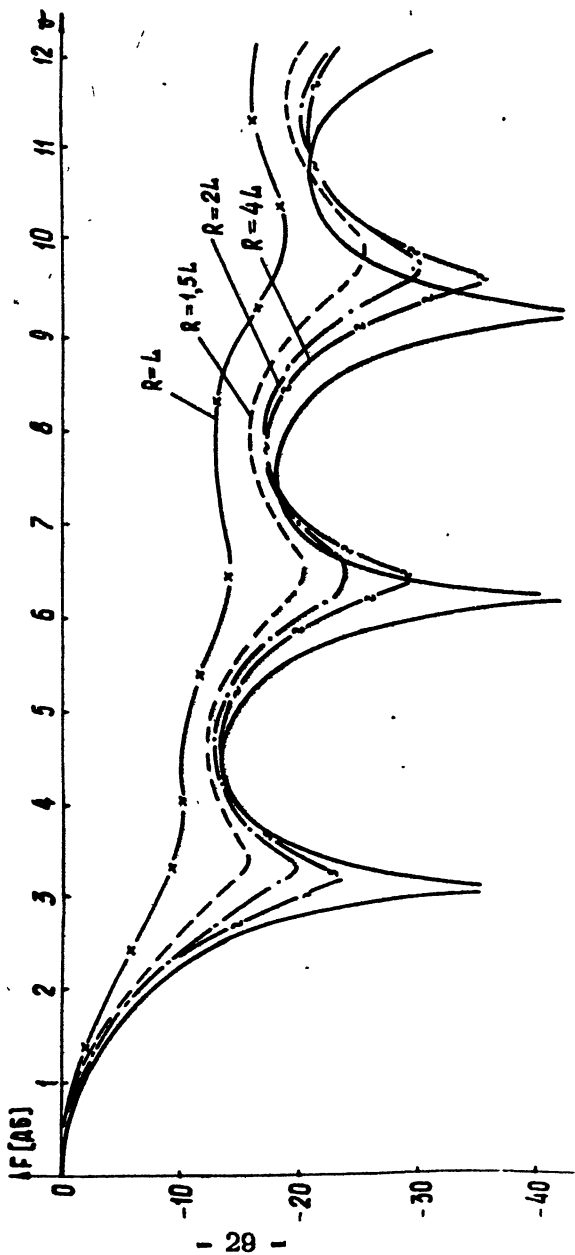
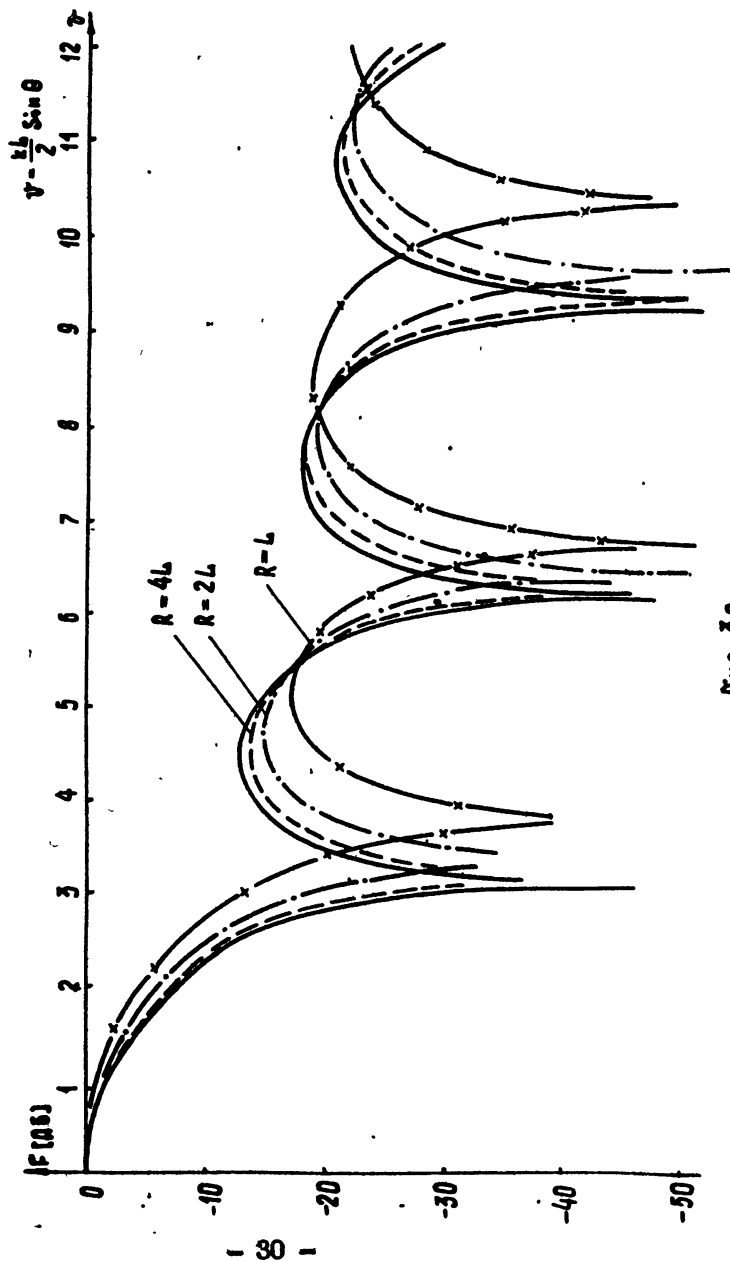


Рис. 26



Дис. 30

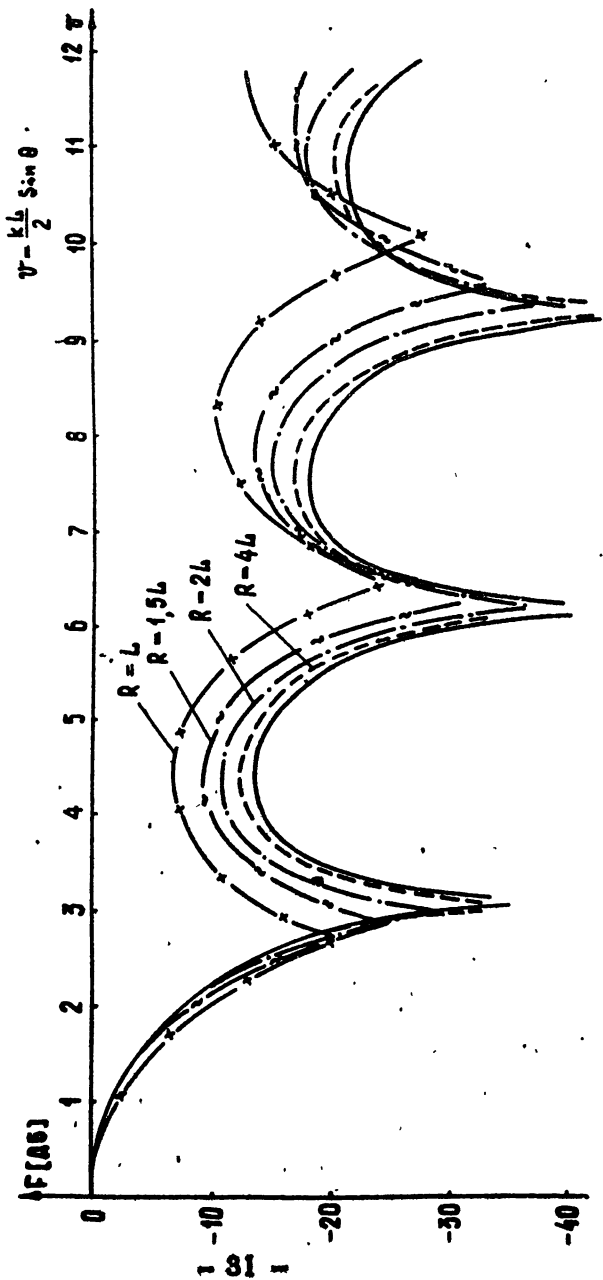


Рис. 3б

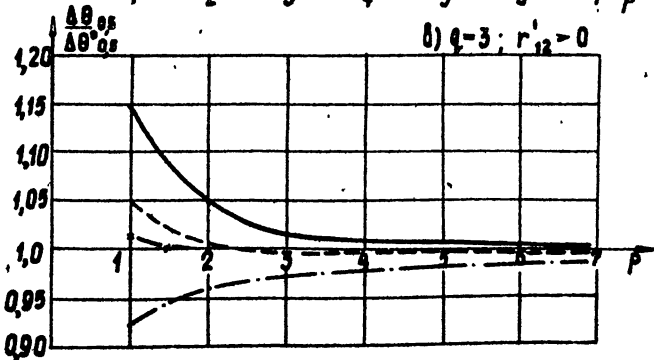
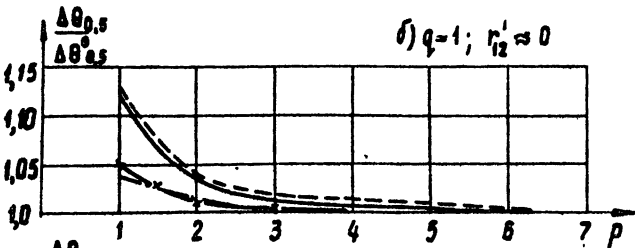
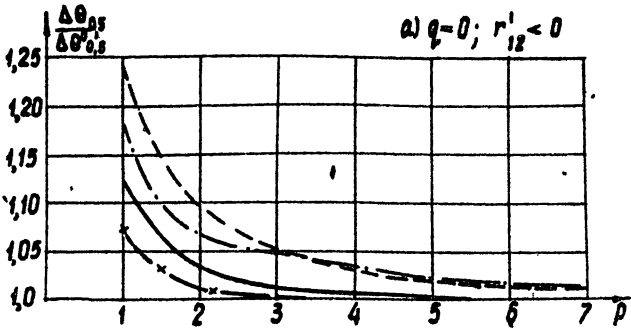


Рис. 4



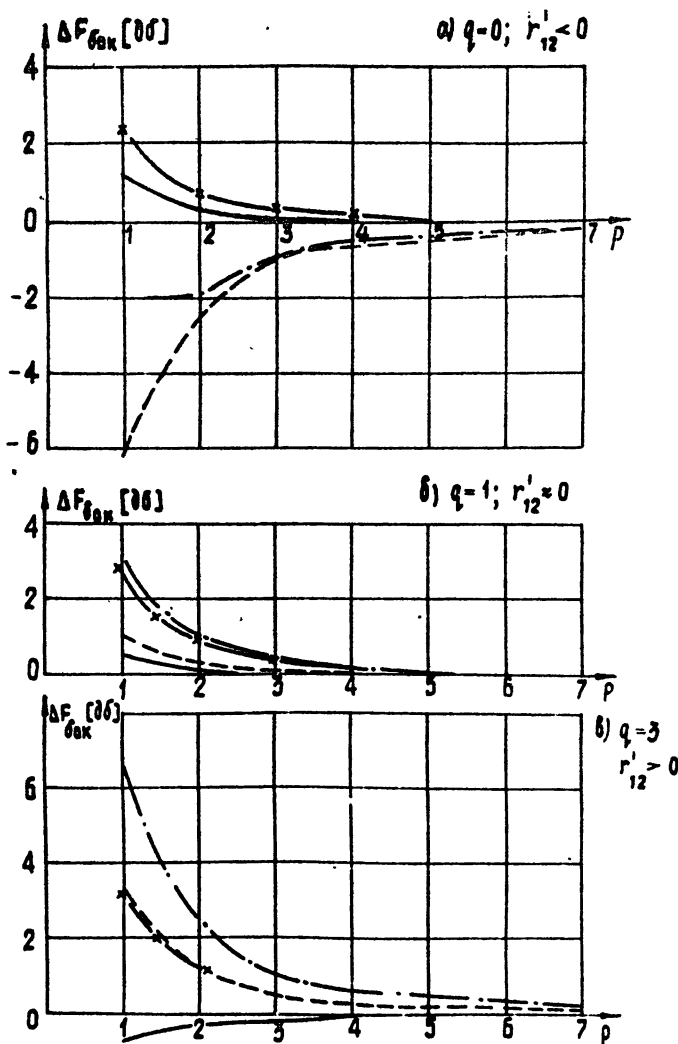


Рис. 5

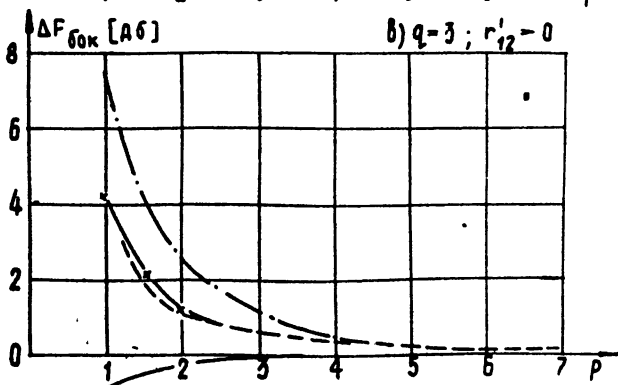
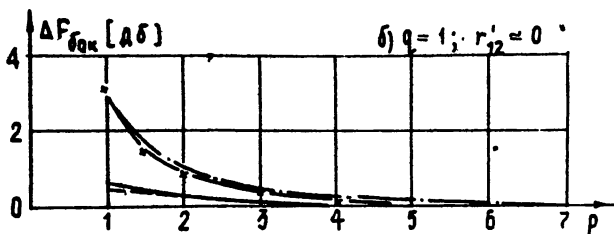
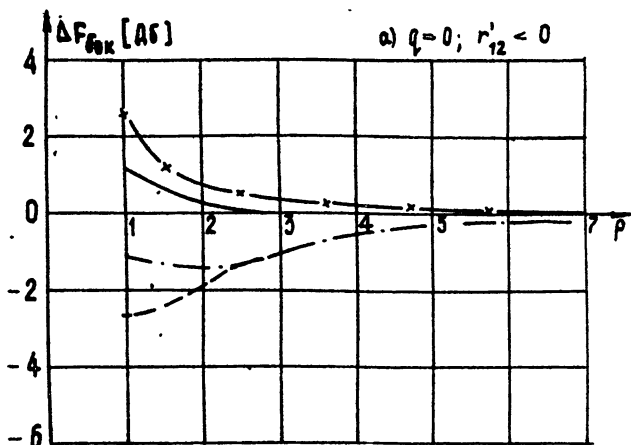


Рис. 6

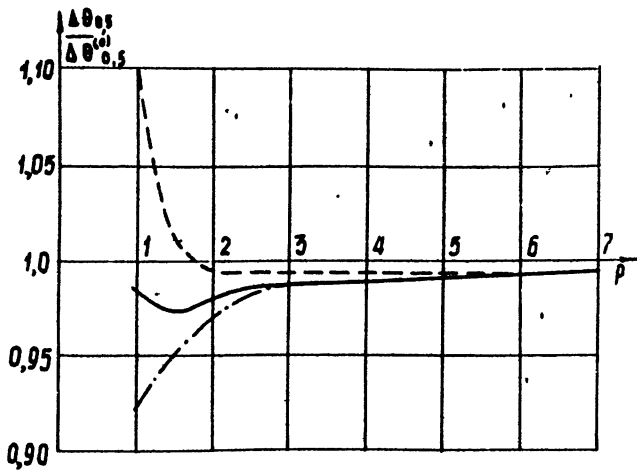


Рис. 7

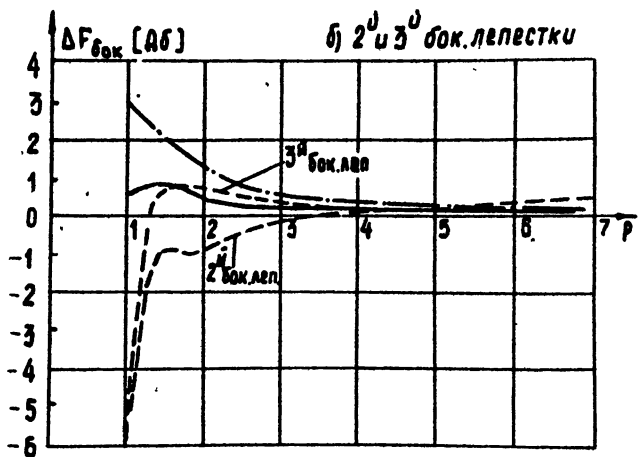
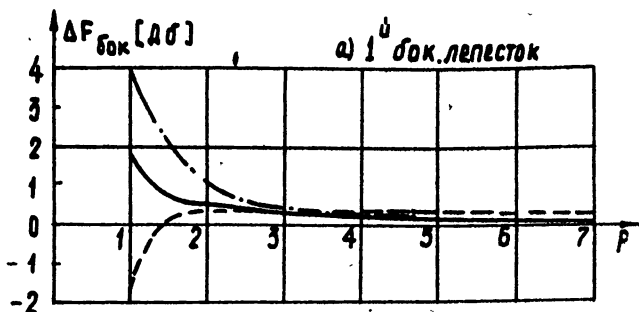


Рис. 8

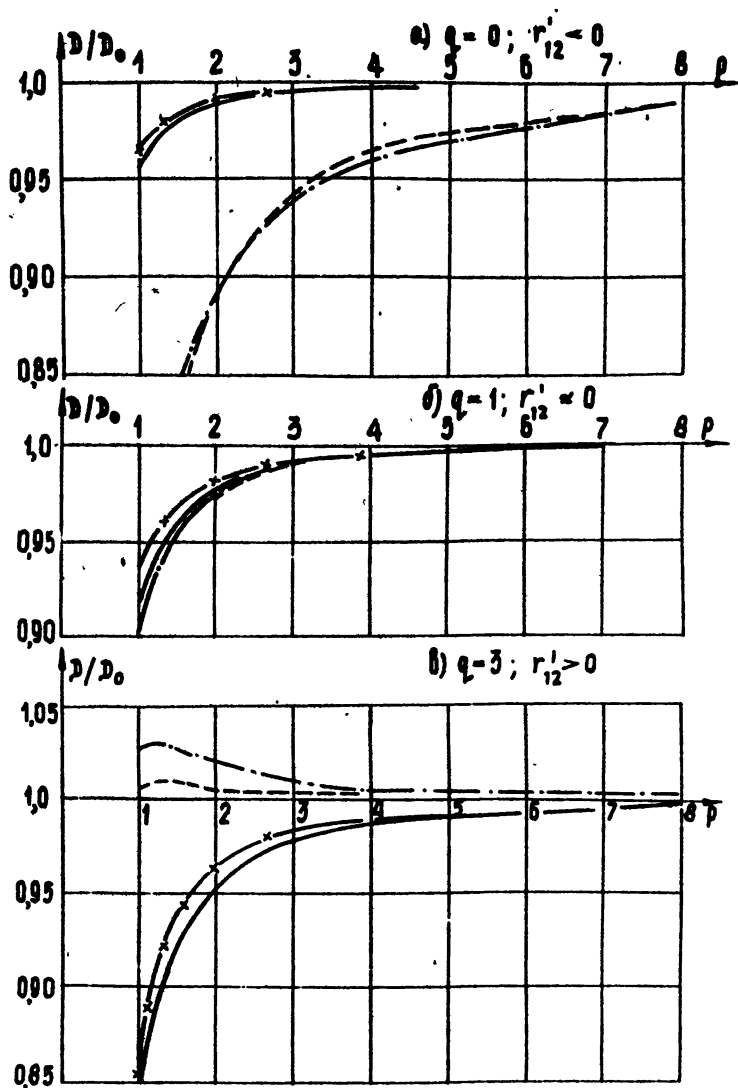


Рис. 10

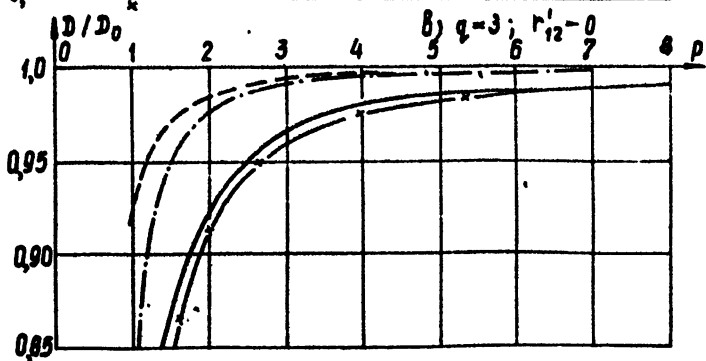
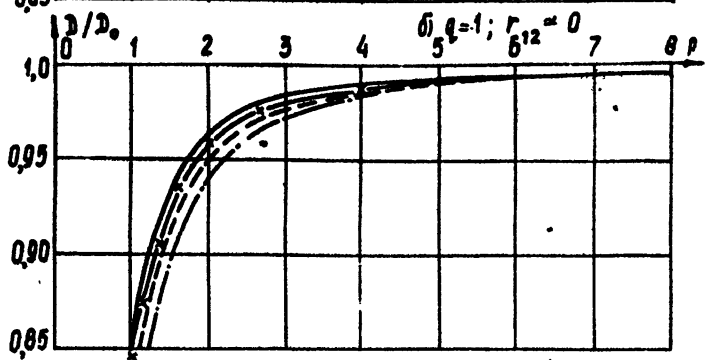
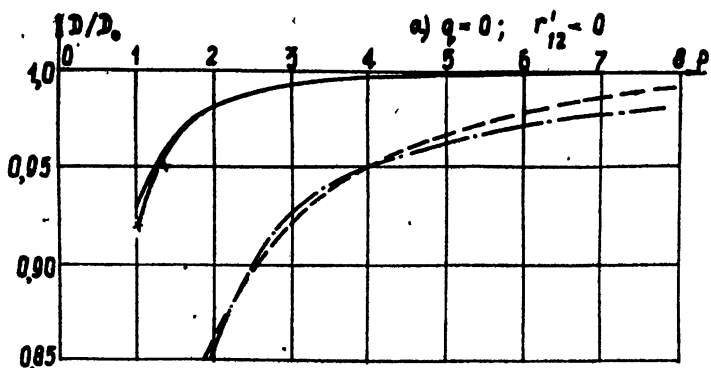


Рис. 9