

Communication présentée à la Conférence d'Erevan
Septembre 1969

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00100546

PROJET DE SYSTEME D'EJECTION LENTE DE
L'ACCELERATEUR DE 70 GeV DE L'IFVE

par

K.P. Myznikov, V.I. Gridasov, O.V. Kurnaev, L.L. Mozhes,
V.M. Tatarenko et Yu.S. Fedotov, Institut de physique
des hautes énergies, Serpukhov, URSS

A.D. Artemov, O.N. Vaulin, O.A. Gusev, N.I. Dojnikov,
I.I. Kovalevskij, K.M. Kozlov, V.M. Kofman, D.P. Megorskij,
N.A. Monoszon, V.P. Nadgornyj, A.V. Popov, B.V. Rozhdestvenskij,
Yu.P. Sivkov, A.S. Simakov, A.P. Sudarushkin, V.A. Titov,
N.A. Fadeev, V.D. Fedorov, Institut d'étude de l'appareillage
électrophysique, D.V. Efremov, Léningrad, URSS.

Traduit au CERN par A. Golovanoff
(original : russe)

(CERN Trans. 70-3)

Genève
février 1970

Le système élaboré est destiné à l'éjection lente d'un faisceau de protons d'une énergie de 20 à 70 GeV auprès de l'accélérateur de l'IFVE. Les fondements physiques du présent projet se trouvent dans la référence / 1 /. L'éjection des protons s'effectue sur le plateau du cycle magnétique, d'une durée maximale de 1,5 s. Le système d'éjection est fondé sur l'utilisation de l'excitation résonante des oscillations bétatroniques radiales. On a tenu compte des conditions réelles de l'accélérateur de l'IFVE dans le choix du type de résonance. La figure 1 représente les courbes calculées et mesurées de la variation de Q_r et Q_z en fonction du rayon / 2 /. Les études ont montré qu'il est préférable d'utiliser la résonance non linéaire de troisième ordre $Q_r = 9^{2/3}$. Ce type de résonance est déjà utilisé avec succès pour certains autres accélérateurs /3/. On a également étudié la possibilité de l'utiliser pour les grands accélérateurs / 4,5 /. En particulier, l'une des possibilités d'utilisation de cette résonance pour l'accélérateur de l'IFVE a été considérée auparavant dans la référence / 6 /.

Le schéma du système d'éjection lente, exposé dans le présent projet, est représenté sur la figure 2. Il prévoit l'utilisation de plusieurs aimants d'extraction à septa d'épaisseurs croissantes, ce qui permet d'augmenter considérablement l'efficacité d'éjection / 5,7 /. Après excitation de la résonance, les particules tombent dans l'entrefer de l'aimant à septum OM 18 . Ce dernier est mobile

et se trouve en position de travail à une distance de 3 cm de l'orbite d'équilibre. Dans l'aimant OM 18, le faisceau subit une petite déflexion d'un angle de 0,27 mrad, nécessaire pour le diriger dans l'entrefer de l'aimant suivant OM 20. Pour une longueur de OM 18 égale à 1,5 m, le champ ne dépasse pas 500 oe, ce qui permet de réduire l'épaisseur du septum à 0,5 mm. A l'aide de l'aimant mobile OM 20, le faisceau est envoyé soit dans l'aimant défecteur fixe OM 22 et extrait suivant la direction D, soit dans l'aimant défecteur fixe OM 28 et extrait dans la direction B. Le schéma d'utilisation des faisceaux extraits dans cette direction est étudié dans la référence / 8 /.

Pour former les conditions de résonance à l'aide de deux paires de lentilles sextupolaires, on crée la 29ème harmonique de non-linéarité quadratique. Les lentilles sont disposées dans l'anneau symétriquement, de façon que la composante continue sur l'orbite soit nulle. Les deux paires de lentilles forment des harmoniques sinusoïdales et cosinusoïdales, ce qui permet de choisir la phase adéquate de perturbation à n'importe quel azimuth de l'accélérateur. La grandeur d^2H/dr^2 atteint dans les sextupôles 180 oe/cm^2 pour une longueur de 1,2 m. Cela permet d'obtenir un pas d'augmentation de l'amplitude de 20-25 mm pour l'envoi du faisceau dans l'aimant OM 18, et l'on obtient ainsi une efficacité d'éjection calculée supérieure à 90 %.

La mise en résonance s'effectue à l'aide d'une lentille quadripolaire disposée dans l'une des sections droites. En faisant varier le gradient dans la lentille, on diminue la valeur du désaccord $\delta = Q_r - \eta^{2/3}$ et les particules de différentes amplitudes des oscillations bétatroniques radiales entrent en résonance.

La durée de l'éjection dépend de la durée de variation du gradient dans la lentille. On prévoit deux régimes : un régime lent d'une durée de 1 seconde, et un régime rapide multitours, dont la durée sera d'environ 1 ms pour une éjection partielle.

L'étude du mouvement des particules dans les conditions de résonance a été effectuée au moyen de calculs numériques sur ordinateur. On a étudié l'influence des non-linéarités du champ magnétique de l'accélérateur au-dessus et au-dessous de la fréquence de résonance. La figure 3 représente la trajectoire des phases sur le plan (r, r') , compte tenu de l'influence de la non-linéarité cubique. L'action de la non-linéarité cubique entraîne une diminution du pas de l'augmentation de l'amplitude, ainsi qu'une déformation des trajectoires de phase. Les trajectoires deviennent fermées, ce qui entraîne une déformation importante du volume des phases du faisceau envoyé dans l'aimant OM 18. Lors de l'approche de la résonance par le bas, cet effet s'amplifie. L'influence des non-linéarités de cinquième ordre sur les trajectoires des phases pour des écarts atteignant 6 cm est beaucoup plus faible.

La compensation de l'influence de la non-linéarité cubique est obtenue au moyen de lentilles octupolaires avec $d^3H/d_r^3 = 125 \text{ oe/cm}^3$, d'une longueur de 1,2 m, placées dans l'une des sections droites. La figure 4 représente les courbes des phases et la forme de la déflexion de 50 particules à différentes amplitudes et phases des oscillations bétatroniques radiales, lors de l'enclenchement de la lentille octupolaire. Il apparaît que la lentille compense pratiquement en totalité l'influence de la non-linéarité cubique. L'émission du faisceau extrait atteint environ 1 mm/mrad .

On a étudié la stabilité du mouvement vertical à la résonance. La présence dans le système d'éjection des lentilles sextupolaires et octupolaires peut entraîner l'apparition de résonances non linéaires d'ordre supérieur. Les plus dangereuses sont les résonances $2 Q_z + Q_r = 29$ et $2 Q_z - Q_r = 10$. La figure 5 représente les bandes de ces résonances, déterminées respectivement par l'amplitude efficace de la 29ème harmonique de la non-linéarité quadratique, et par le déplacement du faisceau dans la lentille octupolaire de 1 cm pour une amplitude des oscillations bétatroniques radiales de 6 cm. Le point de travail de l'accélérateur se trouve au voisinage des lignes de ces résonances. Les lignes des résonances du 4ème ordre $4Q_z = 39$, $3Q_z + Q_r = 39$, $2Q_r + 2Q_z = 39$, s'approchent aussi du point de travail.

Afin d'éviter l'élargissement du faisceau dans le plan vertical lors du développement des oscillations radiales, le point de travail de l'accélérateur doit être déplacé vers une zone libre de résonances. A cet effet, on a prévu, dans tout l'intervalle d'énergies de 20 à 70 GeV, la possibilité de produire la résonance, à partir de $Q_r = 9,7$ et $Q_z = 9,78$. Dans ce cas, au cours du développement de la résonance, le point de travail restera dans la zone de stabilité verticale (ligne AB, figure 5). Le déplacement indispensable du point de travail jusqu'aux valeurs indiquées de Q_r et Q_z peut s'effectuer pour toute valeur de l'énergie à l'aide de la correction du gradient au moyen des enroulements polaires des unités d'aimant.

Ainsi, la lentille quadrupolaire doit assurer un déplacement de la fréquence initiale 9,7 à la fréquence de résonance $9^{2/3}$. Le gradient nécessaire pour une longueur de 0,5 m doit atteindre 1000 œ/cm. Afin d'utiliser plus efficacement le plateau magnétique, le déplacement de la fréquence de 9,7 à 9,672 s'effectue en 100 ms. Le déplacement de la fréquence 9,672 à $9^{2/3}$ s'effectue au cours de la durée totale d'extraction, égale à 1 seconde. Il peut s'accomplir en un temps assez court pour l'extraction rapide multitours.

La vitesse de variation de la fréquence pour l'éjection lente s'établit à une valeur très faible, égale à $5.10^{-3}/s$ pour la durée totale de l'éjection. Ses variations au cours de l'extraction,

par suite des instabilités et des pulsations de courant dans les éléments du système d'extraction, provoquent une modulation de la densité du faisceau extrait.

On donne au Tableau 1 les tolérances pour la stabilité et les pulsations dans les différents éléments du système d'extraction, adoptées pour une modulation du faisceau lors de son extraction totale, inférieure à 10-20 %.

Des conditions sévères sont imposées au plateau magnétique de l'accélérateur. La raison en est la brusque chute de la valeur de Q_r dans la direction radiale, pour un champ intense dans l'accélérateur (figure 1). Il est possible d'assouplir les conditions imposées au plateau par une compensation de la pente de Q_r à l'aide d'un système de corrections de la non-linéarité quadratique du champ magnétique. Pour cela, on utilisera les enroulements de correction polaires. Pour une stabilité du champ sur le plateau de $5 \cdot 10^{-4}$ et une pulsation relative à 50 Hz $\delta H/H = 10^{-5}$, la stabilité du niveau du champ de correction peut être maintenue avec une précision de $\pm 0,2\%$, tandis que l'amplitude relative des pulsations de courant dans les enroulements de correction doit être inférieure à 0,2 %.

Les paramètres fondamentaux des éléments du système d'éjection lente sont donnés au tableau 1. La section de l'aimant à septum OM 20 est représentée sur la figure 6a. L'aimant d'une

longueur de 1,5 m est composé de deux demi-blocs placés sur le même châssis / 9 /. Les conducteurs magnétiques sont composés de plaques isolées par une pellicule en polyamide. L'enroulement de l'aimant OM 20 comporte une seule spire. Il se compose du septum, d'un conducteur creux et des éléments de connexion. Le septum OM 20 est une barre non isolée d'épaisseur 3 mm et de 20 mm de hauteur, comportant neuf canaux longitudinaux de $1 \times 1,9 \text{ mm}^2$, formés de deux plaques de cuivre soudées sous vide. La densité de courant dans le septum atteint 240 A/mm^2 , tandis que la puissance thermique spécifique évacuée par l'eau est de $1,2 \text{ kW/cm}^3$. L'eau de refroidissement entre dans le septum sous une pression de 25 k/cm^2 par l'intermédiaire de tuyaux spiralés qui compensent la dilatation de la barre sous l'effet de l'impulsion de courant. Le conducteur creux est composé de deux tubes de cuivre, isolés par une couche d'oxyde d'alumine appliquée par bombardement de plasma. Le septum et le conducteur creux sont connectés par un paquet de bandes de cuivre souple. Les enroulements des aimants OM 22 et OM 28 comportent deux spires et un septum de 6,5 mm d'épaisseur (figure 6b). Afin de diminuer le champ de fuite des aimants à septum, on prévoit la possibilité de faire varier le courant dans le septum par rapport au courant dans le conducteur creux. On a prévu pour réduire les champs de fuite extérieurs un écran magnétique entourant la zone d'accélération du faisceau. Les conditions d'homogénéité du champ dans l'entrefer des aimants à septum sont très sévères et atteignent $\sim 0,1 \%$. Dans les aimants OM 22 et OM 28, pour améliorer l'homogénéité du champ

aux inductions élevées, on a prévu une correction à l'aide d'orifices dans le conducteur magnétique / 10 /. La figure 7 représente les courbes de distribution du champ dans l'entrefer de l'aimant OM 28 pour une induction de 14 kG, qui illustre l'influence des orifices de compensation. Des calculs ont été effectués suivant la méthode exposée dans les travaux / 11, 12 /. L'aimant à septum OM 18 se trouve à l'état de projet.

La figure 8 représente la section des lentilles utilisées dans le système d'éjection. La lentille à gradient est composée de deux parties. La première partie assure le déplacement de la fréquence de 9,7 à 9,672. La deuxième partie de la lentille est pulsée. Elle permet la mise en résonance rapide et lente. Afin d'améliorer la structure dans le temps du faisceau extrait, on a prévu une possibilité d'introduction dans la lentille pulsée d'une contre-réaction d'après le faisceau et de compensation des pulsations. Les conducteurs magnétiques de toutes les lentilles sont en feuilles fines d'acier électrotechnique. On s'est appuyé sur l'expérience des travaux / 13 / dans la conception des lentilles, qui assure un champ s'écartant peu de la forme fixée dans un large intervalle de variation du courant dans l'enroulement d'excitation. Les enroulements sont constitués de tubes de cuivre refroidis par l'eau, sauf pour la lentille pulsée dont l'enroulement est fait de conducteur HF souple à refroidissement naturel. Tous les éléments électromagnétiques d'éjection sont pourvus de mécanismes de réglage dans l'espace.

L'alimentation pulsée stabilisée des aimants d'éjection est composée d'éléments statiques. Pour les alimentations des aimants à septum, on a adopté un schéma équivalent de redressement à 24 phases à filtre LR. Les autres alimentations sont construites selon un schéma de redressement à 12 phases à filtre LCR, dans les cas où les inductances des aimants sont insuffisantes pour aplanir les pulsations. Pour diminuer les pulsations du courant dans un large intervalle de réglage de l'amplitude de l'impulsion, on prévoit une commutation des enroulements primaires des transformateurs sur 10, 6 et 3 kV. Afin de réduire les composantes subharmoniques des pulsations de tension, les transformateurs de force sont conçus suivant le schéma "étoile - zigzag non-équilibré" et les schémas de commande de la phase sont construits de façon à assurer une asymétrie des impulsions pilotes inférieure à $\pm 0,5^\circ$ el. Les sondes de courants sont, pour la plupart, constituées de transformateurs biphasés à courant continu à toroïde supplémentaire, qui élargit la bande des fréquences passantes jusqu'à 200 kHz.

REFERENCES

1. K.P. Myznikov, Yu.S. Fedotov. Rapport à la Conférence nationale sur les accélérateurs de haute énergie, Moscou, octobre 1968.
2. V.I. Gridasov, K.P. Myznikov. Preprint IFVE 68-60, Serpukhov (traduit au CERN, CERN-Trans. 69-11)
3. A. Turrin, Nuovo Cimento, 8, 511 (1958). U. Bizzari, M. Conte, I.F. Quercice, et A. Turrin. Rapport à la 5ème conférence internationale sur les accélérateurs de haute énergie. Frascati, 1965. J. Kirchgeesner, J.W. Benoit, F.C. Snoomker. Même référence.
4. M.Q. Barton. Même référence.
P. Strolin, CERN internal report ISR/TH/66-40 (1966), CERN/69-9 (1969).
5. A.W. Maschke and K.L. Symon. Rapport à la Conférence nationale sur les accélérateurs de haute énergie, Moscou, octobre 1968.
6. Yu.G. Glebenko, D.G. Koshkarev. PTE, N° 2, 14 (1967).
7. C. Bovet, CERN Internal Report, MPS/DL Int. 65-6 (1965).
8. K.P. Myznikov, Yu. M. Sapunov, V.M. Tatarenko, Yu.S. Fedotov, A.M. Frolov. Preprint IFVE 68-57, Serpukhov (Traduction CERN-Trans. 69-30).

9. H.H. Umstätter, CERN 65-36.
10. Comptes rendus de la conférence internationale sur les Accélérateurs, Dubna, Atomizdat, M. 1964, p. 187.
11. N.I. Doïnikov, A.S. Simakov. Rapport à la conférence nationale sur les accélérateurs de haute énergie, Moscou, octobre 1968.
12. N.I. Doïnikov, S.N. Komarova, A.S. Simakov. Preprint OIYaI, P13-4134, Dubna, 1968.
13. L.N. Vaoulin et coll., PTE, N° 3, 40 (1968).

LEGENDES DES FIGURES

1. Variation des fréquences des oscillations bétatroniques radiales Q_r (courbe 1) et verticales Q_z (courbe 2) en fonction du rayon.
2. Schéma de l'éjection lente des protons de l'accélérateur de l'IFVE.
3. Trajectoires des phases, compte tenu de l'influence de la non-linéarité cubique des unités de l'accélérateur avec :
a) $Q_r = 9,672$; b) $Q_r = 9,667$.
4. Formes de la déflexion des particules vers l'entrefer du OM 18.
1 et 2 - courbes des phases lors de la compensation de la non-linéarité cubique respectivement pour les fréquences 9,672 et 9,667.
5. Grille de travail avec les lignes des résonances voisines apparaissant lors du fonctionnement du système d'éjection lente :
a) $3Q_r = 29$; b) $2Q_z + Q_r = 29$; c) $2Q_z - Q_r = 10$;
d) $4Q_z = 39$; e) $3Q_z + Q_r = 39$; f) $2Q_z + 2Q_r = 39$.
6. Sections des aimants à septum.
7. Distribution du champ dans l'entrefer de OM 28, pour une induction $B_0 = 14$ kG (a) sans orifices de correction, (b) avec orifices de correction.
8. Sections des lentilles.

TABLEAU 1

Paramètres des éléments du système d'éjection lente des protons

N°	Désignation de l'élément	Notation	Longueur m	Ouverture utile cm	Intensité	Stabilité du niveau de champ %	Pulsations sur le plateau en %	Nombre d'éléments
1.	Aimant à septum	OM 13	1,5	3x2	$H = 0,5 \text{ ne}$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	1
2.	Aimant à septum	OM 20	1,5	4x2	$H = 1 \text{ ne}$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	1
3.	Aimant de déflexion	OM 23 OM 22	1,5	2x2	$H = 14 \text{ ne}$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	2
4.	Lentille quadrupôle	2CK50-1000	0,5	20	$\frac{dH}{dr} = 1 \frac{\text{ne}}{\text{cm}}$	$\pm 0,2$	$\pm 0,45/f$	1
5.	Lentille quadrupôle à impulsion	2CK50-250	0,5	20	$\frac{dH}{dr} = 0,21 \frac{\text{ne}}{\text{cm}}$	$\pm 0,2$	$\pm \frac{0,45}{f}$	1
6.	Lentille sextupôle	I5B60	0,6	15	$\frac{d^2H}{dr^2} = 150 \frac{\text{ne}}{\text{cm}^2}$	$\pm 0,3$	$5/f$	3
7.	Lentille octupôle	I5B60	0,6	15	$\frac{d^3H}{dr^3} = 120 \frac{\text{ne}}{\text{cm}^3}$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	2
8.	Système de correction du gradient	-	-	-	130e	$\pm 0,1$	$0,2/f$	
9.	Système de correction de la non-linéarité quadratique	-	-	-	200e	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	

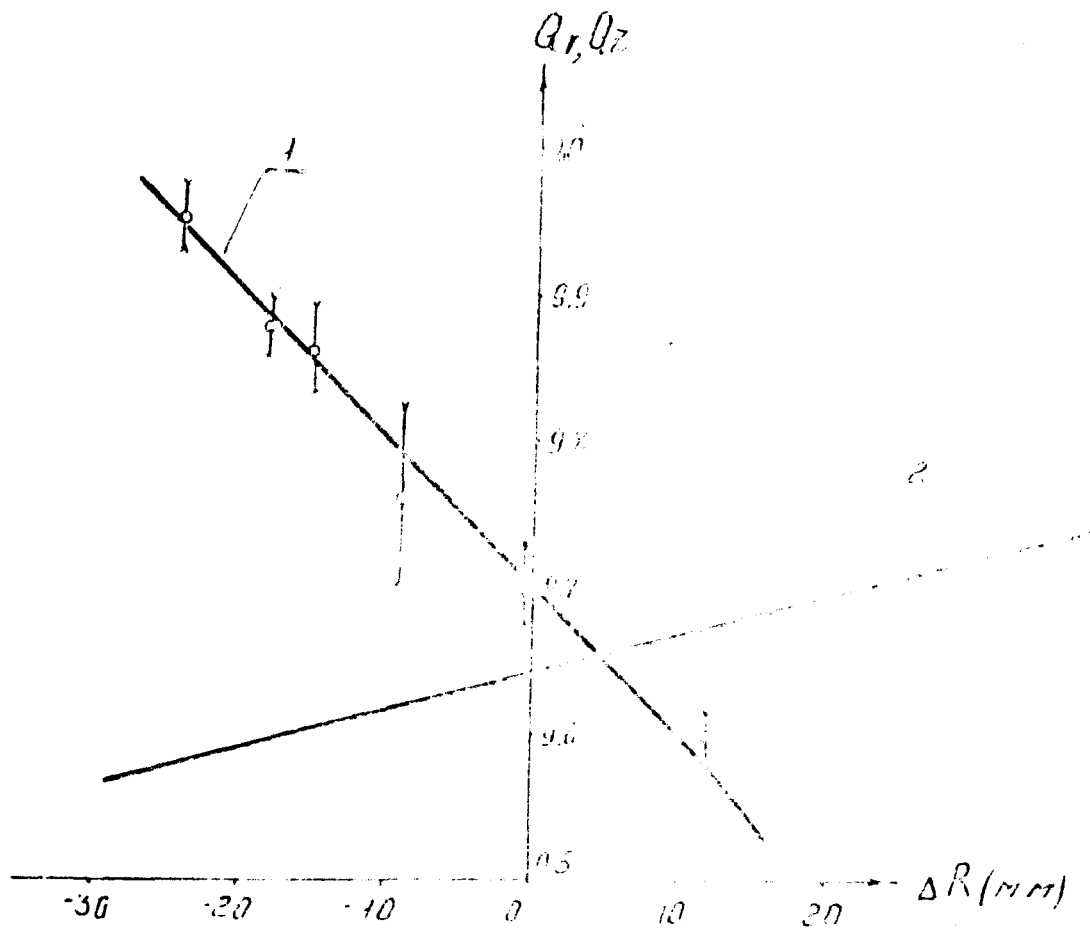


Fig. 1

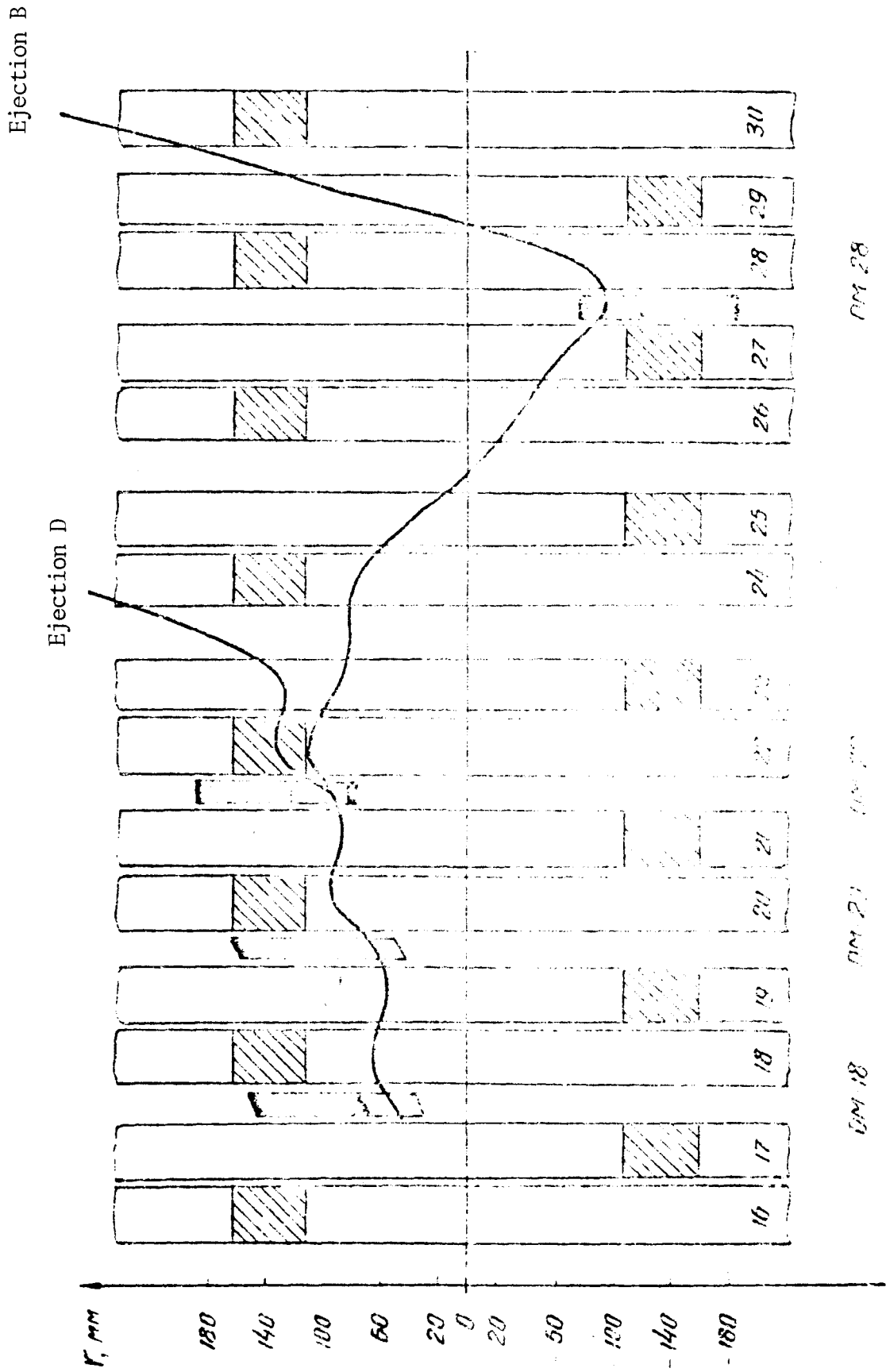


Fig. 2

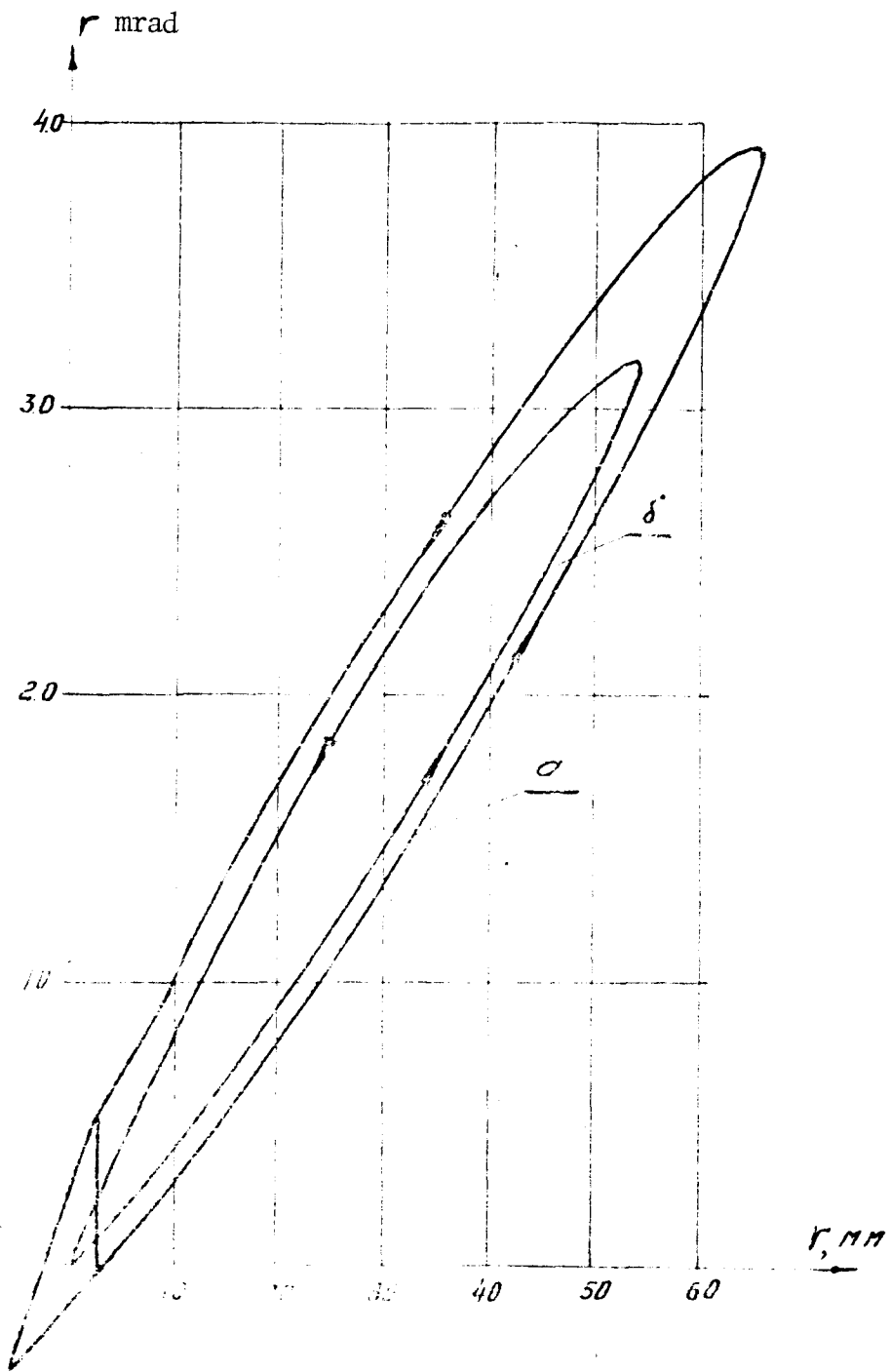


Fig. 3

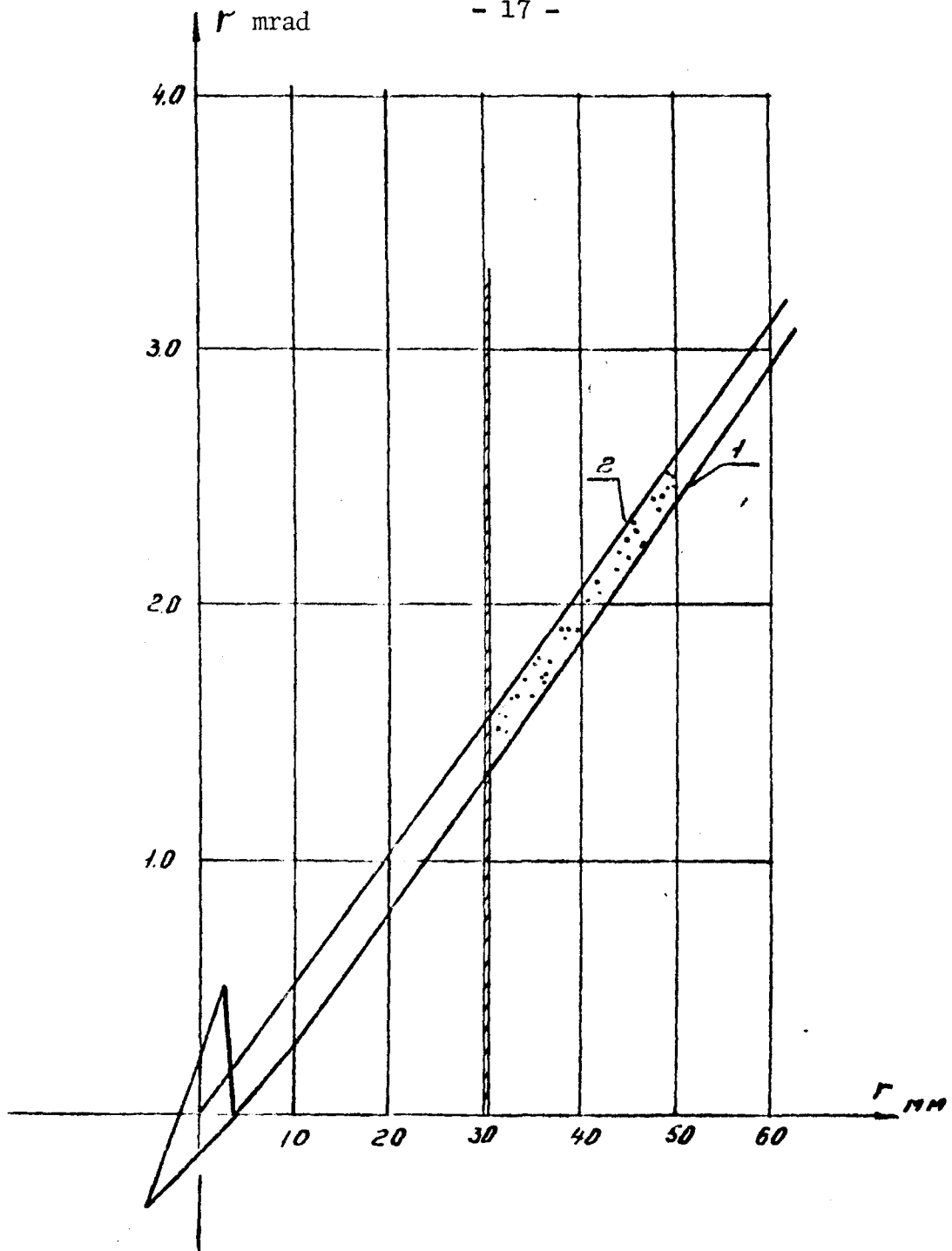


Fig. 4

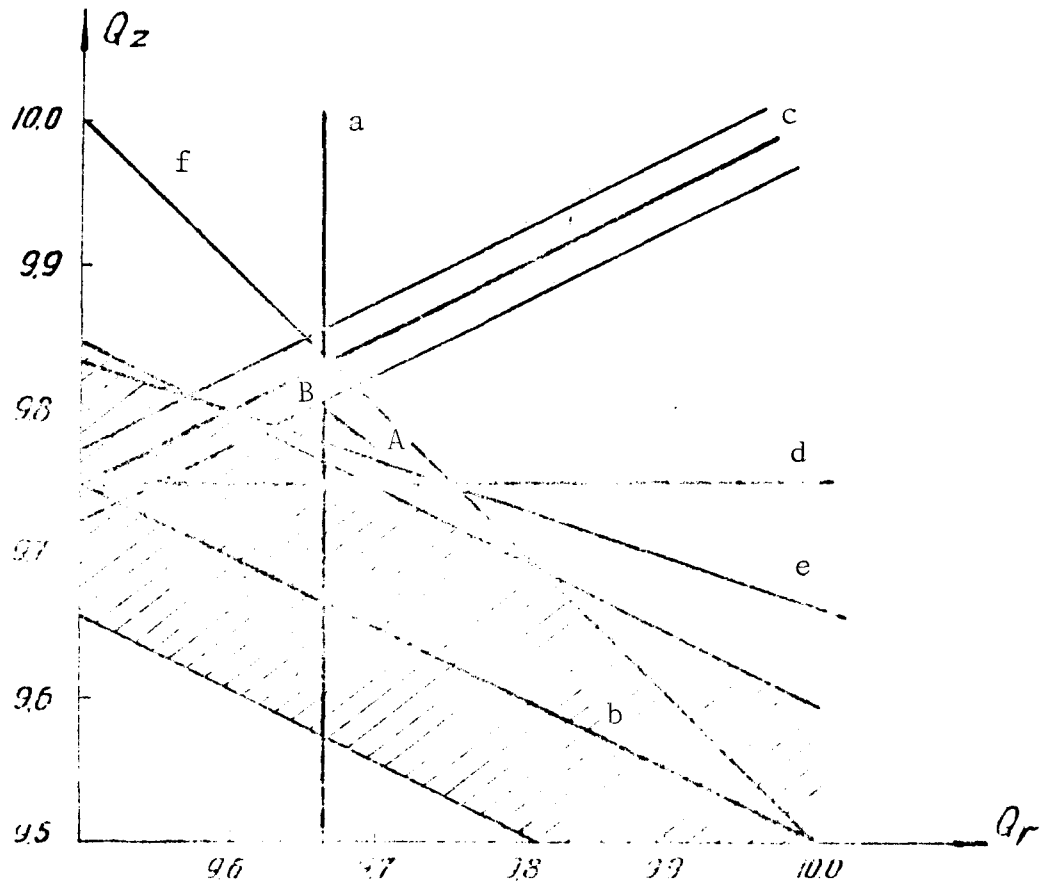
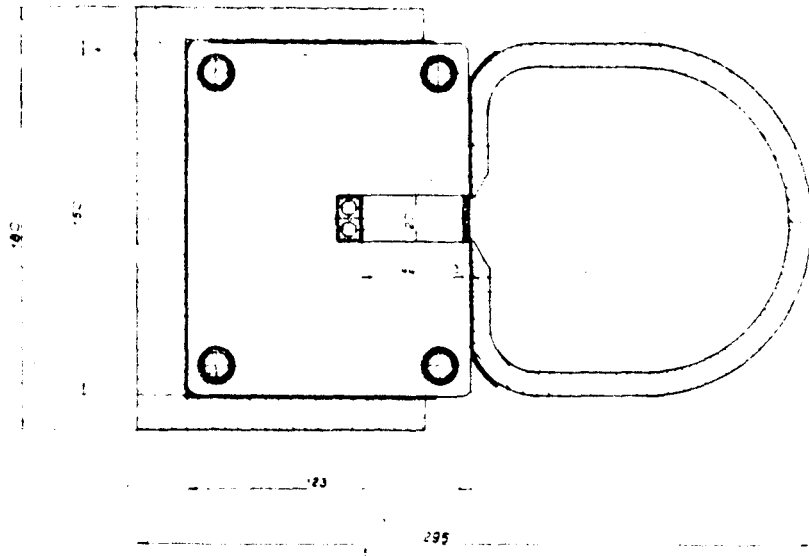
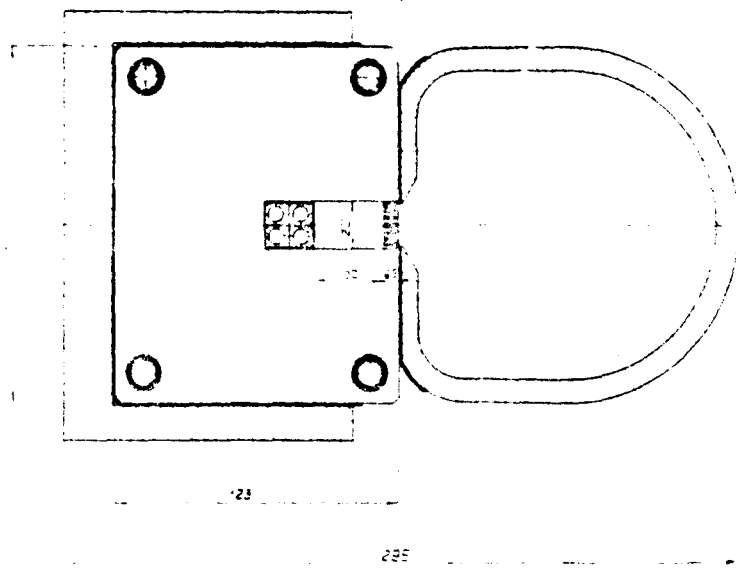


Fig. 5



a) OM-20



b) OM-22 (OM-28)

Fig. 6

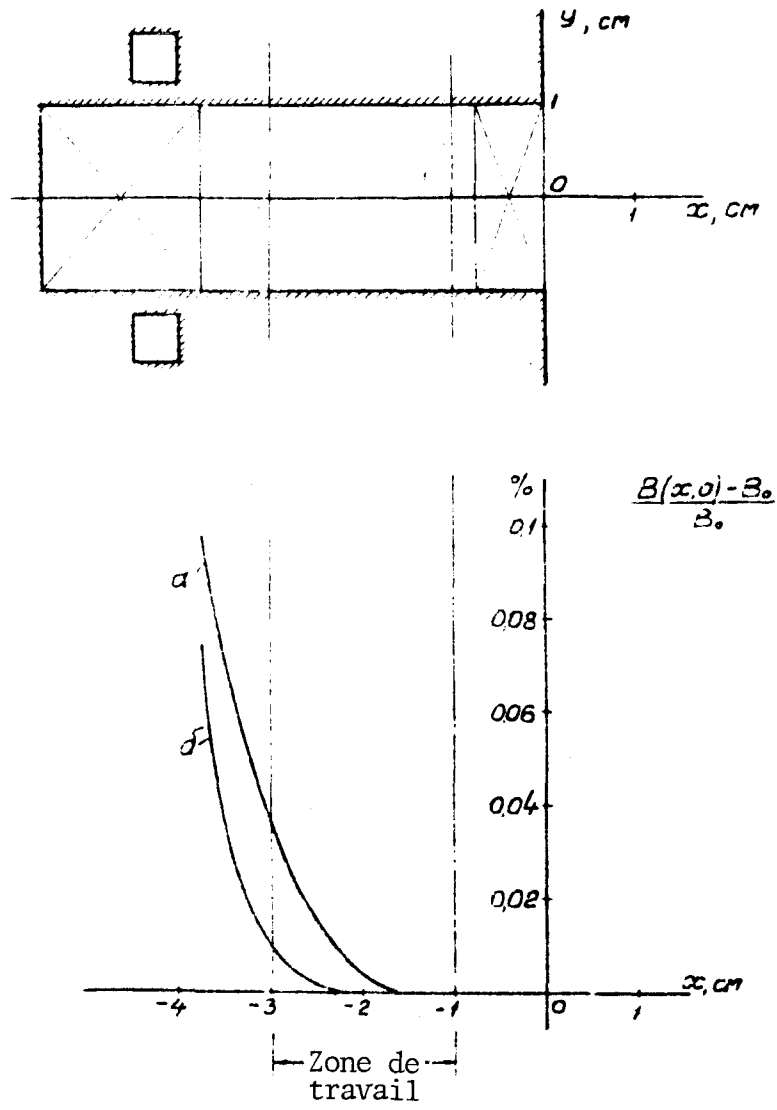
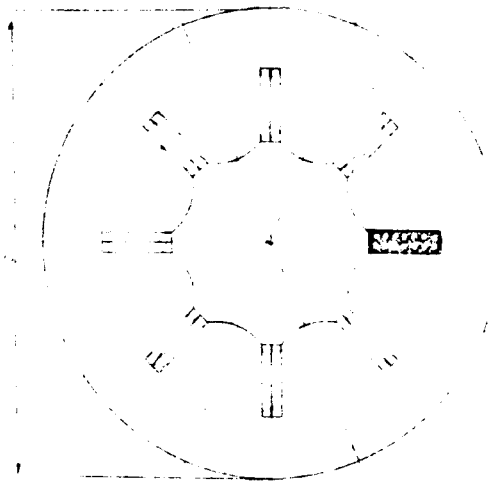
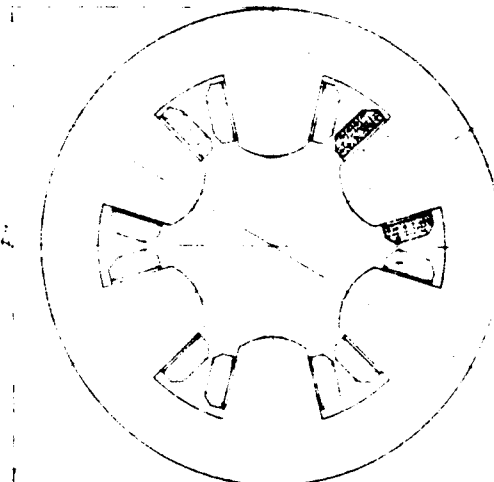


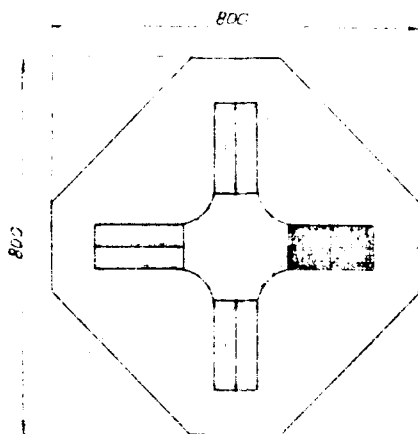
Fig. 7



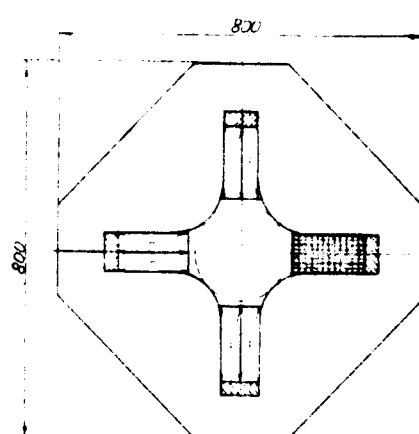
c) 15B6D-125



d) 15W6D-180



e) 20K5D-1000



f) 20K5D-250

Fig. 8 Lentilles électromagnétiques