

CEA CEN-SACLAY
Service de Documentation
Groupe "Traductions"
91191 GIF sur YVETTE CEDEX

FR 8802368

CEA-TR- 2207

R2

Cette traduction est fournie à titre bénévole et strictement réservée à l'usage privé du destinataire pour les besoins de sa documentation. Il ne peut la reproduire, ni la publier sans l'accord de l'auteur. La responsabilité du Commissariat à l'Energie Atomique ne saurait être engagée en cas de non respect des conditions ci-dessus définies.

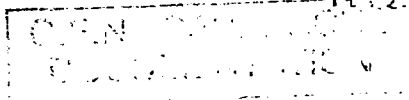
RÉSULTATS DES CALCULS DU MODÈLE TEST
DU RÉACTEUR DE PUISSANCE À NEUTRONS RAPIDES DU TYPE BN-1600

MATVEEV V.I., BOBROV S.B., ZININ A.I., IVANOV A.P.
KOLESOV V.E., SEREGIN A.S.

TRADUCTION DE : 39 pages
TRADUIT DU : russe en janvier 1986
A PARTIR DE : Séminaire franco-soviétique "Physique des réacteurs à neutrons rapides"
Obninsk - janvier 1985

Traducteur : CEN-CADARACHE

N° D'ENREGISTREMENT : 2.734.8

RESULTATS DES CALCULS DU MODELE TEST DU REACTEUR DE PUISSANCEA NEUTRONS RAPIDES DU TYPE BN-1600

V.I. MATBEEV, S.B. BOBROV, A.I. ZININ, A.P. IVANOV, V.E. KOLESOV,
A.S. SEREGIN

Rapport au Séminaire franco-soviétique "Etudes théoriques et expérimentales sur la physique des réacteurs à neutrons rapides", OBNINSK, Janvier 1985, 32 pages, 12 figures, 12 tableaux.

Résumé

Dans le présent Rapport, on communique les résultats des calculs du modèle test d'un réacteur de grande puissance à neutrons rapides, du type BN. Les calculs ont été effectués en géométrie (r, z) à deux dimensions et en géométrie à deux et à trois dimensions avec un réseau hexagonal, en approximation à petit nombre de groupes. On a déterminé les enrichissements "par fertilisation" du combustible, en régime stationnaire de chargements, on a calculé toute une série de caractéristiques physiques correspondant aux états du réacteur avant et après rechargement. On a calculé les variations de la composition isotopique du combustible et de la réactivité au cours du processus de combustion, les efficacités des organes de réglage et la forme du champ de production d'énergie, en disposition projetée et non projetée des barres de compensation du système de commande et de sécurité.

INTRODUCTION

Au Séminaire sur la physique des réacteurs à neutrons rapides, en 1983 à CADARACHE, dans l'un des rapports /1/, on a présenté un modèle à trois dimensions d'un réacteur de grande puissance à neutrons rapides, en géométrie hexagonale, en vue d'effectuer des calculs comparatifs. Ce modèle a été présenté en deux variantes, reflétant les particularités des réacteurs BN-1600 et Super-PHENIX : un modèle avec des compensateurs de combustion au combustible et un modèle avec compensateurs au bore. En même temps que ce modèle à trois dimensions, on a également

présenté, dans le Rapport, un modèle à deux dimensions, en géométrie (r, z) , qui a été obtenu à partir du modèle à trois dimensions, moyennant l'homogénéisation des différentes zones physiques. Une description détaillée du modèle à deux dimensions est également fournie dans le travail /2/.

Dans le présent Rapport, on expose les résultats des études théoriques de ces modèles, concernant les problèmes suivant :

1. Détermination des enrichissements "par fertilisation" et des autres caractéristiques du réacteur, suivant le programme en géométrie (r, z) ;
2. Détermination des caractéristiques principales du réacteur (K_{eff} , coefficients de régénération et champ de production d'énergie), pour le réacteur étudié suivant le programme en géométrie hexagonale à trois dimensions;
3. Calcul de la variation de réactivité en fonction de la combustion du combustible ("Taux" d'épuisement), suivant le programme en géométrie (r, z) à deux dimensions, incluant la première approximation de la théorie des variations;
4. Calcul de l'efficacité des organes de réglage, suivant le programme en géométrie hexagonale à deux dimensions;
5. Calculs des champs de production d'énergie, en disposition des barres de compensation non prévue par le projet, suivant le programme en géométrie hexagonale à deux dimensions.

Toutes les études théoriques ont été effectuées en utilisant le système de constantes BNAB-78 /3/.

Les explications nécessaires concernant les particularités de résolution des problèmes énumérés plus haut sont fournies dans le Rapport, lors de l'exposé des résultats des calculs.

Résultats des calculs

1. CALCULS DES ENRICHISSEMENTS "PAR FERTILISATION" ET DES AUTRES CARACTÉRISTIQUES DU REACTEUR EN RÉGIME STATIONNAIRE DE CHARGE ENTS

Pour déterminer les enrichissements "par fertilisation", on a utilisé un complexe spécial de programmes, RER-FO /4, 5/.

Ce complexe, dans lequel, en qualité de programme de base, on utilise un programme à 26 groupes pour le calcul du réacteur en approximation de diffusion, en géométrie (r, z) , est destiné à l'optimisation des caractéristiques physiques du réacteur de puissance à neutrons rapides; en particulier, ce complexe permet de déterminer les enrichissements "par fertilisation" pour un réacteur avec restitution du profil du champ de production d'énergie, en utilisant des zones d'enrichissements différents, en régime stationnaire de chargements, pour deux états de la zone active : avant et après rechargement. Cela fait, le calcul des caractéristiques du réacteur, pendant le déroulement d'une campagne, en tenant compte de la combustion et des rechargements, s'effectue moyennant l'hypothèse approchée d'une relation linéaire entre les vitesses, moyennées par zones, des réactions et le temps, durant la période comprise entre les rechargements. Les enrichissements "par fertilisation" sont déterminés à partir de la résolution du problème d'optimisation ci-après :

relations (1)**

ou

- q = densité de production d'énergie ;
 x = enrichissement "par fertilisation" ;
 N = puissance du réacteur ;
 $\phi(t)$ = fraction du volume des groupes compensateurs se trouvant à l'instant t dans la zone active du réacteur ;
 $t=0, t=\tau$, respectivement début et fin du cycle.

Dans ces conditions, comme on peut facilement le voir, il est assuré une égalisation du champ de production d'énergie.

Lors de l'exécution des calculs suivant ce complexe, la première file de l'écran latéral est subdivisée en sous-sections indépendantes, d'épaisseur 13,6 cm. En outre, pour le modèle avec système de compensation au bore, la zone de faible enrichissement a été subdivisée complémentirement en deux zones élémentaires, dont la zone extérieure contenait 156 cellules (132 cartouches de combustible, 16 barres de compensation au bore, 6 "gaines").

$$\left. \begin{array}{l}
 \min h, \\
 h \geq q(t, \vec{z}, x), \quad t=0, t=\tau, \\
 K_{eff}(t) = 1 \\
 \int_V q(t, \vec{z}, x) dV = N, \\
 \beta(0) + \beta(\tau) = 1,
 \end{array} \right\} **$$

Les résultats de ces calculs sont les suivants :

- la valeur des enrichissements "par fertilisation" du combustible, pour les zones de faible enrichissement (ZFE) et les zones de grand enrichissement (ZGE) (concentrations nucléaires des isotopes fissiles), déterminée par :

$$X_{Pu} = \frac{\rho_{Pu}}{\rho_{Pu} + \rho_U} ,$$

où ρ = concentration nucléaire des substances correspondantes ;

- la position des barres du système de compensation (SC) correspondant à la situation critique du réacteur dans l'état "avant rechargement" ;

- les caractéristiques physiques principales du réacteur (K_{eff} , distribution du champ de production d'énergie, coefficients de reproduction), pour deux états de la zone active (avant et après rechargement).

Les modèles de calcul en géométrie (r, z) à deux dimensions, qui ont été utilisés dans ces études, sont présentés sur la figure 1. Les concentrations nucléaires des substances entrant dans la composition des différentes zones du réacteur, dans les états avant et après rechargement, sont présentées dans les tableaux 1 et 2. Les résultats des calculs suivant le complexe RBR-80 sont exposés sur la figure 2 et dans les tableaux 3,4,5, 6 et 7.

2. CALCULS DES CARACTERISTIQUES DU REACTEUR EN GEOMETRIE HEXAGONALE A TROIS DIMENSIONS

Les résultats du calcul des concentrations critiques, obtenus suivant le complexe RBR-80, ont été utilisés ci-dessous, lors de l'exécution des calculs en géométrie hexagonale à trois dimensions, suivant le complexe de programmes TRIGEX. Ce complexe permet de calculer les caractéristiques du réacteur dans une géométrie qui est la plus proche de la réalité, à savoir de calculer le réacteur avec un découpage en compartiments, dans une approximation de diffusion à petit nombre de groupes (jusqu'à 6 groupes d'énergies). Pour obtenir un système d'équations algébriques linéaires, on utilise la méthode des différences finies .

Les noeuds du réseau sont disposés dans les centres de gravité des prismes hexagonaux. Pour réduire l'erreur due à un réseau spatial à larges mailles, on effectue la résolution des problèmes annexes d'ordre faible sur un réseau fin. Cela permet de corriger les coefficients du système d'équations algébriques linéaires de telle façon que la précision de la solution obtenue soit du même ordre de grandeur que la précision obtenue en recourant à la méthode habituelle des différences finies, avec trois noeuds et plus (jusqu'à six) dans le plan horizontal pour chaque prisme hexagonal. Cette méthode est exposée plus en détails dans le travail /6/. Le complexe TRIGEX inclut un bloc de préparation des constantes pour un petit nombre de groupes, sur la base d'un calcul simplifié (à 26 groupes), du réacteur, en géométrie hexagonale à trois dimensions /7/.

Comme résultat des calculs effectués, on a obtenu :

- le coefficient efficace de multiplication des neutrons (K_{eff}) dans les états avant et après rechargement du réacteur, - la position du système de barres de compensation à l'état "après rechargement" étant obtenue à partir de calculs suivant le complexe RBR-80 ;

- le coefficient de régénération, qui est déterminé par :

$$\text{équation (3) } \beta_{eff} = \frac{\sum_{i,j} \gamma_i (N_c^{i-1} - N_{cf}^i)}{(N_f)_p}$$

ou N_c^i et N_f^i sont respectivement les nombres de captures et de fissions de l'isotope i dans la zone j , dans le réacteur (ρ);

- les coefficients pondérés de réactivité pour l'isotope i :

$$\text{équation (4) } \gamma_i = \frac{(\bar{\nu}G_f - \bar{\sigma}_f)j - (\bar{\nu}G_f - \bar{\sigma}_{cf})j}{(\bar{\nu}G_f - \bar{\sigma}_{cf})j - (\bar{\nu}G_f - \bar{\sigma}_f)j}$$

- la distribution du champ de production d'énergie et les coefficients d'hétérogénéité, - les coefficients radiaux K_r étant établis pour le plan central, pour le plan central, pour deux cas : sur la section d'une cartouche de combustible et sur la section de toutes les cellules de la zone active (incluant les cellules du système de commande et de sécurité) -, tandis que le coefficient axial d'hétérogénéité, K_z , est déterminé pour la cartouche de combustible centrale, sur la hauteur de la zone active.

Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux 5, 6 et 8 et sur les figures 3, 4, 5 et 6. A des fins de comparaison, dans les tableaux 5 et 6, on a indiqué les caractéristiques correspondantes obtenues suivant le complexe RBR-80, tandis que, dans le tableau 7, à titre d'exemple, on a porté les valeurs des coefficients massiques de réactivité pour la zone active (complexe RBR-80).

3. CALCULS DE LA VARIATION DE REACTIVITE DU REACTEUR EN FONCTION DE LA COMBUSTION DU COMBUSTIBLE ("TAUX" D'EPUISEMENT)

La variation de la réactivité du réacteur au cours du processus de combustion du combustible a été calculée suivant les complexes de programmes TVK-2D /8/ et KRAB-1 /9/. Le complexe de programmes TVK-2D permet de calculer le réacteur en géométrie (r, z) à deux dimensions, dans l'approximation à grand nombre de groupes. Les effets de réactivité sont déterminés à l'aide de la première approximation de la théorie des variations. Lors du calcul de la variation de la réactivité en fonction de la combustion du combustible, dans le cadre de la théorie des variations, on prend en considération l'hétérogénéité volumique de la combustion et de l'accumulation des différents isotopes. Le complexe de programmes KRAB-1 permet d'effectuer les calculs homologues dans la géométrie à une dimension (cylindrique), dans l'approximation à grand nombre de groupes.

Dans le tableau 9, on présente les valeurs du taux d'épuisement après 30 jours pleins effectifs de travail du réacteur, calculées suivant les complexes de programmes mentionnés plus haut.

Dans le tableau 10, on présente les composantes du taux d'épuisement suivant différents processus, déterminées à partir du calcul à une dimension.

Les contributions au taux d'épuisement fournies par les différentes zones du réacteur figurent dans le tableau 11.

Tous les calculs ont été effectués pour l'état du réacteur "après chargement".

4. EFFICACITE DES BARRES DE REGLAGE

L'efficacité des barres de réglage a été calculée suivant le programme à deux dimensions, en géométrie hexagonale (programme ALBAR) /10/, en approximation à quatre groupes. Les constantes à quatre groupes ont été obtenues au moyen d'un package de calculs à 26 groupes, en approximation de diffusion du modèle de réacteur en géométrie (r, z). A partir de ces mêmes calculs, on a obtenu les laplaciens axiaux, qui étaient nécessaires lors de l'exécution des calculs en géométrie hexagonale à deux dimensions.

Les résultats des calculs de l'efficacité des barres de réglage, pour l'état du réacteur "après chargement", sont présentés dans le tableau 12.

5. CALCULS DES CHAMPS DE PRODUCTION D'ENERGIE AVEC UNE POSITION DES BARRES DE COMPENSATION NON PREVUE PAR LE PROJET

Les calculs des champs de production d'énergie, en cas de position, non prévue par le projet, des barres de compensation, ont été effectués suivant le programme en géométrie hexagonale à deux dimensions, ALBAR /10/, en approximation à quatre groupes, pour l'état du réacteur "après chargement".

Sur les figures 3,5,7,10, on a représenté les champs de production d'énergie, dans les modèles à deux et trois dimensions, pour l'état du réacteur "après chargement". Les résultats représentés sur ces figures permettent de comparer les valeurs absolues de production d'énergie obtenues à partir des calculs, pour les modèles à deux et trois dimensions, en géométrie hexagonale. Notons que, lors d'une telle comparaison, les valeurs absolues de production d'énergie en géométrie à deux dimensions doivent être multipliées par le coefficient correctif 0,95 (en raison de diverses normalisations lors des calculs).

Sur les figures 7,8,9,10,11 et 12, on a représenté les champs de production d'énergie obtenus suivant le programme ALBAR, en géométrie hexagonale à deux dimensions, pour une position non prévue par le projet pour les barres de compensation, dans deux cas :

- Une barre de compensation de la couronne intérieure du système de barres de compensation est levée à la position haute extrême ;

- trois barres de compensation sont levées à la position haute extrême , - l'une appartenant à la couronne intérieure du système de barres de compensation et les deux autres à la couronne extérieure.

Sur la figure 1 (cf. /1/), ces barres de compensation sont représentées par des points.

Les calculs ont été exécutés aussi bien dans le cas des barres de compensation à combustible que pour les barres au bore.

BIBLIOGRAPHIE

1. S.B. BOBROV, V.I. MATVEEV. Modèle-test d'un réacteur de grande puissance à neutrons rapides, en géométrie hexagonale. Rapport au Séminaire franco-soviétique : "Etudes théoriques et expérimentales sur la physique des réacteurs à neutrons rapides", CADARACHE, 1983.
2. Modèle de calcul pour l'étude des caractéristiques physiques du réacteur. Documentation de travail pour l'exécution de travaux en collaboration avec le CEA, en France, transmise par les spécialistes soviétiques à l'époque du Séminaire franco-soviétique en 1982 à OBNINSK.
3. L.P. ABAGYAN, M.O. BAZAZYANTS, L.N. NIKOLAEV, A. . TSIBULYA. Constantes de groupes pour le calcul et la sécurité des réacteurs. Moscou, Energoizdat, 1981.
4. S.B. BOBROV, A.I. VOROPAEV, A.I. ZININ, V.E. KOLESOV, V.I. MATVEEV, I.P. SUSLOV. Calcul des caractéristiques d'un réacteur de puissance à neutrons rapides, en régime permanent de chargements. Rapport au Séminaire franco-soviétique : "Etudes théoriques et expérimentales sur la physique des réacteurs à neutrons rapides", OBNINSK, 1982.
5. S.B. BOBROV, A.I. ZININ, V.E. KOLESOV, V.I. MATVEEV, I.P. SUSLOV. Calcul du modèle d'un réacteur de puissance à neutrons rapides, en géométrie (r, z) à deux dimensions. Rapport au Séminaire franco-soviétique : "Etudes théoriques et expérimentales sur la physique des réacteurs à neutrons rapides", CADARACHE, 1983.
6. A.S. SEREGIN. Méthode destinée à accroître la précision de résolution du problème (à petit nombre de groupes) de diffusion sur un réseau à mailles larges, en géométrie hexagonale à trois dimensions. Preprint FEI-1521, OBNINSK, 1984.
7. V.A. PIVOVAROV, A.S. SEREGIN. Préparation des constantes à petit nombre de groupes, pour le calcul des réacteurs en géométrie hexagonale à trois dimensions. Preprint FEI-1517, OBNINSK, 1984.

8. P.N. ALEKSEEV, S.M. ZARITSKIJ, L.N. USACHEV, L.K. CHISAKOV.
Complexe de programmes TVK-2D. Dans le recueil : "Questions de science et de technique atomiques". Série "Physique et technique des réacteurs nucléaires", fascicule 4 (33), 1983.
9. M.M. SAVOS'KIN, T.B. MOROZOVA, E.I. NOVIKOVSKAYA et coll.
Résumé du complexe de programmes KRAB-1. Dans le recueil : "Questions de science et de technique atomiques". Série "Physique et technique des réacteurs nucléaires", fascicule 5 (43), 1984.
10. A.S. SEREGIN. Résumé du programme ALBAR pour le calcul (de physique neutronique à petit nombre de groupes) d'un réacteur en géométrie hexagonale à deux dimensions. Dans le recueil : "Questions de science et de technique atomiques". Série "Physique et technique des réacteurs nucléaires", fascicule 4 (33), 1983.
-

LEGENDES DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.

Modèles théoriques en géométrie (r, z) à deux dimensions (complexe RER-EO). Toutes les dimensions sont portées en cm.

a) barres de compensation à combustible; b) barres de compensation au bore.

1) appui arrière; 2) écran latéral; 3) appui latéral; 4) écran thermique vers la ZFE; 5) écran thermique vers la ZGE; 6) ZFE; 7) ZGE; 8) ZRE avec barres de compensation.

Figure 2.

Distribution du champ de dégagement de chaleur suivant le rayon de la zone active.

a) densité de dégagement de chaleur (W/cm^3); b) distance au centre (cm); c) barres de compensation à combustible; 1)3) état "après chargement"; 2),4) état avant chargement; d) barres de compensation au bore.

Figure 3.

Complexe TRIGEX. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où les parties absorbantes des compensateurs à combustible sont entièrement introduites dans la zone active ("après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 4.

Complexe TRIGEX. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans l'état "avant chargement" (les parties absorbantes des compensateurs à combustible sont partiellement retirées de la zone active).

Lignes impaires : numéros des zones physiques

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 5.

Complexe TRIGEX. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où les compensateurs au bore sont complètement introduits dans la zone active ("après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 6.

Complexe TRIGEX. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans l'état "avant chargement" (les compensateurs au bore sont partiellement retirés de la zone active).

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 7.

Programme ALBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où les parties absorbantes des compensateurs à combustible sont entièrement introduites dans la zone active ("après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 8.

Programme ALBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où une barre de compensation à combustible est retirée de la couronne intérieure (pour l'état du réacteur "après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 9.

Programme AMBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où trois barres de compensation de combustible sont retirées : l'une de la couronne intérieure et les deux autres de la couronne extérieure (pour l'état du réacteur "après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 10.

Programme AMBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) de dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où les compensateurs au bore sont complètement introduits dans la zone active ("après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 11. Programme AMBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où une barre de compensation au bore est retiré de la couronne interne (pour l'état du réacteur "après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Figure 12.

Programme AMBAR. Valeurs moyennes (sur les cellules) des dégagements d'énergie spécifiques (W/cm^3) dans le plan central du réacteur, dans le cas où trois barres de compensation au bore sont retirées : l'une de la couronne intérieure et les deux autres de la couronne extérieure (pour l'état du réacteur "après chargement").

Lignes impaires : numéros des zones physiques.

Lignes paires : dégagements d'énergie.

Ordre du calcul : depuis le haut.

Tableau 1.

Concentrations nucléaires homogènes (noyaux/cm³ · 10²⁰) dans les zones du réacteur, quand on utilise des barres de compensation à combustible (la numérotation des zones correspond à la figure 1 a).

a) "après chargement"; b) "avant rechargement"; c) numéro de zone; d) uranium; e) plutonium; f) fragments de Pu²³⁹; g) oxygène; n) sodium; i) fer; j) nickel; k) chrome; l) molybdène.

Tableau 2.

Concentrations nucléaires homogènes (noyaux/cm³ · 10²⁰) dans les zones du réacteur, quand on utilise des barres de compensation au bore (la numérotation des zones correspond à la figure 1 b).

a) "après rechargement"; b) avant rechargement"; c) numéro de zone; d) uranium; e) plutonium; f) fragments de Pu²³⁹; g) oxygène; n) sodium; i) fer; j) nickel; k) chrome; l) molybdène; m) bore; n) carbone.

Les concentrations nucléaires des appuis arrière et latéral (zones 3 et 12) correspondent à celles des zones 3 et 10 (cf. tableau 1).

Tableau 3.

Enrichissement du combustible "sous alimentation" suivant les zones (en %).

a) enrichissement; b) barres de compensation à combustible; c) barres de compensation au bore; d) X_{ZFE} ; e) X_{ZGE} ; f) X_{ZGE}/X_{ZFE} .

Tableau 4.

Position haute extrême du système de barres de compensation dans l'état "avant rechargement" (Z_0 = distance au bord inférieur de la zone active, en cm).

a) coordonnées des limites; b) limite entre les zones de combustible et d'absorbant (dans le cas de barres de compensation à combustible); c) limite entre la zone absorbante et le sodium (dans le cas de barres de compensation au bore); d) Z_0 (cm).

Tableau 5.

Valeurs de K_{eff} dans les états "après chargement" ($t = 0$) et "avant rechargement" ($t = 150$ jours pleins), d'après les complexes de calcul RBR-80 et TRIGEX.

a) barres de compensation à combustible; b) barres de compensation au bore; c) état du réacteur; d) "après chargement" ($t = 0$); e) "avant rechargement" ($t = 150$ jours pleins); f) RBR-fC.

Tableau 6.

Coefficient de reproduction (BG).

a) complexe TRIGEX; b) complexe RBR-fC; c) zone; d) barres de compensation à combustible; e) barres de compensation au bore; f) zone active; g) zone de reproduction; h) réacteur.

Tableau 7.

Coefficients massiques de réactivité (complexe RBR-fC).

a) type de barre de compensation, état du réacteur, zone; b) barres de compensation à combustible; c) barres de compensation au bore; d) "après chargement"; e) "avant rechargement"; f) ZRE; g) ZRE; h) ZRE avec barres de compensation.

Tableau 8.

Coefficients d'hétérogénéité du champ de production d'énergie dans la zone active (complexe TRIGEX).

a) barres de compensation à combustible; b) barres de compensation au bore; c) état du réacteur; d) "après chargement"; e) "avant rechargement"; f) K_p (cartouches de combustible de la zone active); g) K_p (cartouches de combustible + cellules du système de commande et de sécurité dans la zone active); h) K_3 suivant la hauteur de la zone active, pour les cartouches de combustible centrales.

Tableau 9.

"Rythme" de combustion dans le réacteur ($\Delta K/K/30$ jours pleins effectifs).

a) complexe de programmes; b) compensateurs à combustible; c) compensateurs au bore; d) KRAE-1 : géométrie à 1 dimension, théorie des variations; f) "VK-2D : géométric à 2 dimensions, calcul direct; *) calculé compte tenu de la désintégration du plutonium 241, de la formation d'américium 241 et de l'effet du neptunium.

Tableau 10.

Contribution de différents isotopes au "rythme" de combustion dans le réacteur (normalisation sur 1); calcul en géométrie à une dimension.

a) barres de compensation à combustible; b) barres de compensation au bore; c) numéro de zone; d) épaisseur de zone (cm); e) uranium; f) plutonium; g) fragments de fission; n) ZFE; i) ZGE; j) écran latéral; k) ZFE avec barres de compensation; *) la numérotation des zones correspond : dans le cas des barres de compensation à combustible, à la figure 1 a; dans le cas des barres de compensation au bore, à la figure 1 b.

Tableau 11.

Contribution des différentes zones du réacteur au "rythme" de combustion (en %).

a) barres de compensation à combustible; b) barres de compensation au bore; c) numéro de zone; d) zone; e) valeur; f) ZFE; g) ZGE; n) écrans latéraux; i) écran latéral; j) écran thermique vers ZFE; k) écran thermique vers ZGE; l) écran latéral, zone arrière; m) ZFE avec barres de compensation; *) la numérotation des zones correspond : dans le cas des barres de compensation à combustible, à la figure 1 a; dans le cas des barres de compensation au bore, à la figure 1 b.

Tableau 12.

Efficacité des barres de régulation (ρ / K/K).

a) barres du système de commande et de sécurité; b) barres de compensation à combustible (22 barres); c) barres de compensation au bore (18 barres); d) système de barres de compensation; e) barre de compensation (de la couronne intérieure), marquée par un point /1/; f) 3 barres de compensation, marquées par des points /1/; g) 1 barre de pilotage automatique; h) 2 barres de pilotage automatique; i) 7 barres du système de protection contre les pannes AZ, AZ-TK (une centrale et 6 barres de la couronne interne du système de protection contre les pannes AZ, AZ-TK; j) 6 barres AZ, AZ-TK (couronne périphérique du système AZ, AZ-TK; k) efficacité totale du système AZ, AZ-TK (13 barres); l) efficacité totale des 6 barres périphériques du système AZ, AZ-TK et des deux barres de pilotage automatique; m) efficacité totale du système AZ, AZ-TK (13 barres) et des deux barres de pilotage automatique.

Номер зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уран-238	70,71	80,41	-	67,94	94,87	129,4	130,6	129,2	130,5	-
Плутоний-239	7,041	0,6538	-	8,853	0,4931	1,351	0,3744	1,601	0,4549	-
Плутоний-240	3,426	0,0141	-	4,338	0,0063	0,0278	0,0026	0,044	0,0040	-
Плутоний-241	1,341	0,0002	-	1,773	-	0,0004	-	-	-	-
Плутоний-242	0,5817	-	-	0,7364	-	-	-	-	-	-
Оск.Рн-239	1,805	0,0550	-	1,658	0,0348	0,1717	0,0154	0,1403	0,0138	-
Кислород	146,1	162,3	-	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0	-
Натрий	76,15	81,48	121,0	72,60	72,60	39,60	39,60	39,60	39,60	44,0
Железо	133,6	139,0	253,4	123,9	123,9	112,6	112,6	112,6	112,6	450,0
Никель	28,94	30,12	54,90	26,84	26,84	24,40	24,40	24,40	24,40	97,6
Хром	34,87	36,30	66,15	32,34	32,34	29,40	29,40	29,40	29,40	117,6
Молибден	3,537	3,644	6,75	3,30	3,30	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0

"перед перегрузкой"

Уран-238	65,10	79,70	-	66,54	94,33	128,4	130,3	128,9	130,4	-
Плутоний-239	7,384	1,272	-	8,771	0,9696	2,202	0,620	1,878	0,5364	-
Плутоний-240	3,637	0,0383	-	4,371	0,0174	0,0583	0,0056	0,056	0,0052	-
Плутоний-241	1,230	-	-	1,580	0,0002	0,0010	-	-	-	-
Плутоний-242	0,6223	-	-	0,7512	-	-	-	-	-	-
Оск.Рн-239	3,528	0,1304	-	3,285	0,0793	0,3169	0,0279	0,1739	0,0169	-
Кислород	152,8	162,3	-	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0	-

TABLEAU 1

Номер зоны	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11
Уран-238	62,79	87,39	58,21	80,28	65,75	94,85	129,1	130,5	128,7	130,4
Плутоний-239	7,76	0,6099	7,136	0,4131	9,824	0,5036	1,654	0,4568	2,037	0,5822
Плутоний-240	3,786	0,0107	3,468	0,0048	4,895	0,0063	0,0412	0,0038	0,0704	0,0065
Плутоний-241	1,501	0,0001	1,415	-	1,993	-	0,0007	-	0,0015	-
Плутоний-242	0,6432	-	0,5886	-	0,8336	-	-	-	-	-
Оск. Рн-239	1,846	0,0486	1,341	0,0289	2,003	0,0382	0,2482	0,0214	0,2261	0,0215
Кислород	156,7	176,1	144,4	161,4	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0
Натрий	77,26	77,17	75,39	78,56	72,60	72,60	39,60	39,60	39,60	39,60
Железо	132,7	131,7	136,2	137,9	123,9	123,9	112,6	112,6	112,6	112,6
Никель	28,74	28,53	29,51	29,86	26,84	26,84	24,40	24,40	24,40	24,40
Хром	34,63	34,37	35,57	35,99	32,34	32,34	29,40	29,40	29,40	29,40
Молибден	3,503	3,477	3,619	3,639	3,30	3,30	3,0	3,0	3,0	3,0
Вор-10	-	-	6,577	-	-	-	-	-	-	-
Вор-11	-	-	26,64	-	-	-	-	-	-	-
Углерод	-	-	8,307	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 2

Номер зоны	I	2	4	5	6	7	8	9	10	11
Уран-238	61,10	86,73	56,98	79,83	64,29	94,31	127,8	130,2	128,2	130,3
Плутоний-239	7,759	1,192	7,168	0,8131	9,541	0,9901	2,682	0,7556	2,384	0,6862
Плутоний-240	3,839	0,0294	3,498	0,0131	4,906	0,0175	0,0858	0,0081	0,0896	0,0083
Плутоний-241	1,309	0,0005	1,262	-	1,762	-	0,0019	-	0,0021	-
Плутоний-242	0,6593	-	0,601	-	0,8489	-	-	-	-	-
Окс. Рн-239	3,661	0,1133	2,664	0,0657	3,951	0,0665	0,4604	0,0390	0,2805	0,0265
Кислород	156,7	176,1	144,4	161,4	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0
Бор-10	-	-	3,139	-	-	-	-	-	-	-
Бор-11	-	-	12,71	-	-	-	-	-	-	-
Углерод	-	-	3,965	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU 2 (suite)

Обогащение	топливные КС	борные КС
$X_{\text{ЗМО}}$	17,05	17,63
$X_{\text{ЗСО}}$	18,68	21,18
$X_{\text{ЗСО}}/X_{\text{ЗМО}}$	~1,1	~1,2

TABLEAU 3

Координата границ	Z_0 , см
Граница между топливной и поглощающей частями (в случае топливных КС)	56,43
Граница между поглощающей частью и натрием (в случае борных КС)	52,28

TABLEAU 4

Состояние реактора	РБР-80	TRIGEX
"после перегрузки" $t = 0$	0,9998	1,0004
"перед перегрузкой" $t = 150$ суток	1,0002	1,0032

б) борные КС

Состояние реактора	РБР-80	TRIGEX
"после перегрузки" $t = 0$	1,0000	1,0172
"перед перегрузкой" $t = 150$ суток	0,9999	1,0080

TABLEAU 5

Зона	топливные КС		борные КС	
	$t = 0$	$t = 150$	$t = 0$	$t = 150$
Активная зона	-0,117	-0,099	-0,222	-0,188
Зона воспроизводства	0,492	0,417	0,430	0,417
Реактор	0,375	0,318	0,208	0,229

б) комплекс РБР-80

Зона	топливные КС		борные КС	
	$t = 0$	$t = 150$	$t = 0$	$t = 150$
Активная зона	-0,070	-0,093	-0,230	-0,195
Зона воспроизводства	0,433	0,399	0,438	0,406
Реактор	0,363	0,306	0,208	0,211

TABLEAU 6

Тип КС сост. р-ра. зона	топливные КС				борные КС					
	"после перегрузки" $\xi = 0$		"перед перегрузкой" $\xi = 150$		"после перегрузки" $\xi = 0$			"перед перегрузкой" $\xi = 150$		
	ЗМО	ЗБО	ЗМО	ЗБО	ЗМО	ЗМО с КС	ЗБО	ЗМО	ЗМО с КС	ЗБО
δ_{40}	0,13	0,15	0,13	0,15	0,14	0,15	0,17	0,14	0,16	0,14
δ_{41}	1,48	1,44	1,48	1,45	1,46	1,44	1,41	1,47	1,42	1,46
δ_{42}	0,06	0,08	0,06	0,08	0,07	0,08	0,09	0,07	0,09	0,07

TABLEAU 7

Состояние реактора	"после перегрузки"	"перед перегрузкой"
K_z ТВС акт. зоны	1,285	1,423
K_z ТВС + яч. СУЗ акт. зоны	1,367	1,460
K_z по высоте акт. зоны для центр. ТВС	1,244	1,244

б) борные КС

Состояние реактора	"после перегрузки"	"перед перегрузкой"
K_z ТВС акт. зоны	1,271	1,239
K_z ТВС + яч. СУЗ акт. зоны	1,349	1,324
K_z по высоте акт. зоны для центр. ТВС	1,256	1,225

TABLEAU 8

Комплекс программ	Топливные компенсаторы	Борные компенсаторы
КРАБ-1 одномерная геометрия, теория возмущений	0,451	0,509
ТВК-2Д, двумерная геометрия, теория возмущений	0,426 ^{*)}	0,673 ^{*)}
ТВК-2Д, двумерная геометрия, прямой расчёт	0,423	0,676

TABEAU 9

а) топливные КС

Номер зоны ^{*)}	I	4	6	8
	ЗМО	ЗБО	Бок. экран	Бок. экран
Толщина зоны, см	118,9	50,1	13,6	26,4
Уран-235	0	0	0	0
Уран-238	0,2061	0,06983	0 ³ 5766	0 ⁴ 4360
Плутоний-239	0,1500	-0,06147	0,03376	0 ² 3460
Плутоний-240	0 ² 8901	0 ² 2104	0 ⁴ 6800	0
Плутоний-241	-0,4975	-0,2273	0 ⁴ 2891	0
Плутоний-242	0 ³ 5775	0 ³ 5405	0	0
Уран-236	0	0	0	0
Осколки	-0,4926	-0,1967	-0 ³ 3335	-0 ⁴ 1854

б) борные КС

Номер зоны ^{*)}	I	4	6	8	10
	ЗМО	ЗМО с КС	ЗБО	Бок. экран	Бок. экран
Толщина зоны, см	72,17	46,73	50,1	13,6	26,4
Уран-235	0	0	0	0	0
Уран-238	0,05328	0,08183	0,06379	0 ³ 6923	0 ⁴ 5872
Плутоний-239	0,01472	0,02811	-0,2026	0,03505	0 ² 3679
Плутоний-240	0 ² 1955	0 ² 3044	0 ³ 5175	0 ⁴ 8558	0
Плутоний-241	-0,1289	-0,2045	-0,2252	0 ⁴ 4297	0
Плутоний-242	0 ³ 1102	0 ³ 1633	0 ³ 5086	0	0
Уран-236	0	0	0	0	0
Осколки	-0,1285	-0,1965	-0,2010	-0 ³ 4211	-0 ⁴ 2776

TABLEAU 10

Топливные КС			Борные КС		
Номер зоны №)	Зона	величина	Номер зоны №)	зона	Величина
I	ЗМО	-42,65	I	ЗМО	-20,05
4	ЗБО	-70,64	4	ЗМО с КС	-14,01
6	Бок. экраны	+ 4,00	6	ЗБО	-75,00
8	Бок. экран	+ 0,31	8	Бок. экран	+ 4,74
2	ТЭ к ЗМО	+ 6,09	10	Бок. экран	+ 0,39
5	ТЭ к ЗБО	+ 2,82	2	ТЭ к ЗМО	+ 1,14
7	Бок. экран - - торц. часть	+ 0,07	5	ТЭ к ЗМО	+ 0,78
9	Бок. экран - - торц. часть	0	7	ТЭ к ЗБО	+ 1,91
			9	Бок. экран - - торц. часть	+ 0,08
			II	Бок. экран - - торц. часть	0

TABLEAU 11

Стержни СУЗ	Топливные КС	Борные КС
Система КС	3,98(22 КС)	4,35(18 КС)
Стержень КС (из внутреннего кольца - - помечен точкой [I])	0,20	0,24
3 стержня КС (помечены точками [I])	0,79	1,34
1 стержень АР	0,18	0,18
2 стержня АР	0,37	0,34
7 стержней АЗ, АЗ-ТК (один централь- ный и 6 стержней внутреннего кольца системы АЗ, АЗ-ТК)	2,45	0,88
6 стержней АЗ, АЗ-ТК (периферийное кольцо системы АЗ, АЗ-ТК)	2,45	2,59
Суммарная эффективность системы АЗ, АЗ-ТК (13 стержней)	5,66	3,61
Суммарная эффективность 6 перифе- рийных стержней системы АЗ, АЗ-ТК и двух стержней АР	2,84	2,94
Суммарная эффективность системы АЗ, АЗ-ТК (13 стержней) и 2 стержня АР	6,00	3,95

TABLEAU 12

а) топливные КС

40.0 40.0 50.0	Торцевой подпор					10 10 10 40.0	R
	3	3	3	3	3		
	ТЭ к ЗМО 2	ТЭ к ЗБО 5	Бок. экран 7	8	9		
	ЗМО 1	4	6	8	10		
	118.9	50.1	13.6	26.4	40.0		

б) борные КС

40.0 40.0 50.0	Торцевой подпор					12 12 12 40.0	R
	3	3	3	3	3		
	ТЭ к ЗМО 2	ТЭ к ЗМО 5	ТЭ к ЗБО 7	Бок. экран 9	11		
	ЗМО 1	ЗМО с КС 4	ЗБО 6	Бок. экран 8	10		
	72.17	46.73	50.1	13.6	26.4	40.0	

FIGURE 1

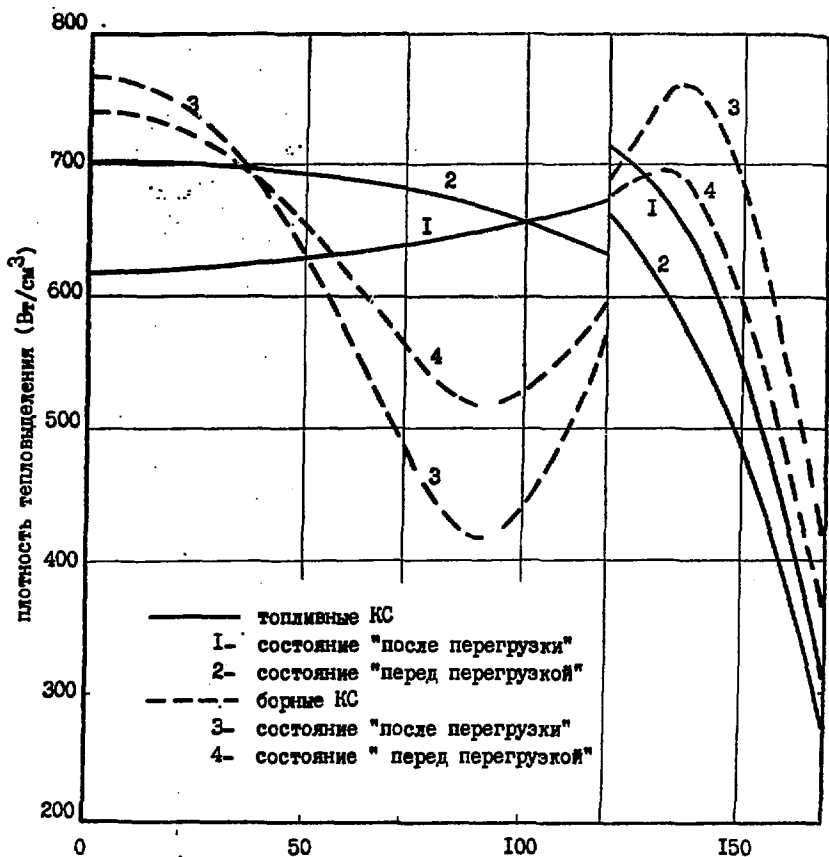


FIGURE 2

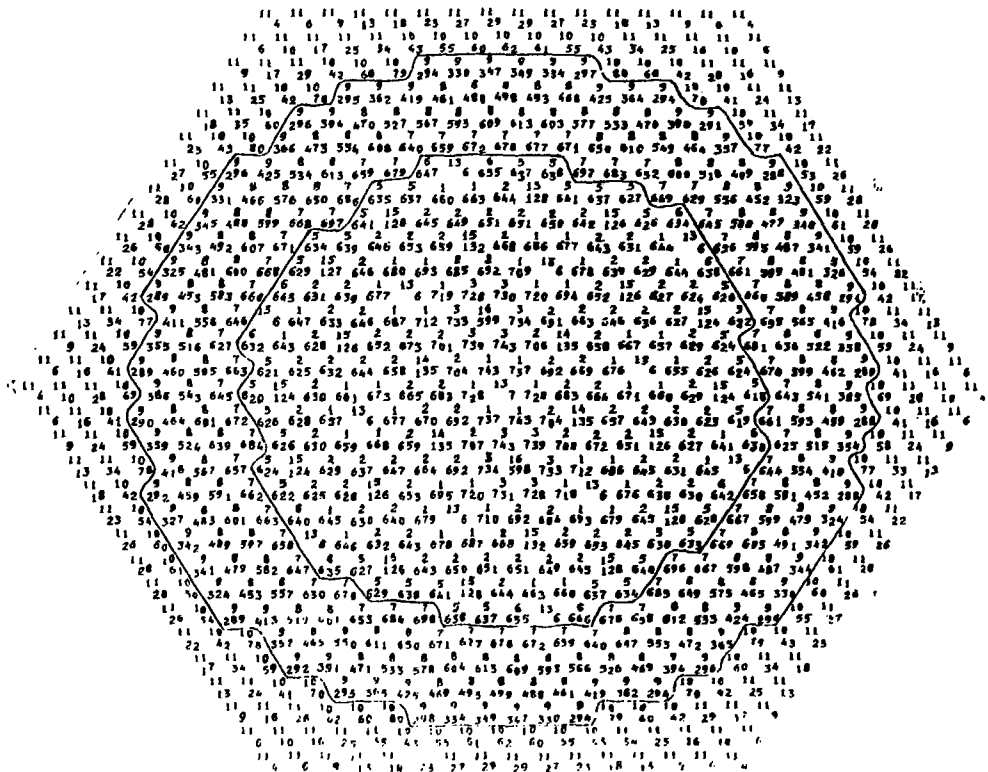


FIGURE 3

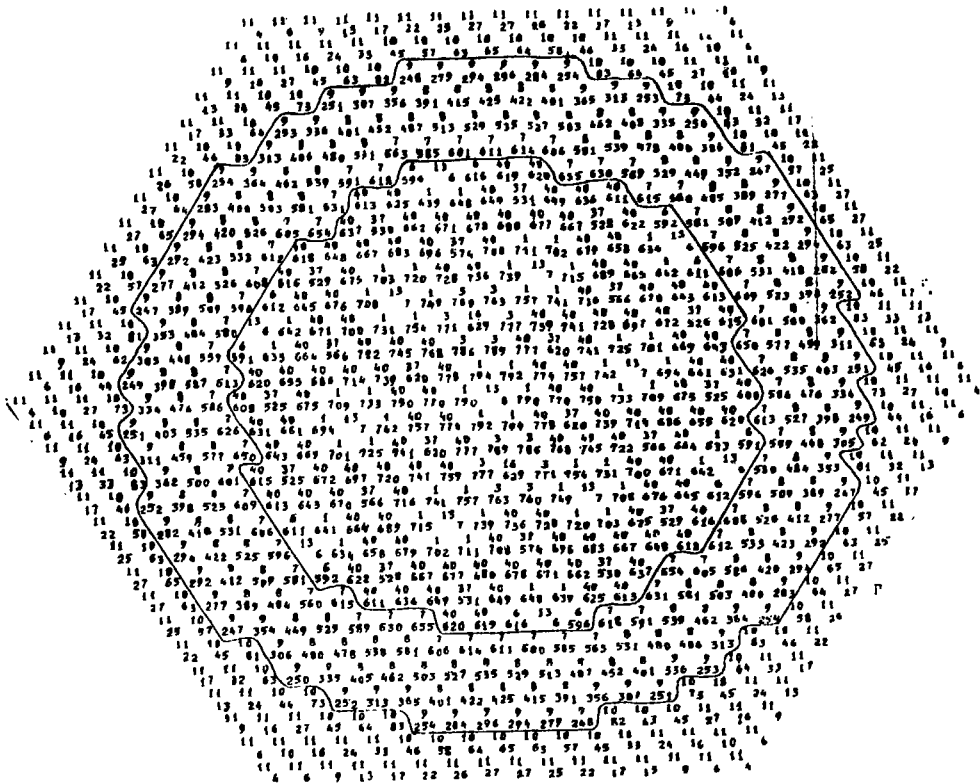


FIGURE 4

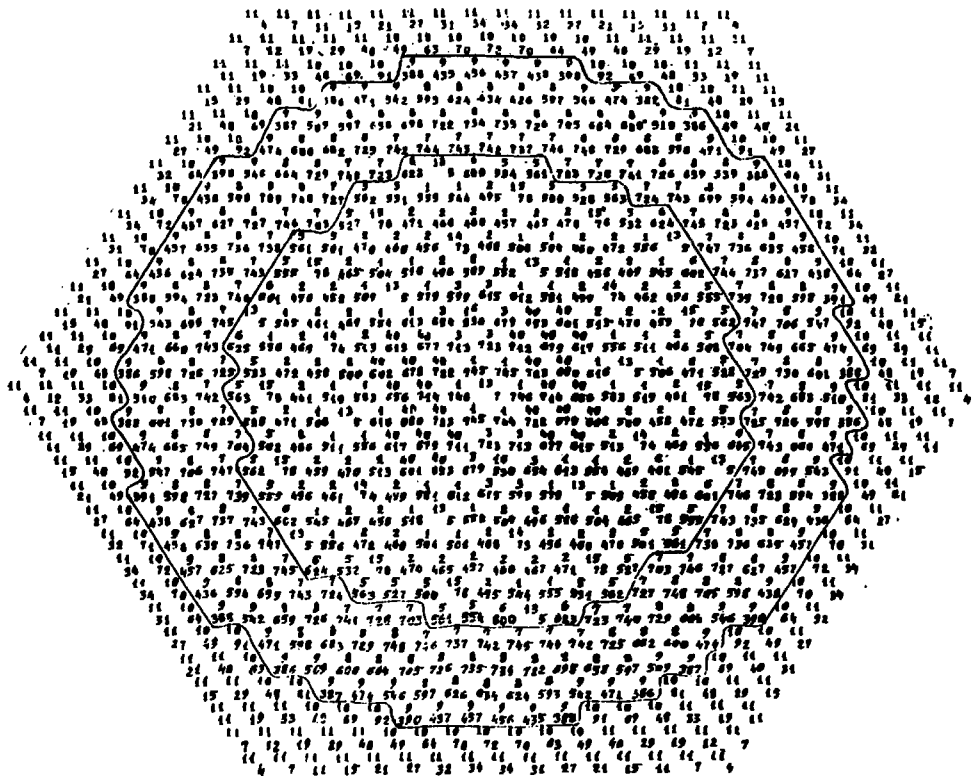


FIGURE 5

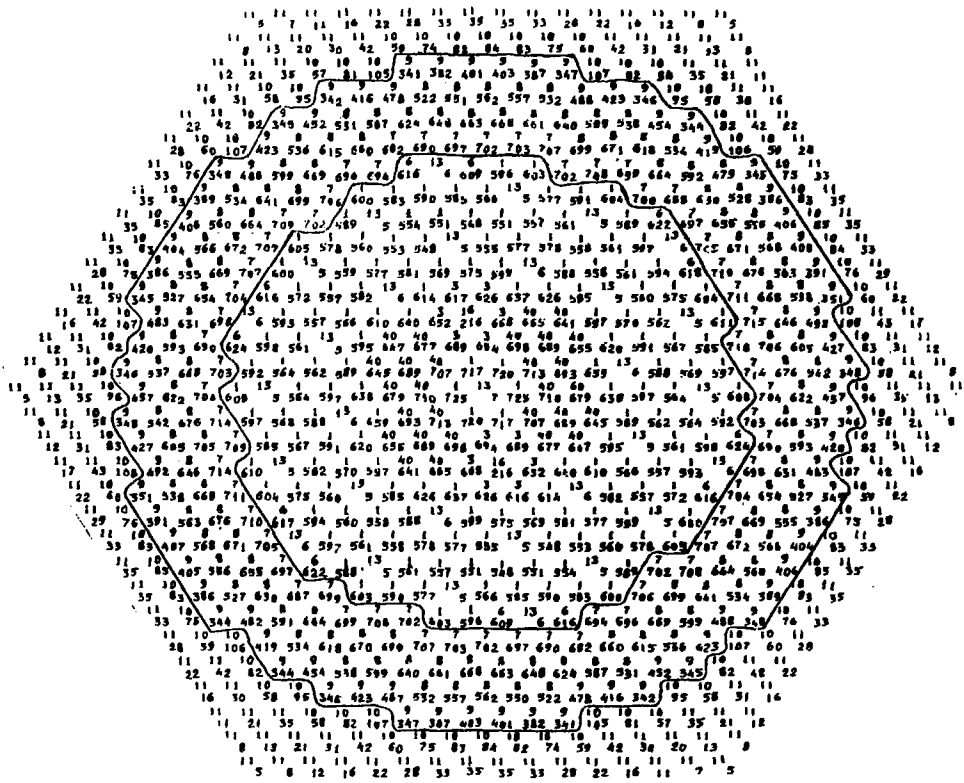


FIGURE 6

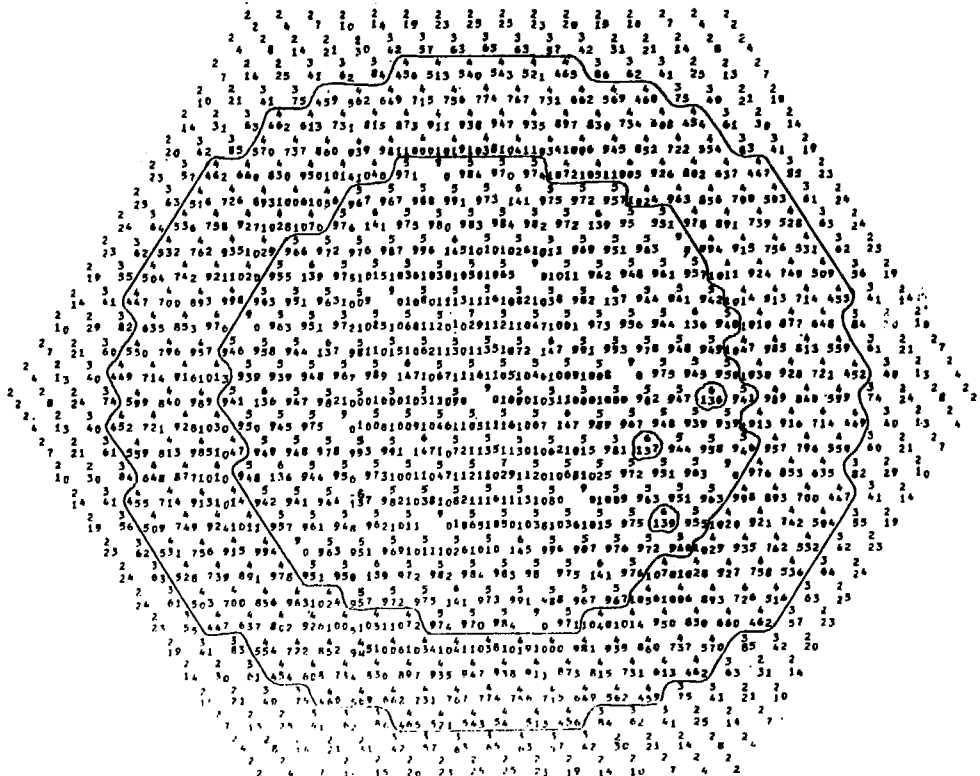
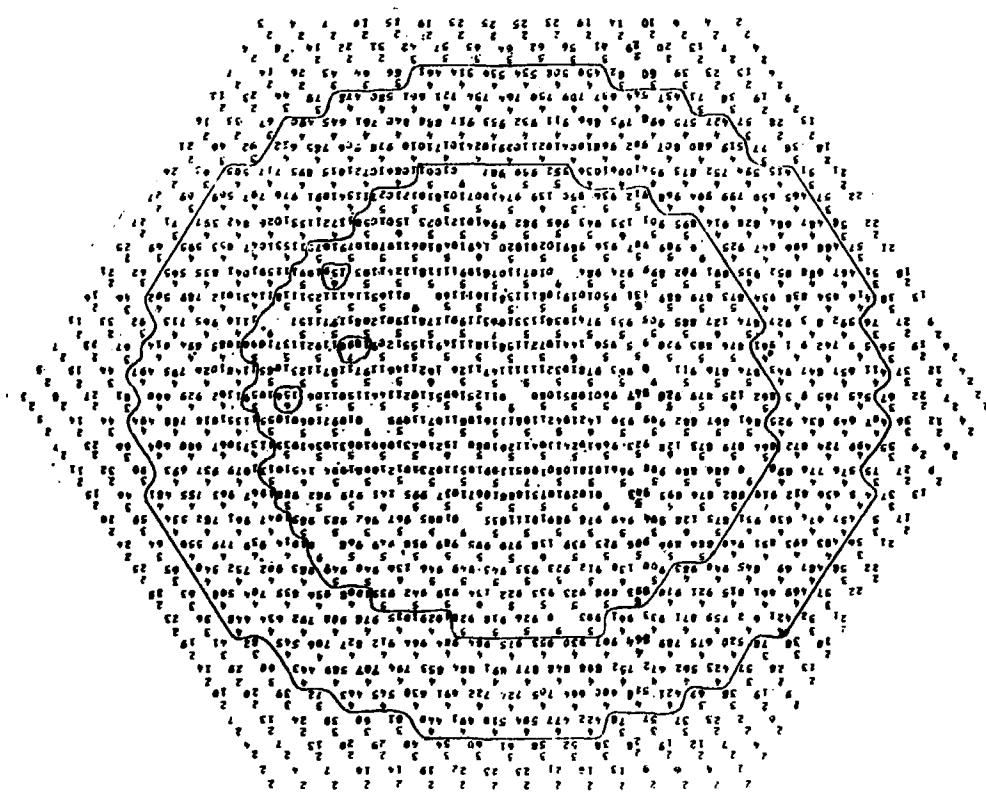


FIGURE 7

FIGURE 8



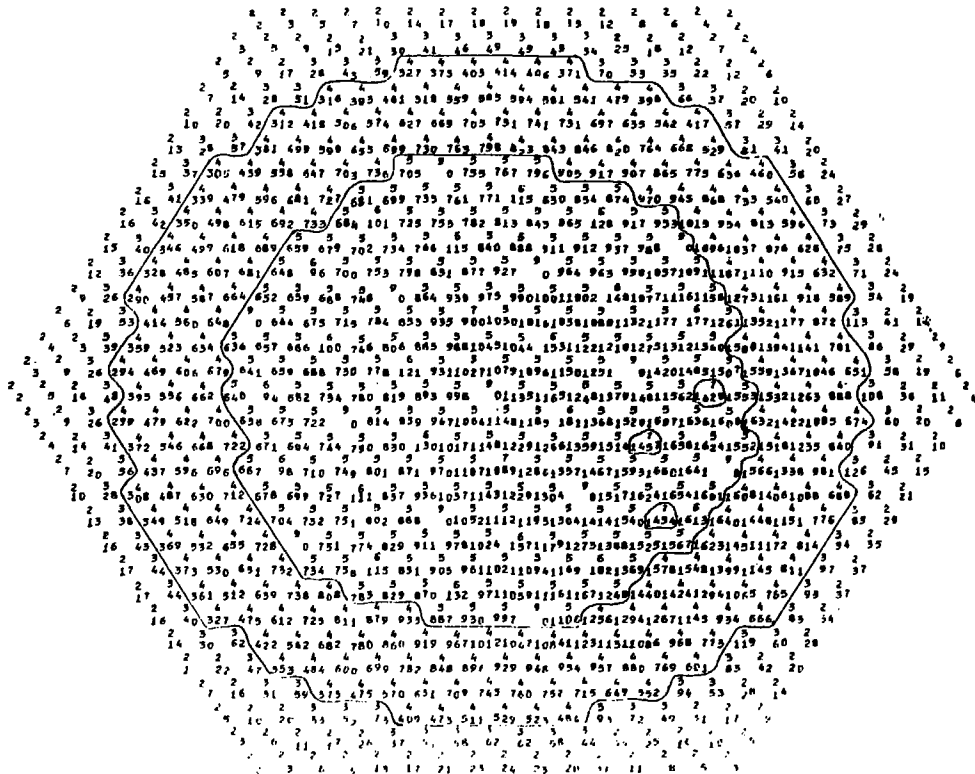


FIGURE 9

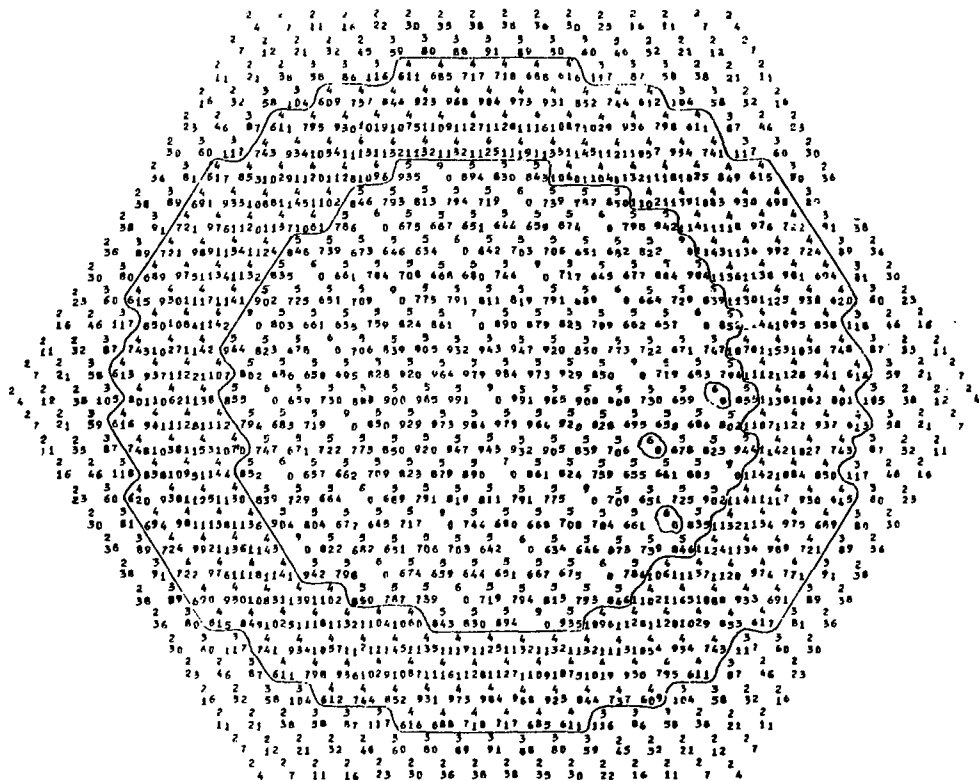


FIGURE 10

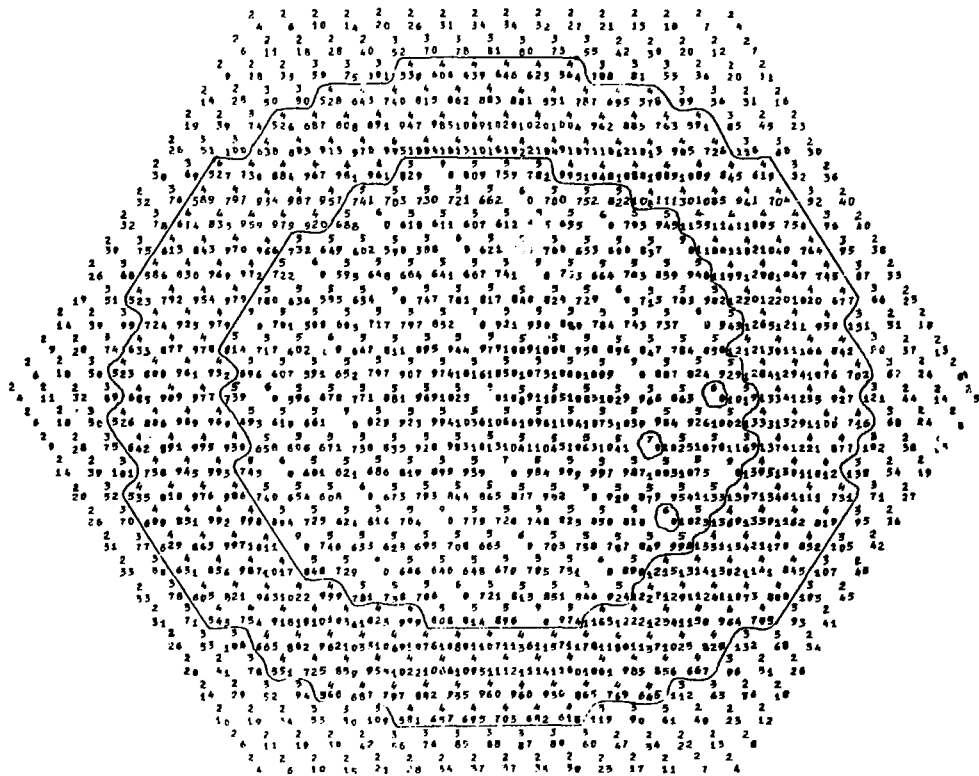


FIGURE 11

