LAWRENCE
LIVERMORE
NATIONAL
LABORATORY

UCRL-TR-212202

Radiochemical Assays of Irradiated VVER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burnup Credit Activities

L. J. Jardine, Lawrence Livermore National Laboratory

April 26, 2005

This document was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor the University of California nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or the University of California. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or the University of California, and shall not be used for advertising or product endorsement purposes.

This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by University of California, Lawrence Livermore National Laboratory under Contract W-7405-Eng-48.

Radiochemical Assays of Irradiated VVER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burnup Credit Activities

The objective of this spent fuel burnup credit work was to study and describe a VVER-440 reactor spent fuel assembly (FA) initial state before irradiation, its operational irradiation history and the resulting radionuclide distribution in the fuel assembly after irradiation.

This work includes the following stages:

- to pick out and select a specific spent (irradiated) FA for examination
- to describe the FA initial state before irradiation
- to describe the irradiation history, including thermal calculations
- to examine the burnup distribution of select radionuclides along the FA height and cross-section
- to examine the radionuclide distributions
- to determine the Kr-85 release into the plenum
- to select and prepare FA rod specimens for destructive examinations
- to determine the radionuclide compositions, isotope masses and burnup in the rod specimens
- to analyze, document and process the results

The specific workscope included the destructive assay (DA) of spent fuel assembly rod segments with an ~38.5 MWd/KgU burnup from a single VVER-440 fuel assembly from the Novovorenezh reactor in Russia. Based on irradiation history criteria, four rods from the fuel assembly were selected and removed from the assembly for examination. Next, 8 sections were cut from the four rods and sent for destructive analysis of radionuclides by radiochemical analyses. The results were documented in a series of seven reports over a period of ~1 1/2 years.

This work was performed as a partner project between the International Science and Technology Center – Moscow (ISTC) and the Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management. The U.S., Japan, the Russian Federation (RF), and the European Atomic Energy Community signed an Agreement that established the ISTC in Moscow in October, 1994. These countries were later joined by the Republic of Georgia, the Republic of Armenia, the Republic of Belarus, the Republic of Kazakhstan, the Kyrgyz Republic, Norway, and the Republic of Korea.

On June 16, 1995, the U.S. DOE and ISTC signed a Memorandum of the Agreement to cooperate in approved agreements that facilitate the nonproliferation of nuclear weapons and nuclear weapons expertise. This ISTC partner project #2670 work was performed according to Annex VI to the Memorandum of the Agreement Between The Department of Energy of The United States of America and The International Science and Technology Center in The Russian Federation Concerning Implementation of Various Projects of the DOE Office of Civilian Radioactive Waste Management (RW) among DOE, the ISTC, and scientific and engineering institutes in the Russian Federation.

This spent fuel burnup credit partner project #2670 was one of the joint ISTC Annex VI projects. This joint project was initiated in May 2003 between the United States (U.S.),

International Science and Technology Center (ISTC) and the State Scientific Center "Research Institute Of Atomic Reactors" (RIAR). The project (ISTC Partner Project 2377) was funded by the U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management (DOE-RW) for a period of approximately 1-1/2 years (Reference 1). The Russian ISTC Project manager was Alexey V. Smirnov, RIAR. The US funds were part of a small Annex VI non proliferation activity aimed at Russian spent fuel and geologic disposal activities. A companion ISTC Partner Project 2377, "Development of A Comprehensive Plan for Scientific Research, Exploration, and Design: Creation of An Underground Radioactive Waste Isolation Facility at The Nizhnekansky Rock Massif" was also performed as part of this non proliferation activity and has been reported elsewhere (Reference 2).

LLNL served as the technical collaborator for this ISTC partner project 2670. LLNL activities included negotiating the detailed scope of work, reviewing contract deliverables and monitoring the contract activities in conjunction with DOE-RW staff. Key DOE-RW staff included Jeff Williams and Leroy Stewart.

The project deliverable reports for the partner project 2670 contract were organized into 7 submittals. These occurred in the logical sequence of performing the work over an approximately 1 1/2 year period. These reports are contained in this document as prepared by the Russian investigators with minimal editing. These seven reports and contents of this report are:

Part 1. Selection Methodology of Fuel assemblies, Fuel Rods and Specimens for Measurements of Nuclide Composition, Isotpoic Mass and Fuel Burnup, *Interim Progress Report Task No.1*

Part 2. Initial Condition of VVER-440 Working Assembly No. 13626135 Operated up to the average Burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th Power Unit of Novovoronezh NPP during 4 Fuel Cycles, *Interim Progress Report, Task No. 2*

Part 3. Irradiation History of VVER-440 Working Assembly No. 13626135 operated up to the Average Burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th Power Unit of Novovoronezh NPP during 4 Fuel Cycles, *Interim progress Report, Task 3*

Part 4. Nondestrcutive Post-Irradiation Examinations of Fuel Rods of VVER-440 Fuel Assembly No. 13626135 Operated Up to the Average Burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th Power unit of Novovoronezh NPP, *Interim Progress Report, Task 4*

Part 5. Selection and Preparation of Samples for Radiochemical Analysis of VVER-440 Fuel Isotopic Composition (FA No. 13626135), *Interim Progress Report, Task 5*

Part 6. Techniques and Equipment to Determine Nuclide Composition, isotopic Mass and Fuel Burnup Fraction in Fuel Samples, *Interim Progress Report, Task 6*

Part 7. Chemical Assays of Irradiated VVER Fuel For Use In Burnup Credit, *Final Report, Task 7*

This report has been prepared to document the ISTC partner project 2670 results into a form that can be used and referenced by others working on the general topic of burnup credit for spent fuel.

Leslie J. Jardine
Russian Projects Leader
Fissile Materials Programs
P Division/Proliferation and
Terrorism Prevention (PTP) Program

References:

1. Project Agreement #2670p Between the International Science and Technology Center, The Department of Energy of the United States of America and the State Scientific Center "Research Institute of Atomic Reactors ""Chemical Assays of Irradiated VVER Fuel for Use in Burnup Credit" ISTC Partner Project #2670p Work Plan, Project Manager Alexey V.Smirnov, RIAR

2. "Development of A Comprehensive Plan for Scientific Research, Exploration, and Design: Creation of An Underground Radioactive Waste Isolation Facility at The Nizhnekansky Rock Massif", T. A. Gupalo, K. G. Kudinov, L. J. Jardine and J. Williams, presented at the Waste Management 2005 Symposium Tucson AZ. February 27 - March 3, 2005, UCRL-CONF-206438, November 9, 2004

Project Manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2003

Selection methodology of fuel assemblies, fuel rods and specimens for measurements of nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup

Interim progress report, Task No.1

VVER Burnup Credit Project (2670p)

Part 1

Dimitrovgrad, 2003

Abstract

The present report includes 24 pages, 8 figures, 7 tables and 3 references.

Key words: VVER Burnup Credit Project, VVER-440 spent fuel, measurement of fuel burnup, nuclide composition and isotopic mass.

This paper describes the selection methodology of VVER-440 fuel assemblies, fuel rods and fuel samples to perform their radiochemical analysis and mass spectrometry in order to obtain data on fuel burnup and nuclide composition for their usage in tasks related to burnup credit.

Table of Contents

Introduction..... 5

1. Selection of VVER-440 spent fuel assembly for examination..... 9
2. Main characteristics of selected spent fuel assembly 12
3. Selection of fuel rods..... 15
4. Preparation of fuel samples..... 19

Conclusion 24

References..... 24

Symbols used in the report

SFA - spent fuel assemblies

$K_{effec.}$- effective neutron multiplication factor (neutron multiplication factor in the reactor)

$K_{z.}$- axial non-uniformity of fuel rod linear power

RSS – residual square sum

Introduction

VVER-440 is the main type of nuclear reactor that is widely used at the nuclear power plants of Eastern Europe Countries. Table 1 demonstrates a number of power units based on the same reactor type, which are under operation in the analyzed region.

Table 1

Operating VVER-440 reactors in Eastern Europe Countries

Country	Place	Power unit	Reactor start-up
Bulgaria	Kozloduy	1	1974
		2	1975
		3	1981
		4	1982
Czech	Dukovany	1	1985
		2	1986
		3	1987
		4	1988
Hungary	Paks	1	1983
		2	1984
		3	1986
		4	1987
Finland	Loviisa	1	1977
		2	1981
Slovakia	Bogunize	1	1981
		2	1981
		3	1985
		4	1985
	Mohovze	1	1986
Armenia	Mezamor	2	1985
Ukraine	Rovno	1	1981
		2	1982
Russia	Novovoronezh	3	1972
		4	1973
	Polyarnye Zori	1	1973
		2	1875
		3	1982
		4	1984

A great number of VVER-440 spent fuel assemblies are stored up during the operation period. Their handling is a significant source of expenditures in nuclear power engineering of each country. That is why the increase of spent fuel loading in the interim water and dry storages, shipping casks or reprocessing equipment can be economically effective and result in safety improvement of the spent fuel handling as well as harmful environmental effect decreasing. In relation to the foregoing, it is necessary to increase the capacity of VVER-440 spent nuclear fuel storage facilities, which were designed in 1960-70s at the expense of more compact disposition of spent fuel assemblies (SFA) in them in comparison with the rated one on condition that all safety requirements will be met undoubtedly [1].

The fulfillment of the requirements on NPP safety, which have became tougher recently, causes the necessity of more compact storage of fuel. In accordance with document [2] it is necessary to have vacant places in the NPP storage pool for unloading the FA from reactor core in any time that hasn't been provided before.

A cooling pool of VVER-440 spent fuel assemblies comprises two compartments. One of them incorporates two-high racks where fuel assemblies of 3.6% enrichment are placed with a spacing of 225mm and the second one (a multi-purpose compartment) is meant for location of 30-place basket with fuel assembly or the shipping cask TK-6 for transportation purposes. Additional safety measures have been taken for storage of 4.4% enrichment fuel. It is interchanged with less enrichment fuel. Methods of more compact storage in racks with a spacing of 160-170mm have been also proposed for 4.4% enrichment fuel assemblies included in protective wrappers made of boride steel but they haven't been introduced into practice. New types of fuel assemblies incorporating uranium-gadolinium fuel and zirconium spacer grids require an additional nuclear safety analysis. An additional safety measure is the usage of boric acid of 12-16 g/l concentration.

The following most important tasks can be distinguished as a result of long-term examinations and nuclear safety analysis and their solution is necessary:

- Choice and evaluation of calculation errors $K_{effec.}$;
- Nuclear safety justification for design-basis and beyond design-basis accidents (water density decrease, drop and damage of fuel assemblies etc.);
- Necessity and possibility of experimental estimation of storage facility sub-criticality and fuel burnup;
- Analysis of new types of fuel (uranium-gadolinium, uranium-plutonium), safety justification for storage conditions of new FA types.

As a rule, the possibility and degree of storage facility compactness depend on fuel assembly spacing mainly. That is to say they depend on nuclear safety requirements.

An important problem is the establishment of storage and transportation standards with due consideration for fuel burnup. Five important factors should be taken into consideration in solution of this problem:

- Error of fuel isotopic composition calculation;
- Calculation error $K_{effec.}$ That depends on the complex composition of fuel incorporating a mixture of uranium, plutonium and actinides;
- Fission product effect on $K_{effec.}$;
- Non-uniform distribution of fissile materials throughout the height of fuel assembly;
- Fuel assembly irradiation history.

The irradiated fuel reactivity depends on:

- Initial loading of fissile fuel and its distribution throughout the fuel assembly;
- Initial quantity of burnable absorber and its distribution throughout the fuel assembly;
- Fuel operation history;
- Rates of plutonium and fission product generation;
- Fission rate of heavy metals and decay rates of fission products and burnable absorber;
- Distribution of burnup and transuranium elements as well as fission products throughout the fuel assembly.

A contribution of nuclides, which are present in the VVER spent fuel reached a burnup of 30 MWd/kgU and cooling period of 1-5 years, into $K_{effec.}$ was calculated in paper [3]. Nuclides were subdivided into following groups:

- Main actinides (fissile nuclides of uranium and plutonium);
- Minor actinides (neutron-absorbing nuclides Pu, Am and Np).

Fission products were also subdivided into the following groups:

- Main group of fission products incorporating nuclides with big capture cross-sections;
- Minor group incorporating other fission products.

Classification of actinides and fission products, which are used in computer codes, is shown in Table 2.

Table 2

Actinides and fission products used in computer codes

Main actinides	Minor actinides
U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241	Pu-238, Pu-242, Am-241, Am-243, Np-237
Main fission products	Secondary fission products
Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-153, Gd-155	All other

Note: nuclides, which are given in Table 2, are included in document NUREG/CR-6665.

The burnup credit accountability is one of the main possibilities of safety justification for space filling enhancement in spent fuel handling. The burnup credit is workability of spent fuel special properties involving the change of its initial isotopic composition and associated reactivity decrease.

Verification of computer codes using the initial characteristics of fuel, operation history and distribution of neutron-absorbing and neutron-emitting nuclides in fuel assembly volume is necessary for calculation of possible space filling enhancement for spent fuel with consideration for the burnup credit.

The initial isotopic composition of fuel should be known with a good precision. The operation history is taken from the reactor data. Great variations of the irradiation history generate a need for conservative approach because the irradiation conditions are chosen in order to achieve a maximum reactivity.

All these taken together impose certain limitations on selection of spent fuel assemblies, fuel rods and specimens to carry out special experiments aiming at elimination of uncertainties in computer codes used for reactivity calculation of the VVER-440 spent fuel.

1. Selection of VVER-440 spent fuel assembly for examination

Currently a great number of VVER-440 spent fuel assemblies of standard design (3.6% enrichment U-235), which achieved a burnup of 40 MWd/kgU, are stored up in the storage facilities. That's why the main criterion of spent fuel assembly selection for nuclide composition analysis, isotopic mass and burnup fraction measurements is the agreement between its characteristics and the above-mentioned parameters.

More than that a spent fuel assembly should be selected from among the available VVER-440 spent fuel assemblies, which have been subjected to post-irradiation examination of their conditions because the activities performed under the "VVER Burnup Credit" make provision for non-destructive post-irradiation examinations of fuel rods.

Table 3 gives the main characteristics of VVER-440 spent fuel assemblies, which were subjected to post-irradiation examinations in the SSC RF RIAR material science laboratory in 1988-2002.

The analysis of presented data revealed that spent fuel assemblies No.135 and 066 are the most suitable for nuclide composition analysis. Some of mentioned fuel assemblies form the Novovoronezh NPP have got rather low burnup level. As for spent fuel assemblies from the Kola NPP, they contain fuel of higher burnup.

A need for conservative approach to the burnup credit evaluation requires the selection of spent fuel assembly with the maximal spent fuel reactivity value when all other things being equal. As is well known that the reactivity of irradiated fuel depends on the initial loading of fissile nuclides and operation history in the VVER-440 reactor that determines the burnup rate, accumulation of fission products and actinides (uranium, plutonium and americium isotopes).

Таблица 3

Characteristics of the examined VVER-440 SFAs

No	Fuel assembly No	Fabrication date	Date of loading	Unloading	Reactor, power unit	Beginning of examination	Completion of examination	U-235 enrichment, %	Number of fuel cycles	Operation period, effective days	Average specific generated power of FA, MWd/kgU
1	D11066	01.03.83	06.08.83	23.06.86	Rovno NPP-1	01.01.89	30.12.89	3.6	3	857.6	36.8
2	D11809	01.05.83	11.09.83	06.08.86	Novovoronezh NPP-4	01.01.90	22.10.90	3.6	3	994.8	32.8
3	D15687	01.06.84	25.09.84	06.08.86	Novovoronezh NPP-4	01.01.90	16.10.90	3.6	2	605.2	24.2
4	D19159	01.07.85	02.09.85	16.08.88	Novovoronezh NPP -4	01.01.91	01.01.92	3.6	3	989.1	34.1
5	D26135	01.06.87	13.10.87	04.07.91	Novovoronezh NPP -4	01.01.95	01.09.95	3.6	3	1109.7	38.5
6	D52380	01.02.96	10.06.96	18.06.99	Kola NPP-2	01.01.01	01.06.01	4.4	3	649.1	27.6
7	E22198	01.05.86	24.09.86	01.11.90	Kola NPP-3	01.01.94	30.12.94	4.4	4	1259.8	46.2
8	E22222	01.05.86	24.09.86	25.10.91	Kola NPP-3	01.01.94	30.12.94	4.4	5	1564.9	48.2

As spent fuel assemblies No.135 and 066 were irradiated in the reactor during 1109.7 and 857.6 effective days and the burnup rate was much lower in the first assembly (38.5/1109.7=0.034 MWd/kgU/effec.day) in comparison with the second one (36.8/857.6=0.043 MWd/kgU/effec.day), spent fuel assembly No.135 was selected for examination aiming at verification of computer codes to estimate the reactivity of the VVER-440 irradiated fuel.

Table 4 shows some results of post-irradiation examinations for fuel rods taken from these spent fuel assemblies. The results confirm that thermal power was much higher in spent fuel assembly No.066.

Table 4

Oxidation and size changes of fuel rod cladding tubes in spent fuel assemblies No.135 and 066

SFA number	Thickness of oxide film on the cladding, μm	Average elongation of fuel rod, mm	Average decrease of the cladding diameter, μm	"Fuel-to-cladding" gap, μm	Corrugation existence on the claddings
135	3-5	6.06	40	50-90	Yes
066	12-17	9.07	96	0	No

Great oxidation, elongation and shrinkage of cladding tubes, absence of fuel-to-cladding gap and existence of corrugation- traces of fuel-cladding interaction on pellet joints point to the fact that specific energy release in fuel rods of spent fuel assembly No.066 was higher than in spent fuel assembly No.135.

2. Main characteristics of selected SFA

Operating fuel assembly No.13626135 was fabricated in June, 1987 in accordance with assembly drawing 440.01.000-27 and specifications TU95.598-79.

Table 5 shows the main design characteristics of fuel assemblies and fuel rods. Arrangement of fuel rods in the spacer grid cells is shown in Fig.1. One batch of fuel with the average density of 10.5g/cm^3 was used for fabrication of fuel rods in fuel assembly No.135.

Table 5

Initial data on fuel assembly No.135

Parameter	Value
1. Fuel assembly design	440.01.000-27
2. Specifications	TU95.598-79
3. Fuel assembly wrapper design	445.01.001-06
4. Wrapper tube design, mm:	
Length	2725
Across flats dimension	$144.2^{+1.3}_{-0.5}$
5. Fuel rod bundle design	440.01.020-27
6. Fuel rod design	440.00.020-02
7. Specifications for fuel rods	440.00.010ТУ
8. Nominal length of fuel rod, mm	2558.5
9. Outer diameter of fuel rod	$9.1^{+0.1}_{-0.05}$
10. Inner diameter of cladding, mm	$7.72^{+0.08}$
11. Fuel pellet:	
Outer diameter, mm	$7.60_{-0.07}$
Central hole diameter, mm	$1.2^{+0.8}$
Height, mm	8-14
12. Fuel column length, mm	2420±10
13. Fuel column mass, mm	1087±22
14. Helium pressure in fuel rod, atm	5-7

Schematic arrangement of fuel rods in fuel assembly 135

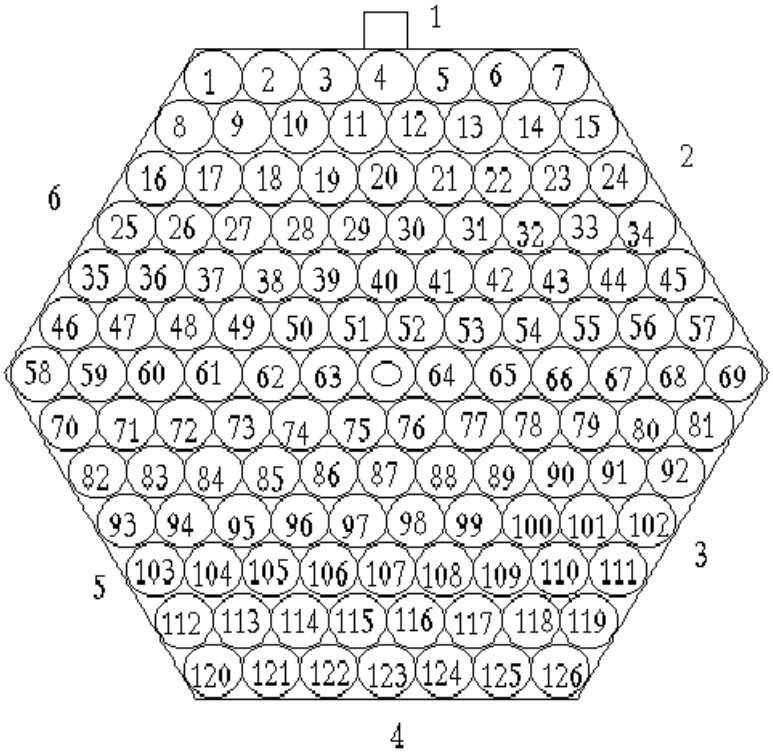


Fig.1

Fuel assembly 135 was operated as a member of 15-18 core loads in the forth power unit of Novovoronezh NPP. Table 6 and Fig.2 show fuel cycle data and position of the fuel assembly in the reactor core.

Table 6

Duration of fuel cycles and fuel assembly 135 movement diagram

Fuel cycle No.	15(1)	16(2)	17(3)	18(4)
Beginning End	10.87 08.88	10.88 12.89	01.90 05.90	07.90 7.91
Effective days	296	389.8	98.2	325.1
Average burnup in a fuel cycle, MWd/kgU	11.0	14.5	3.5	9.5
Average burnup at the end of fuel cycle, MWd/kgU	11.0	25.5	29.0	38.5
Burnup rate, MWd/kgU / effective days	0.037	0.037	0.036	0.029
Fuel assembly coordinate in the reactor core	21-38	19-40	19-40	16-45

Location of fuel assembly 135
in the core of the 4th power unit Novovoronezh NPP

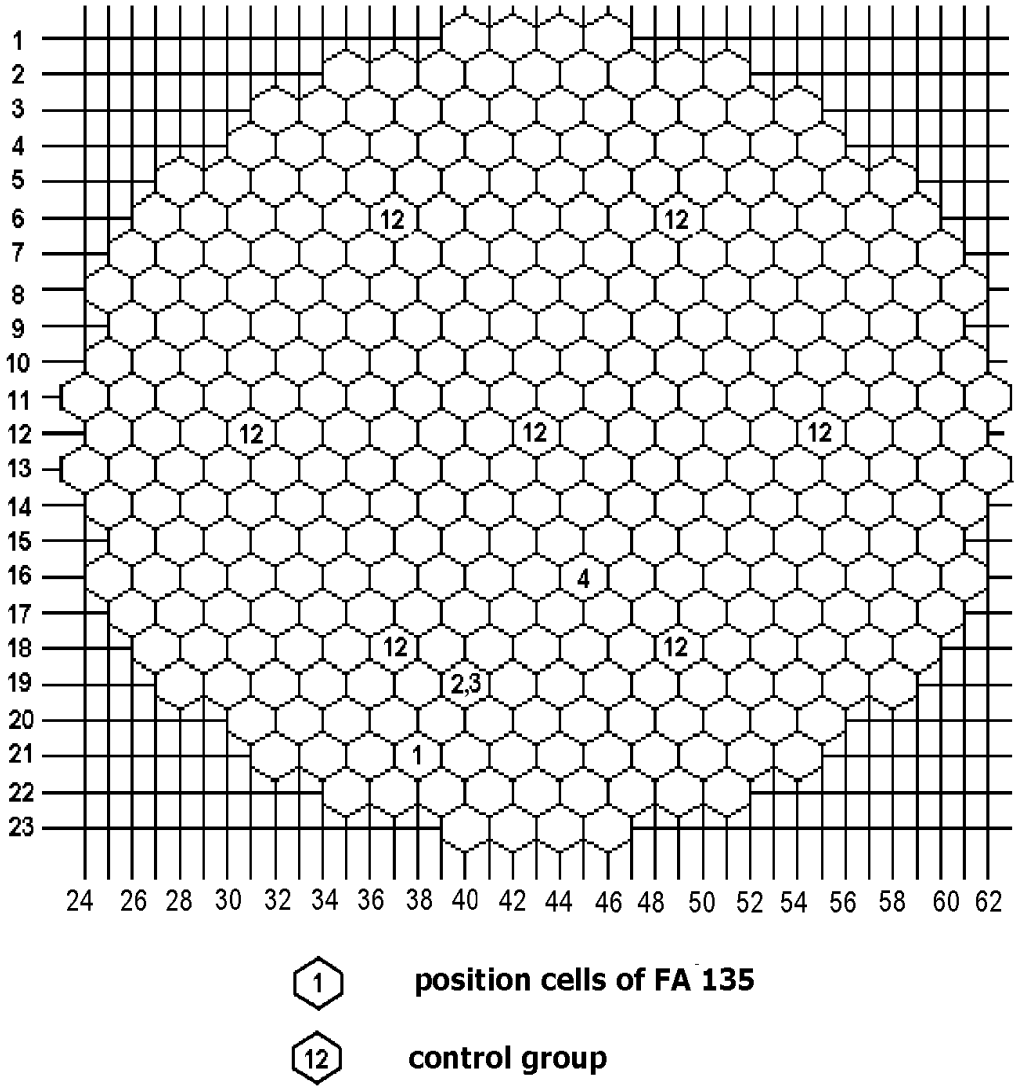


Fig.2

The analysis of data given in Table 6 and Fig.2 reveals that fuel assembly No.135 was operated at the same burnup rate during the first three fuel cycles but it was subjected to less power during the fourth fuel cycle. It was not located close to the assemblies of the 12th control rod group during none of the cycles. According to the results of cladding integrity control in the 4th power unit of Novovoronezh NPP and PIE data, fuel assembly didn't include untight fuel rods.

3. Selection of fuel rods

Experimental data on fuel burnup were used as the basis for selection of fuel rods from VVER-440 SFA No.135 to perform radiochemical and mass spectrometric analysis:

- One fuel rod with the maximum burnup;
- One fuel rod with the minimum burnup;
- Two other fuel rods have got intermediated burnup.

Fuel burnup in fuel rods of the selected VVER-440 SFA No.135 was measured using gamma-spectrometry according to accumulation of long-lived fission product Cs-137 by the way of comparison with the burnup standard that is a fragment of standard VVER fuel rod where the burnup was measured with the use of mass spectrometry.

A semiconductor spectrometer Ge(Li) was used for gamma-spectrometry of fuel rods. PC PDP-11/23 was used for gamma-spectra processing, data file storage and retrieval in the automatic mode with a axial step of 10mm. The gamma-spectrometer was calibrated using the burnup standard before and after measurements.

A gamma ray method was used for burnup measurement in 36 diagonal fuel rods of spent fuel assembly. Table 7 shows experimental values of axial peaking factor (Kz), Cs-137 fission product accumulation as well as maximum and average fuel burnup in fuel rods.

Fig.3 and 4 illustrate the nature of average and maximum burnup distribution in diagonal and corner fuel rods of the fuel assembly.

The analysis of given data reveals that the maximum burnup is found in the corner fuel rods of the first row, intermediate burnup is found in the second row and the minimum one is found in the fifth row of SFA No.135 fuel rods. Based on these results, four fuel rods were selected for examination and cutting:

- Fuel rod 69 with the maximum fuel burnup of 49.3 MWd/kgU;
- Fuel rod 65 with the minimum fuel burnup of 42.3 MWd/kgU;
- Fuel rod 67 and 68 with intermediate fuel burnup level of 43.8 and 45.7 MWd/kgU respectively.

Table 7

Maximum and average fuel burnup values and peaking factors (K_z) of fission product distribution along the length of fuel rods in fuel assembly 135

Fuel rod number	Maximum burnup, MWd/kgU	Kz (Cs137)	Average burnup, MWd/kgU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	42.3	1.16	36.4
66	42.5	1.16	36.5
67	43.8	1.16	37.6
68	45.7	1.16	39.3
69	49.3	1.17	42.2
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Minimum	42.2	1.15	36.1
Maximum	49.3	1.17	42.8
Average	44.3	1.16	38.1
RSS	2.18	0.005	1.97

Distribution of the maximum burnup in the diagonal directions in fuel rods of fuel assembly 135

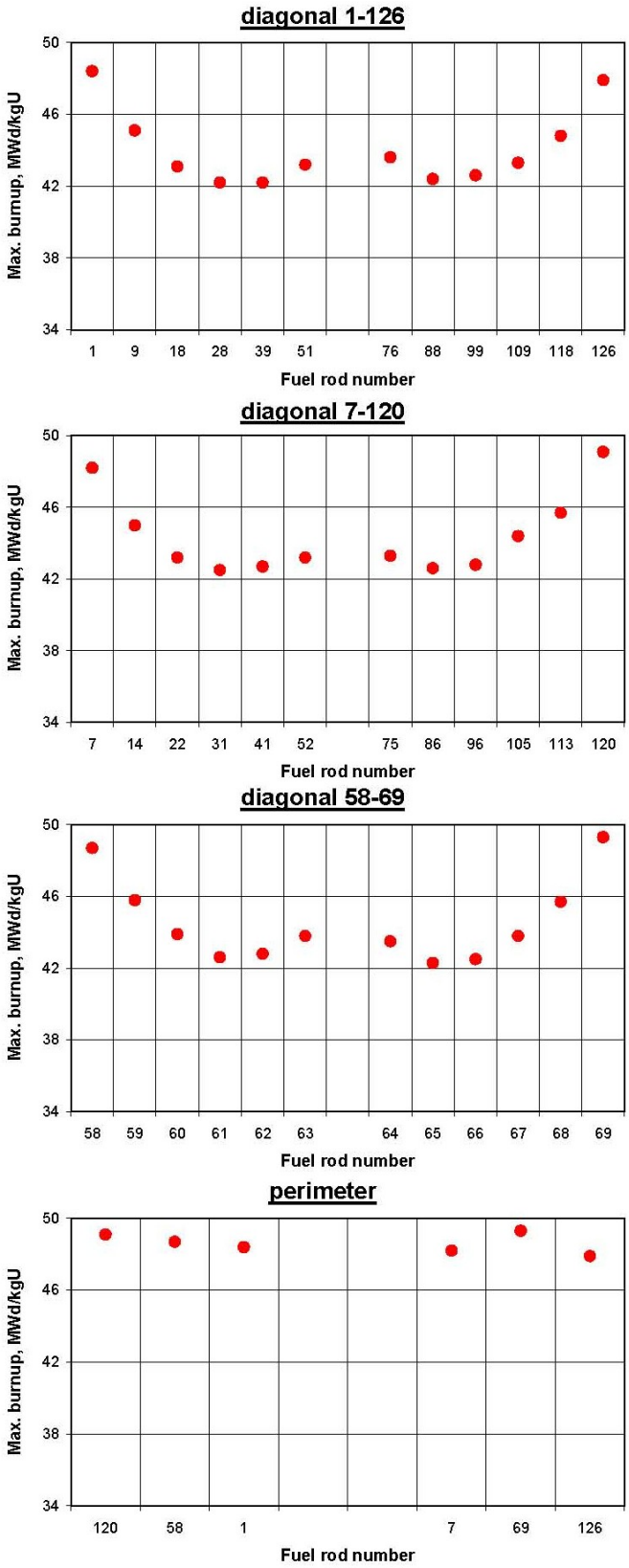


Fig.3

Distribution of average burnup in the diagonal directions in fuel rods of fuel assembly 135

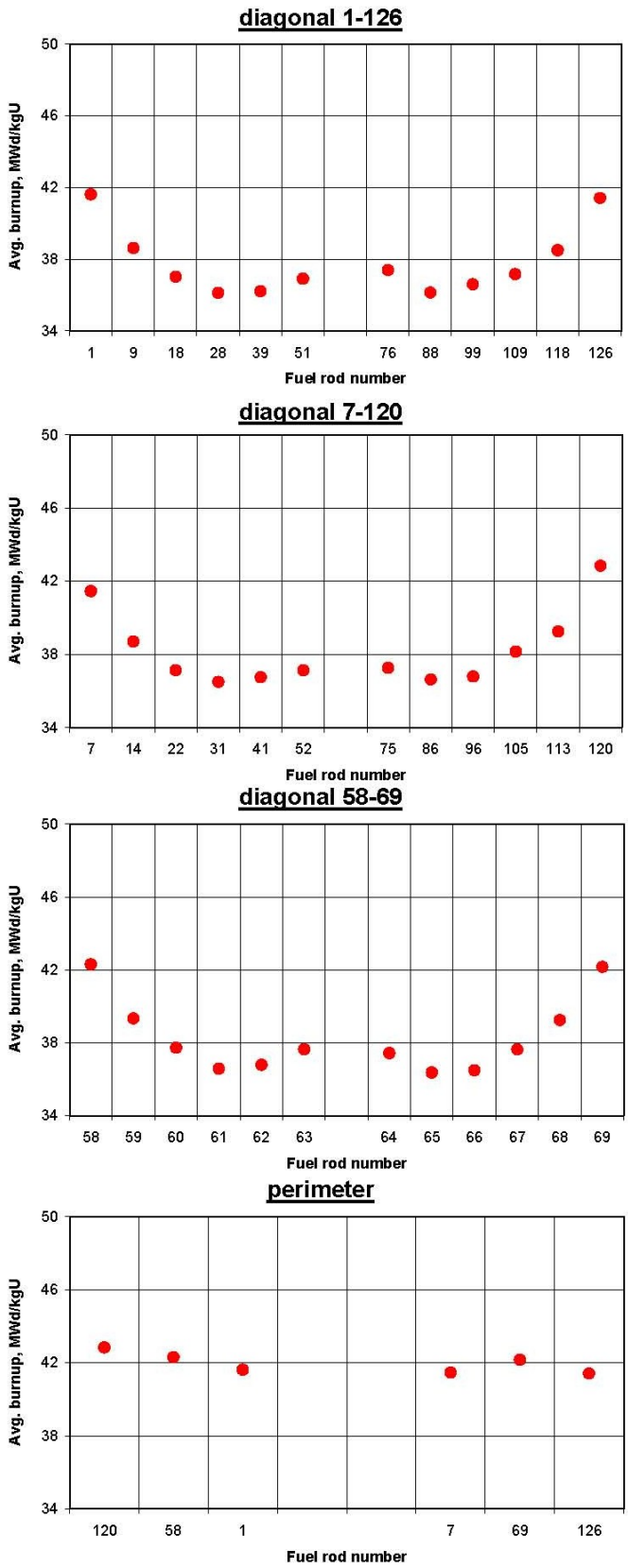


Fig.4

4. Preparation of fuel samples

Distributions of Cs-137 (that is a burnup monitor) along the length of selected fuel rods are shown in Fig.5-8. Based on the abnormal distributions, 8 samples are taken for quantitative analysis of fuel isotopic composition:

- Three samples are cut out from the lower, central and upper part of the fuel column (on the coordinates of ~100, ~1000 mm and ~2150 mm from the fuel rod lower part) of fuel rod fuel rod 69 having the maximum burnup over the FA bundle cross-section);
- Three samples are cut out from the same areas of fuel rod 65 having the minimum burnup;
- One sample is cut out from the central part of fuel column in fuel rod 67 having an intermediate burnup;
- One sample is cut out from the central part of fuel column in fuel rod 68 having an intermediate burnup.

Analysis of selected samples will allow for obtaining information about content of fissile materials and fission products in fuel having a burnup from~22 up to ~49 MWd/kgU.

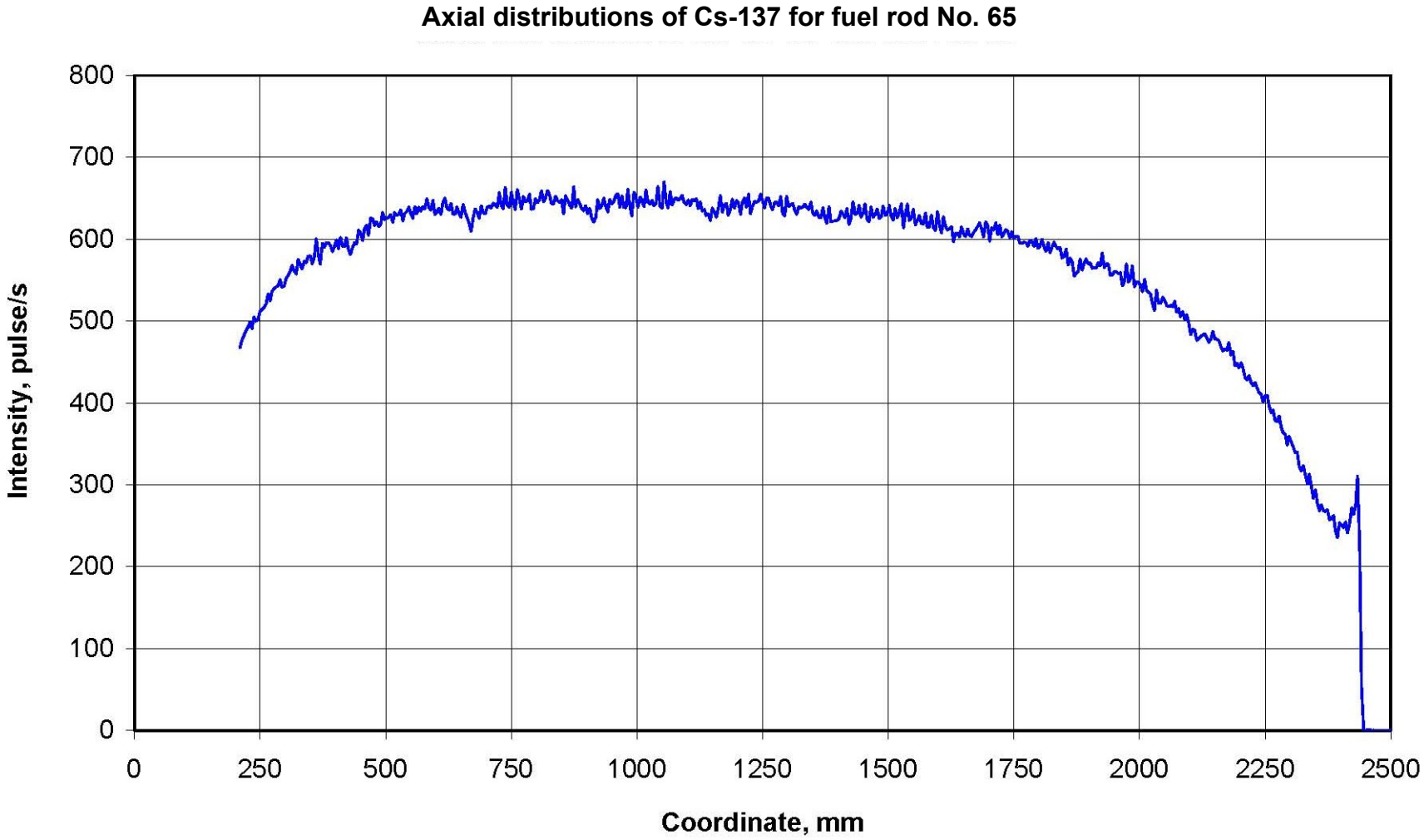

Axial distributions of Cs-137 for fuel rod No. 65
Intensity, pulse/s
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Coordinate, mm

Fig.5

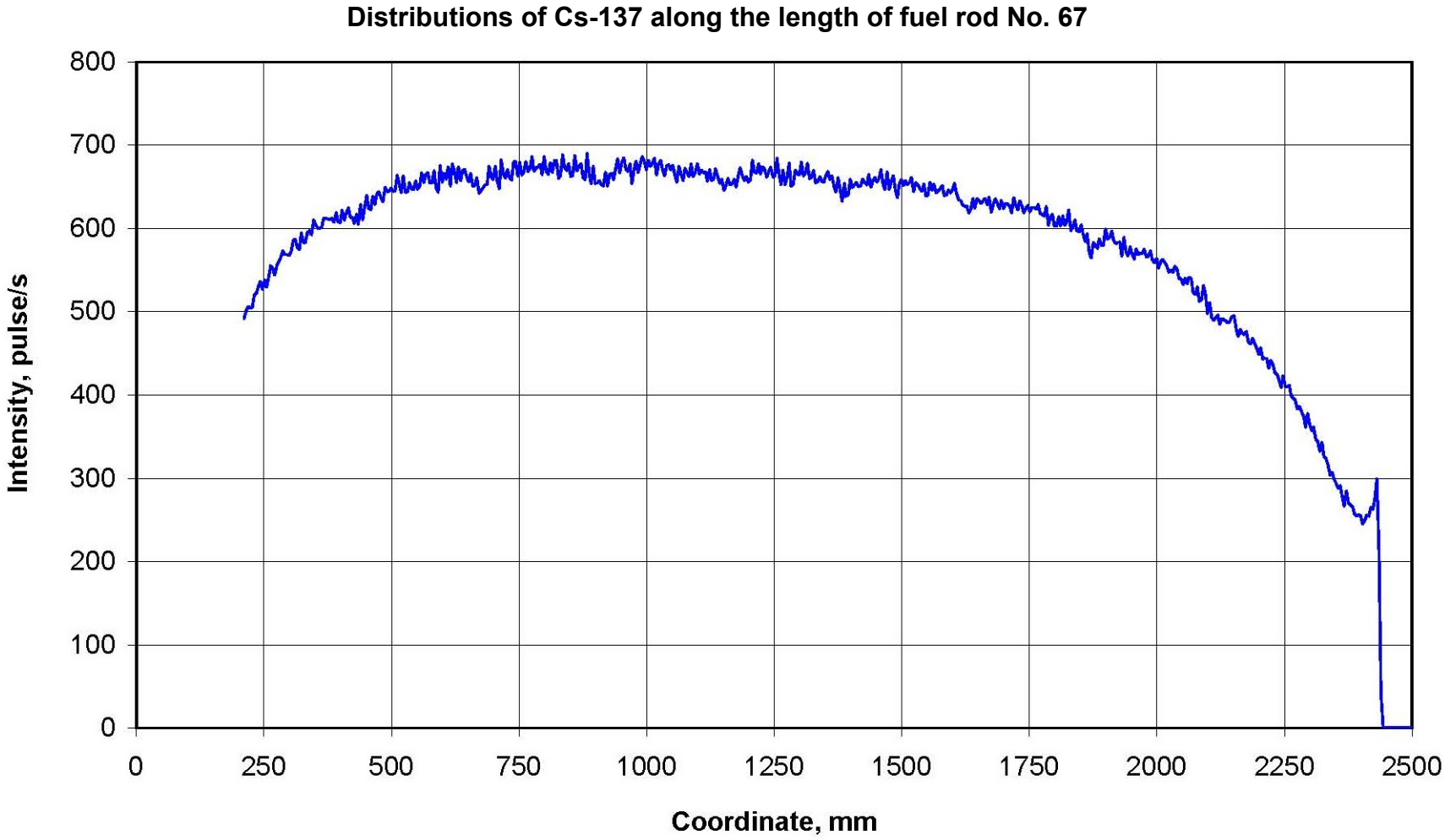

Distributions of Cs-137 along the length of fuel rod No. 67
Intensity, pulse/s
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Coordinate, mm

Fig.6

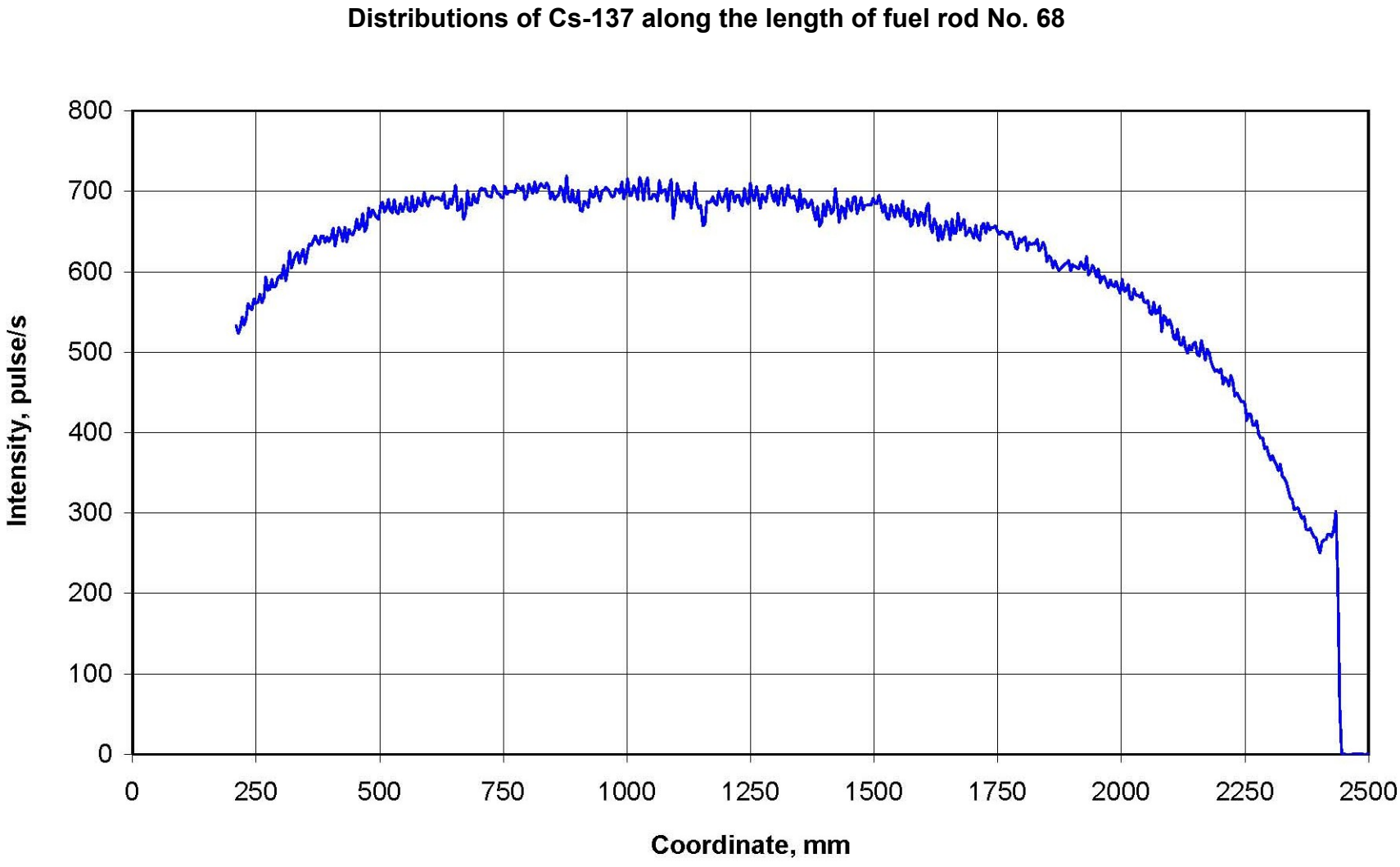

Distributions of Cs-137 along the length of fuel rod No. 68
Intensity, pulse/s
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Coordinate, mm

Fig.7

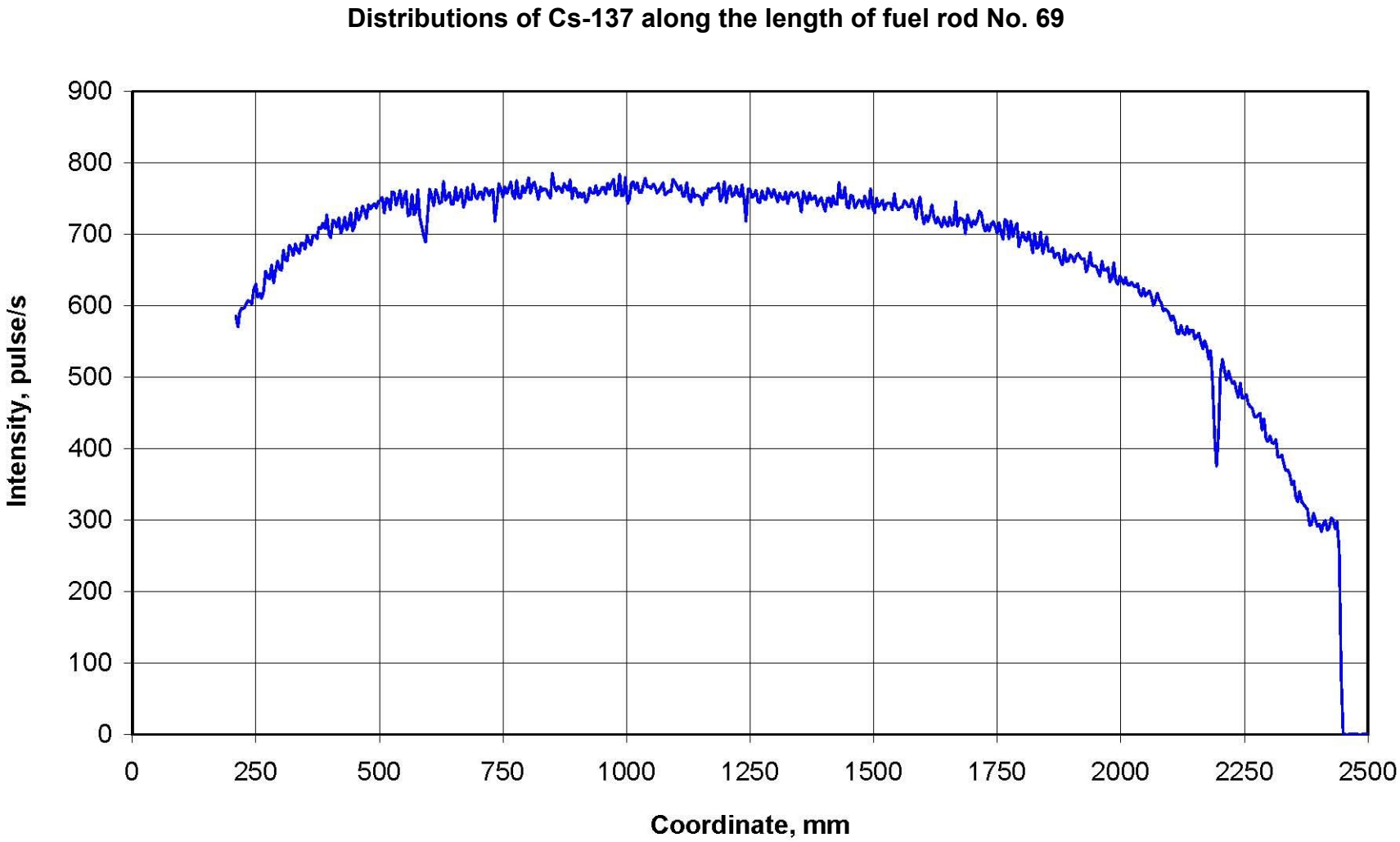

Distributions of Cs-137 along the length of fuel rod No. 69
Intensity, pulse/s
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Coordinate, mm

Fig.8

Conclusion

Analysis of technical and operating characteristics of VVER-440 fuel assembly was performed in the framework under task 1 (Project 2670p) in order to select fuel rods for non-destructive examinations, fuel burnup measurement and nuclide composition analysis. The following activities were carried out based on the obtained results:

1. Fuel assembly 13626135 with the initial fuel enrichment of 3.6% U-235 that was operated in the forth power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles up to a burnup of ~38.5 MWd/kgU was selected for examination.
2. Four fuel rods (No.65, 67, 68 and 69) were selected for non-destructive and destructive examinations. Fuel rod 69 had the maximum fuel burnup for this type of fuel assembly. Fuel rod 65 had the minimum burnup. Fuel rods 67 and 68 had the intermediate burnups.
3. Sampling coordinates was established for 8 fuel samples to make the radiochemical analysis. Fuel samples are taken on the coordinates of ~100, ~1000 and ~2150mm from the lower part of fuel rods 65 and 69. Fuel samples are taken on the coordinate ~1000mm from the lower part of fuel rods 67 and 68.

References:

1. V.S.Vnukov and B.G.Ryasanov. Difficulties and experience in nuclear safety ensuring during NPP spent fuel storage. Atomnaya energiya, Vol.91, edition 4, October 2001.
2. Regulations on safe storage and transportation of nuclear fuel at nuclear facilities. ПНАЭ Г-14-025-91, M., TSNIIatominform, 1992.
3. Marcova L. VVER-related burnup credit calculation. – Jn: JCNC'99, Versailles, France, 1999.

Project manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2003

Initial condition of VVER-440 working assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles

Interim progress report, Task No. 2

VVER Burnup Credit Project (2670p)

Part 2

Dimitrovgrad, 2003

Abstract

The present report includes 14 pages, 2 figures and 6 tables.

Key words: VVER Burnup Credit Project, VVER-440 spent fuel, measurement of burnup, nuclide composition and isotopic mass.

The report describes the initial condition of component parts in VVER-440 working assembly No.13626135 (hereinafter referred to as FA 135) that was operated up to the average burnup of 38.5 MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Pellet geometry, nuclide and chemical compositions of fuel as well as parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole are given here.

Table of contents

Introduction..... 4

1. Description of initial fuel parameters..... 4

2. Parameters of fuel rods..... 6

3. Working assembly parameters..... 8

Conclusion..... 14

Introduction

Since 1987 fuel assemblies provided with zirconium spacer grids have been subjected to testing in the 4th power unit of Novovoronezh NPP in the course of 15th-fuel cycle. One of these fuel assemblies operated up to the average burnup of 38.5 MWd/kgU in the course of 4 fuel cycles (15th-18th fuel cycles) was transported to the SSC RF RIAR and examined in the material science laboratory after 3 years of cooling in the storage pool.

The working assembly No.13626135 (hereinafter referred to as FA 135) was fabricated in June 1987.

The irradiation conditions of FA 135 were standard ones i.e. any deviations from the performance specifications weren't noticed during operation. Twelve years passed (July 1991) since the working assembly removing from the reactor core. Thus, the working assembly is typical of the majority of fuel assemblies, which are stored in NPP storage pools.

1. Description of initial fuel parameters

Pellets made of the sintered uranium dioxide with enrichment of 3.6% U-235 were used as fuel.

Two batches of cladding tubes (985-6-1/2 and 1091-6-1/2) and one fuel batch (350512) were used for fabrication of FA 135 fuel rods.

Pellet geometry of working assembly No.135, nuclide and chemical compositions of fuel, parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole are given in Table 1-3.

Table 1

Geometrics of FA 135 pellets

Parameter	Value		
	maximum	**average**	**minimum**
Outer diameter, mm	7.60	7.565	7.53
Length, mm	14	11	8
Central hole diameter, mm	$1.2^{+0.8}$		
Pellet shape	It is 0.2…0.5 mm with facet, leg of a triangle and angle of $25^0 \pm 5^0$.		

Table 2

Isotopic composition of FA 135 fuel

Parameter	Value
UO_2 mass in fuel assembly before irradiation, kg	134.76
Uranium mass in fuel assembly before irradiation, kg	118.49
U-235 mass in fuel assembly before irradiation, kg	4.25
Mass fraction of uranium isotope mixture, %	No less than 87.7
U-235 mass fraction in the mixture of uranium isotopes, %	3.60 ± 0.05
U-236 mass fraction in uranium, %	No more than 0.1
U-234 mass fraction in uranium	It isn't normalized
Density, g/cm^3	10.40 – 10.80
Oxygen coefficient	2.000…2.015

Table 3

Chemical composition of FA 135 fuel

Parameter	Value
Mass fraction of impurities with reference to uranium, %, no more than	
Nitrogen	0.02
Boron	0.00004
Iron	0.06
Silicon	0.025
Manganese	0.002
Copper	0.005
Nickel	0.015
Carbon	0.01
Fluorine	0.005
Chromium	0.01
Total boron equivalent, %, no more than	0.00018

Fabrication procedure

Pellet fabrication process includes the following basic operations:

1. Checking of source materials with documenting.
2. Preparation of plasticizing agent and control of parameters (heating temperature, time of plasticizing substance dissolution in water and solution density).
3. Preparation of moulding powder that consists in the mixture of uranium dioxide and plasticizing agent and control of parameters (quantity of mixable components and mixing time, compaction pressure, temperature and period of drying, bulk density and mass fraction of water).
4. Pellet pressing and control of parameters (check of extrusion toolage, compacting pressure, diameter, height, appearance, form and density of pellets).
5. Pellet sintering and control of parameters (temperature and time in drying and sintering furnaces, hydrogen flow rate and excess pressure in the furnaces, selection check of the sintered pellet diameter and density).
6. Pellet polishing.
7. Diameter grading of pellets using automated screening machinery.
8. Quality control of pellets: oxygen-uranium ratio, uranium content, isotopic composition, visual check of the form to establish compliance with reference samples, density, diameter and height of pellets, moisture content.
9. Drawing up of a certificate and packing of pellets.

2. Parameters of fuel rods

Zr-1%Nb alloy was used as material of claddings and end couplings. Lower end surfaces of fuel rods were sealed using electron-beam welding but the upper end surfaces were sealed using electric resistance welding. Sintered pellets made of uranium dioxide and provided with facets at the end surfaces were used as fuel. Fuel column holders were made of 08X18H10T steel (State Standard GOST 5632-72).

Fig.1 is the sketch of fuel rod; parameters of fuel rod are given in Table 4.

Table 4

Sketch of FA 135 fuel rod

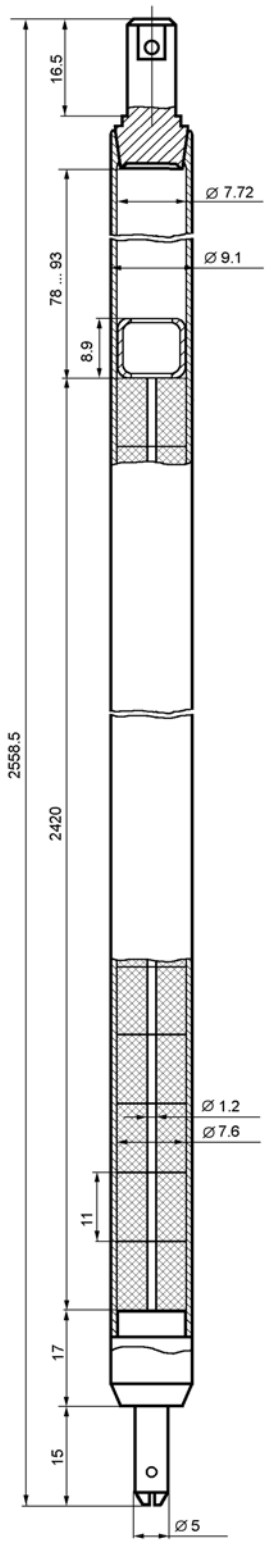


Fig.1

Parameters of FA 135 fuel rod

Length, mm	2558.5
Fuel rod mass, g	1410
Fuel material	UO_2
Fuel column length, mm	2420
Gas plenum length, average, mm	86
Fuel pellet size, mm -outer diameter -height	 7.6 8÷14
Central hole diameter, mm	1.2
Pellet shape	With facet
Cladding material Outer diameter of fuel rod, mm Inner diameter of cladding, mm	Zr-1%Nb 9.1 7.72
Gas-filler	helium
Helium pressure in fuel rod, MPa Space volume in fuel rod, cm^3	0.5-0.7 16.7 – 17.2
Sealing of the upper end-cap	Electric resistance welding
Sealing of the lower end-cap	Electron-beam welding

3. Working assembly 135 parameters

The working assembly is made up of the bundle of fuel rods, head piece, tail piece and wrapper. Fuel rods as a bundle are arranged on the triangular grid and united with ten spacer grids, which are attached to the central tube. The upper grid is fastened by spacers to the head piece using welding and lower support grid is attached to the tail piece. Fuel rods as well as the central tube are attached to the lower grid using pin wire. The lower support grid is welded on the tail piece that is meant for working assembly insertion at the bottom of the reactor core. The tail piece pivots the tapered part of the seating. The tail part of the working assembly is provided with the guide pin and the core support barrel bottom has got a groove for fuel assembly orientation during its insertion in the reactor core cell.

The head and tail pieces are fastened by screws to the wrapper on the hexahedral surface. The screws are welded to prevent self-unscrewing.

The head piece of the working assembly has got two pins for shipping gripper of the fuel-handling machine and spring-loaded supports, which prevent the working assembly floating-up. Supports work as the expansion joints and technological tolerance compensator in the reactor internals. A protective grid is attached to the lower end of the head piece.

Zirconium alloys are used for fabrication of fuel rod claddings and end couplings, spacer grids, central tube and wrapper. Other units are made of stainless steel.

Fuel makes up a column of sintered uranium dioxide pellets provided with an axial hole. Fuel column is fixed to prevent its displacement during shipment.

Fig.2 is the sketch of the working assembly. Characteristics of the main component parts of the assembly are given in Table 5.

Characteristics of the fuel column are represented in Table 6.

Working assembly 135 sketch

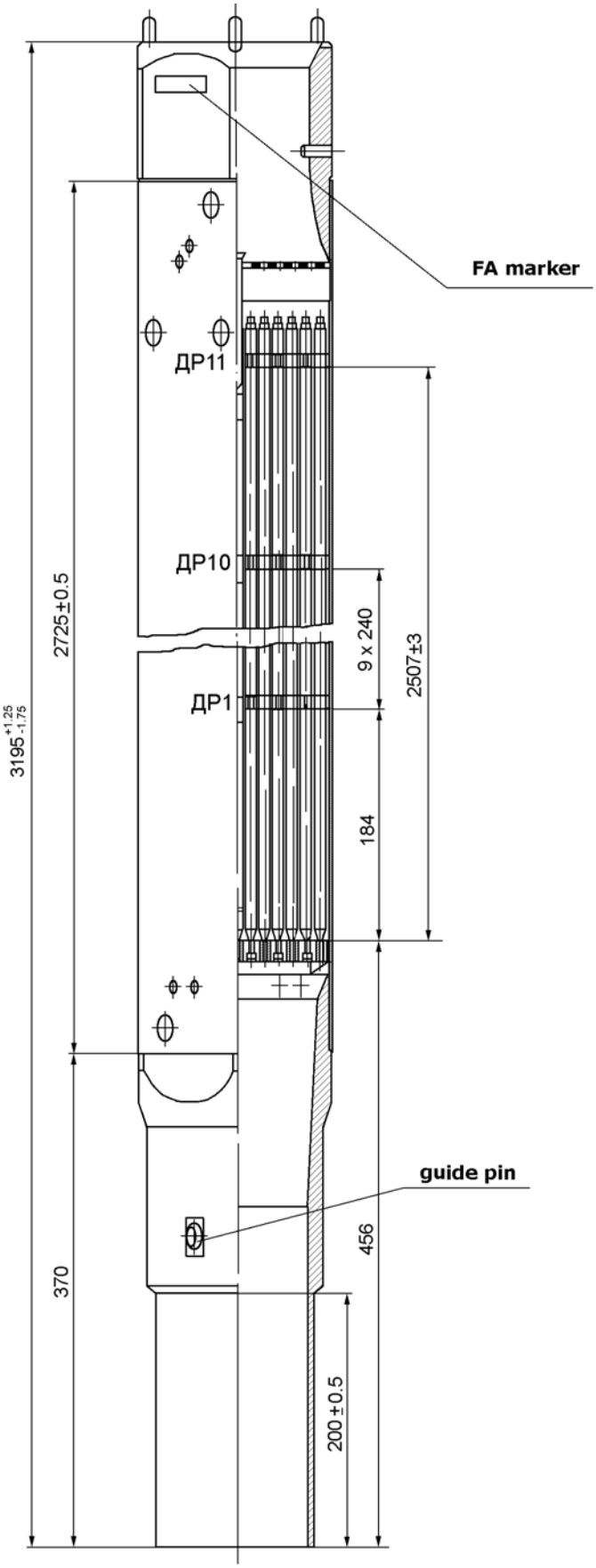


Fig.2

Table 5

Working assembly 26135 characteristics

Position No.	Name	Value
1	**Fuel assembly**	
1.1	Serial No	13626135
1.2	Fabrication date	1987
1.3	Fuel enrichment, ^{235}U, %	3.6
1.4	Fuel assembly length	3217
1.5	Number of fuel rods	126
1.6	Number of spacer grids	11
2	**Wrapper**	
2.1	Length, mm	2725
2.2	Across flats dimension, mm	144.2
2.3	Wrapper sheet thickness, mm	2.0
2.4	Wrapper fastening to the end couplings	Screws (12 screws from each end of the wrapper)
3	**Spacer grid**	
3.1	Across flats dimension, mm	138.73 max
3.2	Cell height, mm	10
3.3	Cell diameter, mm	8.90
3.4	Thickness of the cell wall, mm	0.3
3.5	Hoop availability	Absent
3.6	Material	Zr-1%Nb alloy
4	**Central tube**	
4.1	Length, mm	2565
4.2	Outer diameter, mm	10.3
4.3	Inner diameter, mm	8.8
4.4	Material	Zr-1%Nb alloy
5	**Fuel rod**	
5.1	Length, mm	2558.5
5.2	Outer diameter, mm	9.1
5.3	He initial pressure, MPa	0.5…0.7
5.4	Cladding material	Zr-1%Nb alloy
6	**Fuel pellet**	
6.1	Material	Uranium dioxide
6.2	Length, mm	8…14
6.3	Outer diameter, mm	7.6
6.4	Central hole diameter, mm	1.2
6.5	Facet availability	Available
6.6	Mean density, g/cm^3	10.6

Table 6

Fuel column characteristics in FA 26135 fuel rods

Fuel rod number	Serial number of fuel rod	Uranium dioxide mass, g	Uranium isotopes mass, g	U-235 mass, g
1	749201	1065	936.5	33.6
2	748707	1067	938.2	33.7
3	748716	1077	947	34
4	748759	1067	938.2	33.7
5	748708	1077	947	34
6	748738	1066	937.3	33.6
7	748749	1069	940	33.7
8	748743	1067	938.2	33.7
9	748712	1074	944.4	33.9
10	748746	1066	937.3	33.6
11	748761	1067	938.2	33.7
12	748752	1073	943.5	33.9
13	748747	1066	937.3	33.6
14	748726	1066	937.3	33.6
15	748737	1066	937.3	33.6
16	748740	1068	939.1	33.7
17	748755	1065	936.5	33.6
18	748756	1068	939.1	33.7
19	748724	1067	938.2	33.7
20	748758	1065	936.5	33.6
21	748750	1067	938.2	33.7
22	748735	1068	939.1	33.7
23	748727	1066	937.3	33.6
24	748727	1067	938.2	33.7
25	748713	1066	937.3	33.6
26	748729	1074	944.4	33.9
27	748734	1068	939.1	33.7
28	748719	1073	943.5	33.9
29	748730	1067	938.2	33.7
30	748732	1076	946.1	34
31	748720	1068	939.1	33.7
32	748742	1068	939.1	33.7
33	748748	1066	937.3	33.6
34	748711	1068	939.1	33.7
35	748714	1068	939.1	33.7
36	748718	1074	944.4	33.9
37	748736	1068	939.1	33.7
38	748764	1073	943.5	33.9
39	748762	1067	938.2	33.7
40	748733	1068	939.1	33.7
41	748717	1066	937.3	33.6
42	748739	1073	943.5	33.9
43	746445	1073	943.5	33.9

Fuel rod number	Serial number of fuel rod	Uranium dioxide mass, g	Uranium isotopes mass, g	U-235 mass, g
44	746453	1071	941.7	33.8
45	746493	1068	939.1	33.7
46	746481	1065	936.5	33.6
47	746463	1068	939.1	33.7
48	746501	1069	940	33.7
49	746492	1066	937.3	33.6
50	746470	1070	940.9	33.8
51	746449	1070	940.9	33.8
52	746484	1075	945.2	33.9
53	746456	1072	942.6	33.8
54	746471	1065	936.5	33.6
55	746475	1070	940.9	33.8
56	746461	1070	940.9	33.8
57	746502	1065	936.5	33.6
58	746476	1069	940	33.7
59	746495	1070	940.9	33.8
60	746482	1067	938.2	33.7
61	746446	1069	940	33.7
62	746447	1069	940	33.7
63	746483	1072	942.6	33.8
64	746488	1068	939.1	33.7
65	746486	1067	938.2	33.7
66	746460	1069	940	33.7
67	746477	1069	940	33.7
68	746499	1066	937.3	33.6
69	746489	1070	940.9	33.8
70	746500	1065	936.5	33.6
71	746468	1068	939.1	33.7
72	746494	1070	940.9	33.8
73	746473	1071	941.7	33.8
74	746454	1072	942.6	33.8
75	746478	1069	940	33.7
76	746455	1065	936.5	33.6
77	746479	1065	936.5	33.6
78	746450	1075	945.2	33.9
79	746457	1069	940	33.7
80	746469	1071	941.7	33.8
81	746480	1071	941.7	33.8
82	746496	1074	944.4	33.9
83	746467	1068	939.1	33.7
84	746458	1073	943.5	33.9
85	749054	1074	944.4	33.9
86	749003	1066	937.3	33.6
87	748998	1066	937.3	33.6
88	749042	1071	941.7	33.8

Fuel rod number	Serial number of fuel rod	Uranium dioxide mass, g	Uranium isotopes mass, g	U-235 mass, g
89	749001	1066	937.3	33.6
90	749051	1074	944.4	33.9
91	749029	1065	936.5	33.6
92	749033	1068	939.1	33.7
93	749010	1069	940	33.7
94	749025	1077	947	34
95	749039	1067	938.2	33.7
96	749022	1071	941.7	33.8
97	749035	1068	939.1	33.7
98	749009	1073	943.5	33.9
99	749044	1075	945.2	33.9
100	749040	1075	945.2	33.9
101	749000	1075	945.2	33.9
102	749027	1067	938.2	33.7
103	749046	1073	943.5	33.9
104	749050	1075	945.2	33.9
105	749006	1069	940	33.7
106	749034	1072	942.6	33.8
107	749004	1066	937.3	33.6
108	748997	1066	937.3	33.6
109	749014	1070	940.9	33.8
110	749013	1065	936.5	33.6
111	749015	1072	942.6	33.8
112	748999	1076	946.1	34
113	749053	1078	947.9	34
114	749048	1073	943.5	33.9
115	749017	1070	940.9	33.8
116	749023	1073	943.5	33.9
117	749043	1070	940.9	33.8
118	749028	1068	939.1	33.7
119	749002	1066	937.3	33.6
120	749018	1069	940	33.7
121	749008	1076	946.1	34
122	749026	1071	941.7	33.8
123	749019	1069	940	33.7
124	749016	1071	941.7	33.8
125	749021	1070	940.9	33.8
126	749011	1071	941.7	33.8
	Сумма:	**134759**	**118494**	**4252.4**

Conclusion

The present report describes the initial condition of component parts in VVER-440 working assembly No.13626135 that was operated up to the average burnup of 38.5 MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Pellet geometry, nuclide and chemical compositions of fuel as well as parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole are given here.

Project Manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2003

Irradiation history of

VVER-440 working assembly No.13626135
operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU
in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles

Interim progress report, Task No. 3

VVER Burnup Credit Project (2670p)

Part 3

Dimitrovgrad 2003

Abstract

The present report includes 74 pages, 9 figures and 60 tables.

Key words: VVER Burnup Credit Project, VVER-440 spent fuel, operation history, measurement of burnup and nuclide composition.

The presented materials describe the results of work under Task 2 of the Work Plan for the Project “Chemical Assays of Irradiated VVER Fuel For Use In Burnup Credit”. Investigations and calculations were made for VVER-440 working assembly No13626135 that was operated in the 4th power unit of Novovoronezh NPP.

Table of Contents

Introduction	7
1. Applicable system of computer codes, accepted approximations	8
2. Prehistory of reactor operation within 1-14 core loadings	9
3. Operation history within 15-18 core loadings and neutron-physical characteristics of fuel rods under examinations	9
Conclusion	24
References	24

Symbols used in the report

NPC - Neutron-physical characteristics
CR - control rod
CPS - reactor control and protection system
FA - fuel assembly
FA ARK - fuel tailpiece of CPS CR
MCL - minimum-controllable power level of the reactor
B - fuel burnup, MWday/kgU
BOC - beginning of fuel cycle
EOC - end of fuel cycle
C_B - boron concentration in the coolant
C_{H3BO3} - concentration of boric acid in coolant
$H_{control}$ - position of the CPS control rod bank (it is found as difference in heights between the upper fuel boundary in FA ARK and lower fuel boundary in the operating fuel assemblies)
K_q - non-uniformity of FA power (for 349 FAs), relative power value in the particular FA
$\overline{K}_q$ - average power of peripheral fuel assemblies, relative units
K_V - non-uniformity of power distribution in the reactor core volume (for 8725 nodes), relative power value of a particular node
PSI - non-uniformity of power distribution in the reactor core volume (for 8725*126 nodes), relative power value of a particular node in fuel rod, rel.units
Bur burnup fraction value for node in fuel rod 349*25*126 (1 node is equal to 9.76cm with height), MWday/kgU
K_k - non-uniformity of fuel rod linear power over the FA cross-section
$\overline{q_l}$ - average linear power value of fuel rods in the reactor, W/cm
q_l^{max} - maximum linear power value of fuel rod, W/cm

$$q_l^{max} = \overline{q_l} * \max(K_V * K_k) * K_{eng} * K_N$$

$q_l^{allowed}$, $Q_l^{allowed}$ - allowed liner power value of fuel rod, W/cm
K_{eng} - margin factor of possible calculated value X error (K_q, K_V, K_k, max(K_V* K_k), max(K_q* K_k) etc can be implied by X)
KN - margin factor of the reactor power uncertainty (KN=1.04)
$K\Delta t$ - margin factor of the coolant flow-rate uncertainty
K_0 - neutron multiplication factor
K_{eff} - effective neutron multiplication factor (neutron multiplication factor in the reactor)
ρ - reactivity
$T_{effective}$ FPD - effective operating time of core load, effective days
T_{in}, T_{inlet} - coolant inlet temperature, ^oC
T_{outlet} - average coolant temperature at the FA outlet

$\partial\rho/\partial\gamma$ - coefficient of reactivity for coolant density

$\partial\rho/\partial t$ - coefficient of reactivity for coolant temperature

$\partial\rho/\partial t_U$ - coefficient of reactivity for distributed fuel temperature

$\partial\rho/\partial t_U{}^*$ - coefficient of reactivity for average fuel temperature

$\partial\rho/\partial N_U$ - coefficient of reactivity for the reactor power without reference to coolant preheating

$\partial\rho/\partial N_B$ - coefficient of reactivity for the reactor power with regard to coolant preheating at the constant core inlet temperature

$\partial\rho/\partial N_{KB}$ - coefficient of reactivity for the reactor power with regard to coolant preheating at the constant average core temperature

$\partial\rho/\partial C$ - coefficient of reactivity for boric acid concentration

$\beta_{effective}$ - Effective delayed-neutron fraction

l_{prompt} - Mean prompt lifetime

Nk - FA number

Nz - Number of calculated zone throughout the height

Xe, NXE - index of Xe-135 effect allowance

= 0 - without poisoning

= 1 - Xe equilibrium concentration

=-1 - Xe concentration is taken from the previous state

=-2 - Xe concentration is calculated during burnup process at the present moment of core life

Sm, NSM - index of Sm-149 effect allowance

= 0 - without poisoning

= 1 - Sm equilibrium concentration,

= 2 - Sm gradual accumulation accounting

= 3 - Pm в Sm decay at the beginning of life followed by gradual Sm accumulation

=-1 - Sm concentration is taken from the previous state

=-2 - Sm concentration is calculated during burnup process at the present moment of core life

Agreed symbols at the schematic view of core load

N	- FA number at the schematic view
Type	- FA type in accordance with Table 2.1 and year of its operation
δ	- difference between the calculated FA power value and measured one ($\delta = Q_{calc.}/Q_{measured} - 1$)
Previous N	- FA number in the previous core load
BOC	- beginning of cycle
EOC	- end of cycle
Burnup	- average fuel burnup in fuel assembly, MWd/kgU
Relative power	- relative fuel assembly power
Preheating	- coolant preheating in fuel assembly ($T_{outlet} - T_{inlet}$)
T_{EBC} , T_{EOBC}	- end of boron campaign of the core load
T_{KP}, T_{EOSC}	- end of core life based on the reactivity margin exhaustion
T_{KK}, T_{EOC}	- end of core life with regard to its prolongation
UGR	- fuel element incorporating UO_2 and Gd_2O_3

Introduction

The analysis of spent nuclear fuel properties and isotopic compositions is a very important stage for the nuclear fuel cycle itself (fabrication, operation, shipment, storage and dismantling of fuel assemblies) as well as for neutron-physical calculations of VVER-type reactor cores and their reliability improvement. This report is devoted to calculation of neutron-physical characteristics of fuel rods under examination. These fuel rods made a part of fuel assembly that was operated in the 4th power unit of Novovoronezh NPP within 15th-18th core loads.

The following data were used for performance of this work:

- Design characteristics of the fuel assembly under examination;
- Operation history of the reactor up to 15th core load (schematic views of core loads, rearrangement diagrams of all fuel assemblies, duration of core loads, reactor power, coolant temperature in the reactor, coolant flow-rate through the reactor, position of operating control rod bank, criticality parameters of the reactor cores);
- Operation history of the reactor from 15th up to 18th core loads (schematic views of core loads, rearrangement diagrams of all fuel assemblies, duration of core loads, reactor power, coolant temperature in the reactor, coolant flow-rate through the reactor, position of operating control rod bank, criticality parameters of the reactor cores).

Neutron and physical calculations were made for each fuel rod and each fuel assembly of all core loads using a package of computer codes such as BIPR-7A – PERMAK-A. Data library incorporating neutron and physical characteristics of fuel assemblies and fuel rods was prepared also.

The following characteristics of fuel rods under examination were found as a result of performed work:

- distribution of fuel burnup with height;
- distribution of fast neutron fluence;
- linear power distribution;
- cladding temperature values,

as well as the relationship between the burnup and average isotopic composition throughout the fuel assembly.

1. Applicable system of computer codes, accepted approximations

All described below physical calculations were made using a package of computer codes BIPR-7A [1], PERMAK-A [2] and TVS-M [3] program that was certified in Russia.

The computer code BIPR-7A provided with a wide grid (in terms of assembly by assembly arrangement) was used for:

- Computational simulation of the reactor operation;
- Calculation of the main neutron-physical characteristics of the core loads.

The multi-level two-dimensional and four-group computer code PERMAK-A provided with a fine grid was used for calculation of energy release field and fuel burnup distributions over the reactor core cross-section in each fuel rod. Additional utility programs for the computer code PERMAK-A were used to obtain distribution data on fast neutron fluence and cladding temperature values.

The multigroup spectral program TVS-M was applied for preparation of the required programs BIPR-7A and PERMAK-A to obtain multiparametric relations of small-group neutron cross-sections in the calculated cells.

Twenty-five computation layers throughout the reactor core height were used for calculations according to BIPR-7A. It allows for the representative accounting of differences in fuel column heights of the operating FAs and FA ARK as well as availability of steel inserts at the FA ARK upper parts and details of the FA ARK absorber-fuel tailpiece joint unit design.

The gained experience in the field of calculation data comparison with the data on VVER reactor startup and core load operation reveals that the estimated prediction errors of neutron-physical characteristics typical for VVER-440 core loads are not in excess of the following values according to the above-mentioned package of computer codes:

- Initial values of critical boron concentration	10 %;
- Efficiency of CPS CR in the course of measurement data processing with due consideration for space-time kinetics	10%;
- Temperature coefficient of reactivity	$3*10^{-5}C^{-1}$;
- Non-uniformities in FA power	5 %;
- Non-uniformities of fuel rod powers inside the fuel assembly	3 %;
- Xe-135 poisoning effect	10 %;
- Power effect of reactivity	15%;
- Secondary criticality temperature	20°C;
- Duration of the core loads (for the first transient load)	3% (5%)

2. Prehistory of reactor operation within 1-14 core loads

The calculations were made to ensure the representative features of the information related to fuel burnup distribution in the reactor core at the end of the 14th core load that is required for calculation of core loads (from the 15th up to 18th).

The results of these calculations are not included into the present report.

3. Operation history within 15-18 core loads and neutron-physical characteristics of fuel rods under examination

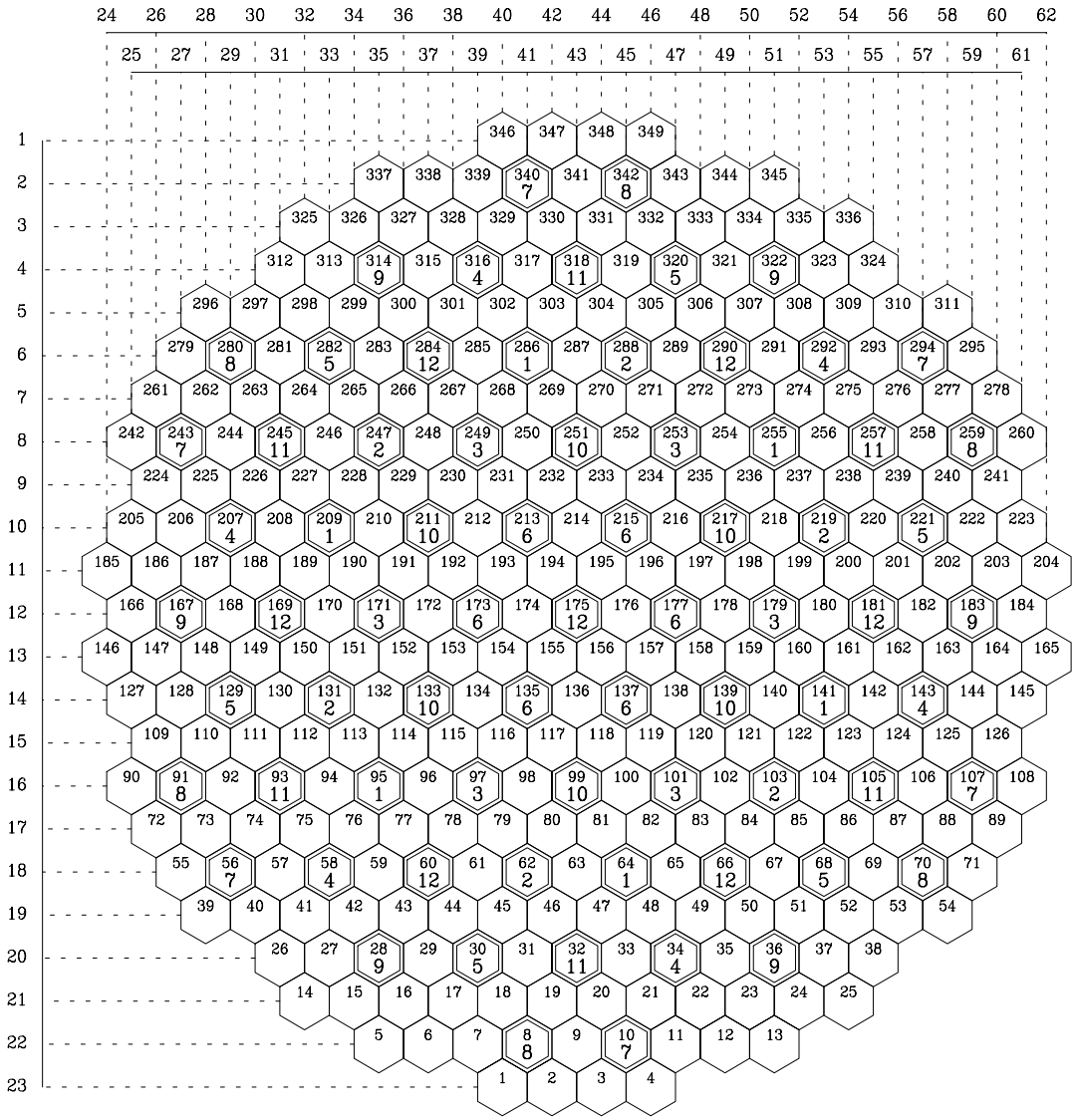
Fig.1 shows the schematic view of the reactor core with coordinate map. It is possible to follow a real displacement of the fuel assembly under examination in the reactor core that is:

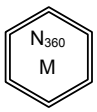
- Cell 21-38 during the 15th core load (cell 26 in 60 degrees symmetry);
- Cell 19-40 during the 16th core load (cell 24);
- Cell 19-40 during 17th core load (cell 24);
- Cell 16-45 during the 18th core load (cell 28).

It might be well to point out the dissymmetry of the 18th core load. All symmetric in fuel assembly cells 16-45 are the fuel assemblies of the third operation year but the fuel assembly under examination is the fuel assembly of the fourth operation year. This dissymmetry was not taken into consideration in calculation. Calculations were made under the conditions of 60 degrees symmetry. Orientation of the fuel assembly sides was considered in calculation of the neutron-physical characteristics for fuel rod under examination (64, 65, 67, 68 and 69).

Fig. 2 shows the enumeration of fuel rods inside the computational grid of the PERMAK-A computer code.

Schematic view of the VVER-440 reactor core





- FA number in 60 degrees symmetry
- Group number of control and protection system

Fig.1

Enumeration of fuel rods in fuel assembly 135 accepted for neutron-physical calculations

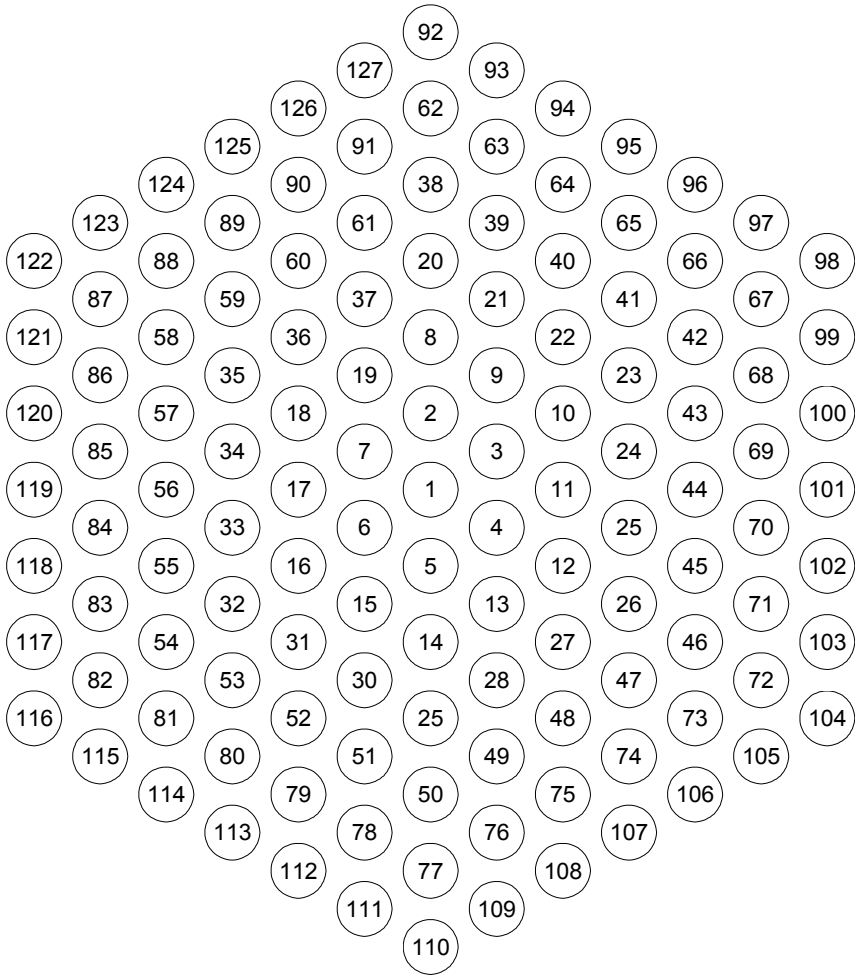


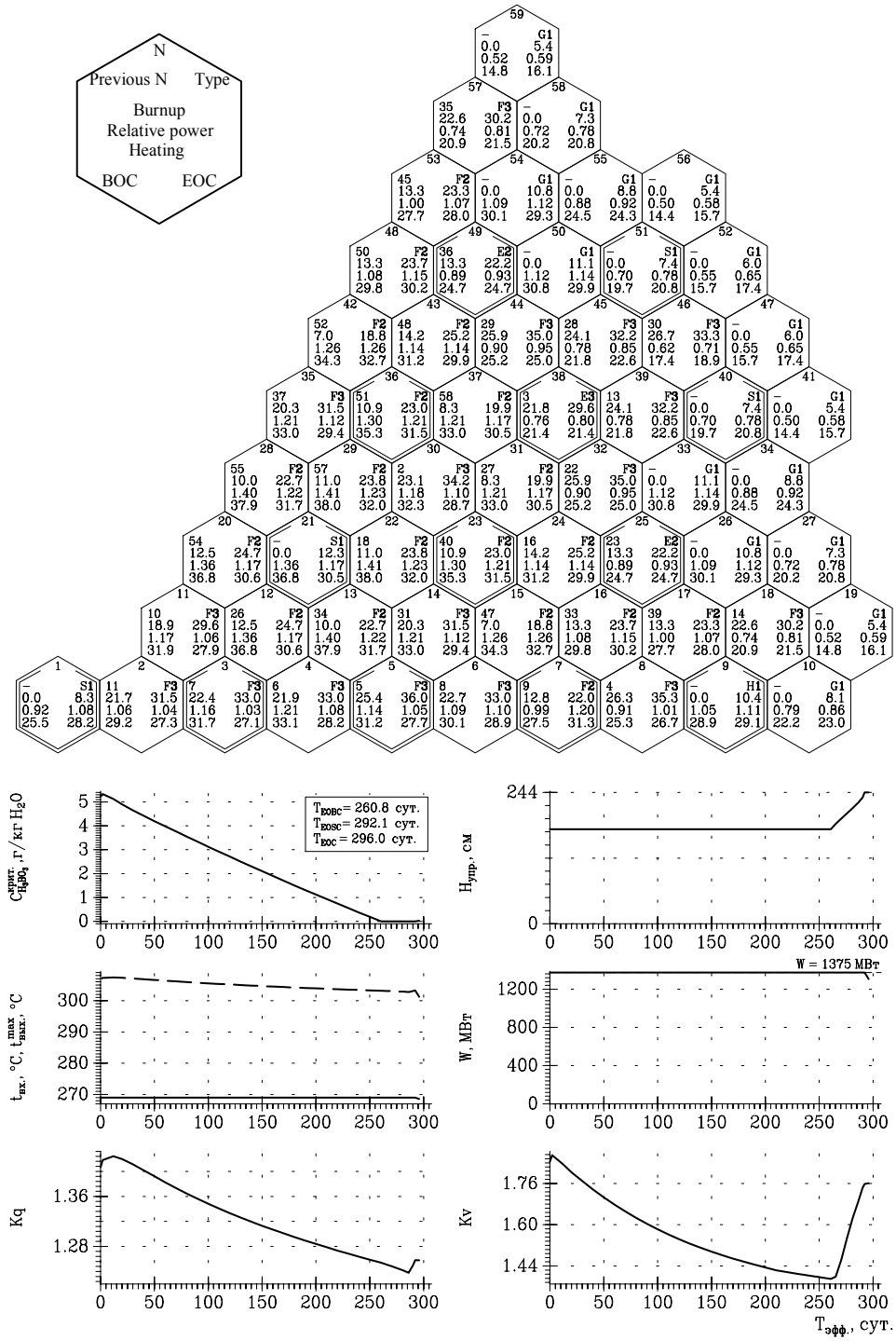
Fig.2

The results of calculation made for core loads 15-18 are included in Tables 1-8 and shown in Fig.3-6. They demonstrate the reloading procedures and change of the main neutron-physical characteristics (for the mentioned core loads during their operation period including simulation of the reactor operation prolongation at the power and temperature effects at the end of each core load operation).

The values of coolant preheating given in Fig.3-6 were found based on the following:

- Coolant flow-rate through the reactor makes up 44000 m^3/h,
- Coolant leakage fraction outside the fuel assembly is equal to 9 %,
- Coolant temperature at the reactor core inlet makes up 269 ^{O}C,
- Difference of the coolant flow-rates through the operating assembly and FA ARK is neglected.

History of the main NPC of the 15th core load during the reactor operation



- concentration of boric acid in coolant, g/kg;
- coolant inlet and outlet temperature, °C;
- FA relative power, K_q
- position of the CPS control rod ($H_{control}$), cm;
- reactor power, W;
- non-uniformity of power distribution in the reactor core volume, K_v

Fig. 3

Table 1

History of the main NPC of the 15th core load during the reactor operation

Xe=1, Sm=3

No	T_{eff} days	$H_{control}$ cm	T_{in} °C	W MW	C_{H3BO3} g/kg	G 10^{-2} m^3/h	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B_{avg} MWday/kgU	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} $1/(g/cm^3)$	$\partial\rho/\partial t$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_{U^*}$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(g/kg)	$\beta_{effective}$ $*10^2$	l_{prompt} $*10^5$ s
1	0.0	175.7	269.0	1375	5.22	440.	60	1.407	29	1.845	13	7	11.30	14.52	-22.29	-3.49	-2.71	-0.56	-0.84	-0.62	-1.48	1.10	15.18
2	2.0	175.7	269.0	1375	5.33	440.	60	1.418	29	1.870	28	7	11.37	14.48	-22.23	-3.52	-2.71	-0.56	-0.85	-0.62	-1.48	1.10	15.14
3	12.0	175.7	269.0	1375	5.12	440.	60	1.424	29	1.835	28	7	11.69	14.90	-23.04	-3.51	-2.73	-0.56	-0.86	-0.63	-1.48	1.09	15.17
4	20.0	175.7	269.0	1375	4.90	440.	60	1.420	29	1.803	28	7	11.96	15.33	-23.83	-3.49	-2.74	-0.56	-0.87	-0.63	-1.49	1.09	15.21
5	30.0	175.7	269.0	1375	4.65	440.	60	1.411	29	1.770	28	7	12.28	15.86	-24.79	-3.47	-2.75	-0.55	-0.87	-0.62	-1.49	1.09	15.25
6	40.0	175.7	269.0	1375	4.42	440.	60	1.402	29	1.737	28	7	12.61	16.39	-25.72	-3.46	-2.76	-0.55	-0.88	-0.62	-1.50	1.09	15.30
7	50.0	175.7	269.0	1375	4.20	440.	60	1.392	22	1.706	29	8	12.93	16.91	-26.66	-3.44	-2.77	-0.55	-0.89	-0.62	-1.51	1.09	15.34
8	60.0	175.7	269.0	1375	3.98	440.	60	1.383	29	1.678	29	8	13.26	17.43	-27.57	-3.42	-2.78	-0.55	-0.90	-0.62	-1.51	1.09	15.38
9	70.0	175.7	269.0	1375	3.77	440.	60	1.373	22	1.651	29	8	13.59	17.95	-28.50	-3.41	-2.80	-0.54	-0.90	-0.62	-1.52	1.09	15.43
10	80.0	175.7	269.0	1375	3.55	440.	60	1.365	22	1.627	29	8	13.91	18.47	-29.43	-3.40	-2.81	-0.54	-0.91	-0.62	-1.52	1.09	15.47
11	90.0	175.7	269.0	1375	3.34	440.	60	1.356	22	1.604	29	8	14.24	19.00	-30.37	-3.39	-2.82	-0.54	-0.92	-0.62	-1.53	1.09	15.52
12	100.0	175.7	269.0	1375	3.12	440.	60	1.348	22	1.582	29	8	14.57	19.52	-31.32	-3.38	-2.83	-0.54	-0.93	-0.62	-1.54	1.09	15.57
13	110.0	175.7	269.0	1375	2.92	440.	60	1.341	29	1.562	29	8	14.89	20.04	-32.25	-3.37	-2.84	-0.54	-0.94	-0.61	-1.54	1.09	15.61
14	120.0	175.7	269.0	1375	2.71	440.	60	1.333	22	1.544	29	8	15.22	20.55	-33.18	-3.36	-2.85	-0.54	-0.95	-0.61	-1.55	1.09	15.66
15	130.0	175.7	269.0	1375	2.50	440.	60	1.326	22	1.526	29	8	15.55	21.06	-34.11	-3.36	-2.86	-0.54	-0.96	-0.61	-1.55	1.09	15.70
16	140.0	175.7	269.0	1375	2.30	440.	60	1.320	22	1.510	29	7	15.87	21.57	-35.05	-3.35	-2.87	-0.53	-0.97	-0.61	-1.56	1.09	15.75
17	150.0	175.7	269.0	1375	2.10	440.	60	1.313	29	1.496	29	7	16.20	22.08	-35.98	-3.35	-2.88	-0.53	-0.98	-0.61	-1.57	1.09	15.80
18	160.0	175.7	269.0	1375	1.90	440.	60	1.307	22	1.482	22	7	16.53	22.58	-36.90	-3.34	-2.89	-0.53	-0.98	-0.61	-1.57	1.09	15.84
19	170.0	175.7	269.0	1375	1.70	440.	60	1.301	22	1.469	22	7	16.85	23.09	-37.83	-3.34	-2.89	-0.53	-0.99	-0.61	-1.58	1.09	15.89
20	180.0	175.7	269.0	1375	1.50	440.	60	1.295	22	1.456	22	7	17.18	23.59	-38.76	-3.34	-2.90	-0.53	-1.00	-0.61	-1.58	1.09	15.94
21	190.0	175.7	269.0	1375	1.32	440.	60	1.289	29	1.445	29	7	17.50	24.09	-39.67	-3.34	-2.91	-0.53	-1.01	-0.61	-1.59	1.09	15.99
22	200.0	175.7	269.0	1375	1.13	440.	60	1.284	22	1.434	29	7	17.83	24.58	-40.58	-3.34	-2.92	-0.53	-1.02	-0.61	-1.59	1.08	16.04
23	210.0	175.7	269.0	1375	0.94	440.	60	1.279	22	1.424	42	7	18.16	25.07	-41.49	-3.34	-2.93	-0.53	-1.03	-0.62	-1.60	1.08	16.08
24	220.0	175.7	269.0	1375	0.75	440.	60	1.273	22	1.416	42	7	18.48	25.56	-42.40	-3.34	-2.94	-0.53	-1.04	-0.62	-1.60	1.08	16.13
25	230.0	175.7	269.0	1375	0.56	440.	60	1.268	22	1.409	42	7	18.81	26.05	-43.32	-3.34	-2.95	-0.53	-1.05	-0.62	-1.61	1.08	16.18
26	240.0	175.7	269.0	1375	0.37	440.	60	1.264	22	1.402	42	7	19.14	26.55	-44.24	-3.34	-2.96	-0.53	-1.06	-0.62	-1.61	1.08	16.23
27	250.0	175.7	269.0	1375	0.19	440.	60	1.259	29	1.396	42	7	19.46	27.02	-45.13	-3.34	-2.97	-0.53	-1.07	-0.62	-1.62	1.08	16.28
28	260.0	175.7	269.0	1375	0.01	440.	60	1.254	22	1.390	42	7	19.79	27.50	-46.02	-3.34	-2.97	-0.53	-1.08	-0.62	-1.62	1.08	16.33
29	260.8	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	.254	29	1.390	42	7	19.82	27.54	-46.09	-3.34	-2.97	-0.53	-1.08	-0.62	-1.62	1.08	16.33
30	265.3	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	.251	29	1.398	29	18	19.96	27.53	-46.31	-3.34	-2.98	-0.53	-1.09	-0.63	-1.62	1.08	16.33
31	270.4	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	.248	29	1.463	22	19	20.13	27.54	-46.60	-3.35	-2.98	-0.54	-1.11	-0.64	-1.62	1.08	16.32
32	275.8	205.0	269.0	1375	0.00	440.	60	.245	22	1.546	15	19	20.31	27.56	-46.93	-3.38	-2.99	-0.54	-1.13	-0.65	-1.62	1.08	16.32
33	281.1	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	.242	22	1.626	15	20	20.48	27.60	-47.31	-3.41	-2.99	-0.54	-1.15	-0.67	-1.62	1.08	16.31
34	286.1	224.5	269.0	1375	0.00	440.	60	.238	22	1.687	15	20	20.64	27.65	-47.66	-3.45	-2.98	-0.55	-1.17	-0.69	-1.62	1.08	16.30
35	290.2	234.2	269.0	1375	0.00	440.	60	.250	15	1.742	15	21	20.78	27.68	-47.92	-3.48	-2.98	-0.56	-1.18	-0.70	-1.62	1.08	16.30
36	292.1	244.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.258	15	1.758	15	21	20.84	27.66	-47.92	-3.49	-2.98	-0.56	-1.19	-0.71	-1.62	1.08	16.29
37	296.0	244.0	268.5	1306	0.03	440.	60	1.258	42	1.761	42	21	20.97	27.46	-46.79	-3.51	-2.99	-0.56	-1.18	-0.71	-1.62	1.08	16.29

Note: See column name on page 19.

Table 2

Displacement procedure of fuel assemblies in symmetry sector of 60° in the course of 14th fuel reloading (core loading 15)

Fresh fuel assemblies of S-type (2.40% enrichment)

--> 1 -->
--> 21 -->
--> 40 --> 23 --> 25 -->
--> 51 --> 36 --> 49 -->

Fresh fuel assemblies of H-type (3.60% enrichment)

--> 9 --> 7 --> 3 --> 38 -->

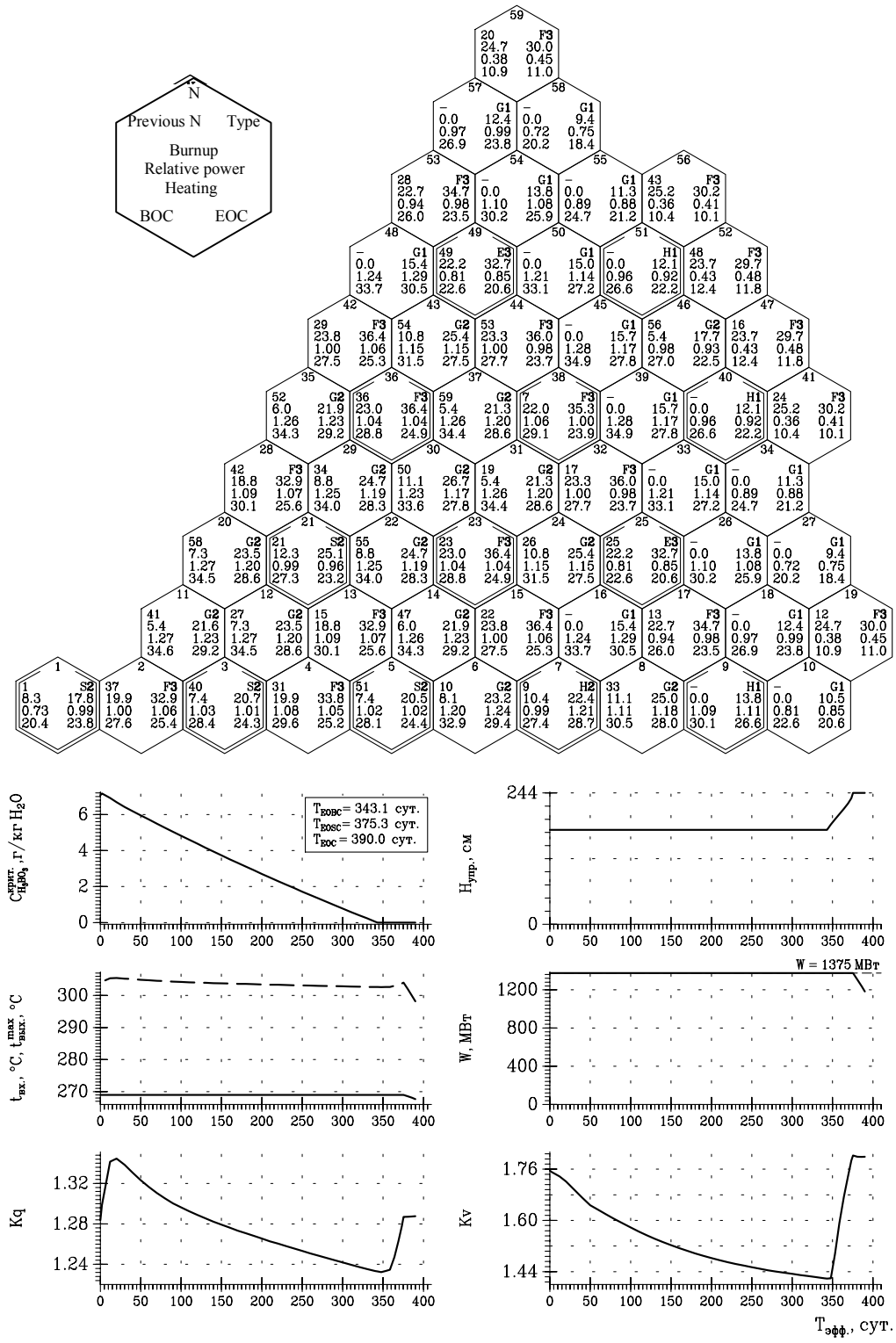
Fresh fuel assemblies of G-type (3.60% enrichment)

--> 10 --> 11 --> 2 --> 30 --> 46 -->
--> 19 -->
--> 26 --> 12 -->
--> 27 --> 31 --> 14 --> 18 --> 22 --> 32 -->
--> 33 --> 16 --> 24 -->
--> 34 --> 13 --> 39 --> 17 -->
--> 41 -->
--> 47 --> 15 -->
--> 50 --> 48 --> 43 -->
--> 52 --> 42 -->
--> 54 --> 20 -->
--> 55 --> 28 --> 45 --> 53 -->
--> 56 -->
--> 58 --> 37 --> 35 --> 57 --> 29 --> 44 -->
--> 59 -->

Transposition of fuel assemblies

6 --> 4 --> 8 --> 6

History of the main NPC of the 16th core load during the reactor operation



- concentration of boric acid in coolant, g/kg;
- coolant inlet and outlet temperature, °C;
- FA relative power, K_q
- position of the CPS control rod ($H_{control}$), cm;
- reactor power, W;
- non-uniformity of power distribution in the reactor core volume, K_v

Fig.4

Table 3

History of the main NPC of the 16th core load during the reactor operation

Xe=1, Sm=3

No	T_{eff} days	$H_{control}$ cm	T_{in} °C	W MW	C_{H3BO3} g/kg	G 10^{-2} m^3/h	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B_{avg} MWday/kgU	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} $1/(g/cm^3)$	$\partial\rho/\partial t$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_{U^*}$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(g/kg)	$\beta_{effective}$ $*10^2$	l_{prompt} $*10^5$ s
1	0.0	175.7	269.0	1375	7.08	440.	60	1.284	45	1.755	48	10	10.89	10.17	-14.26	-3.21	-2.57	-0.51	-0.71	-0.57	-1.47	1.10	15.17
2	2.0	175.7	269.0	1375	7.18	440.	60	1.299	11	1.751	48	10	10.95	10.09	-14.08	-3.23	-2.57	-0.52	-0.71	-0.57	-1.46	1.10	15.14
3	12.0	175.7	269.0	1375	6.92	440.	60	1.342	11	1.738	11	10	11.28	10.41	-14.67	-3.24	-2.58	-0.62	-0.72	-0.57	-1.47	1.10	15.18
4	20.0	175.7	269.0	1375	6.69	440.	60	1.345	11	1.722	11	10	11.54	10.82	-15.42	-3.24	-2.59	-0.52	-0.73	-0.57	-1.47	1.10	15.22
5	30.0	175.7	269.0	1375	6.42	440.	60	1.339	11	1.697	11	10	11.87	11.39	-16.43	-3.23	-2.61	-0.52	-0.74	-0.58	-1.48	1.10	15.25
6	40.0	175.7	269.0	1375	6.18	440.	60	1.331	11	1.671	11	10	12.19	11.94	-17.41	-3.22	-2.62	-0.51	-0.75	-0.58	-1.49	1.10	15.29
7	50.0	175.7	269.0	1375	5.95	440.	60	1.323	11	1.647	48	10	12.52	12.49	-18.38	-3.22	-2.63	-0.51	-0.76	-0.58	-1.49	1.09	15.33
8	60.0	175.7	269.0	1375	5.72	440.	60	1.317	11	1.633	16	10	12.85	13.04	-19.36	-3.21	-2.64	-0.51	-0.77	-0.58	-1.50	1.09	15.37
9	70.0	175.7	269.0	1375	5.49	440.	60	1.310	11	1.619	16	10	13.17	13.59	-80.35	-3.21	-2.65	-0.51	-0.78	-0.58	-1.51	1.09	15.41
10	80.0	175.7	269.0	1375	5.26	440.	60	1.305	11	1.605	16	10	13.50	14.15	-21.35	-3.20	-2.66	-0.61	-0.79	-0.68	-1.51	1.09	15.46
11	90.0	175.7	269.0	1375	5.04	440.	60	1.300	11	1.591	48	10	13.82	14.69	-22.32	-3.20	-2.67	-0.51	-0.80	-0.58	-1.52	1.09	15.49
12	100.0	175.7	269.0	1375	4.82	440.	60	1.296	11	1.578	16	10	14.15	15.23	-23.29	-3.20	-2.69	-0.51	-0.82	-0.58	-1.53	1.09	15.53
13	110.0	175.7	269.0	1375	4.80	440.	60	1.292	11	1.566	16	10	14.48	15.77	-24.27	-3.20	-2.70	-0.51	-0.83	-0.58	-1.53	1.09	15.57
14	120.0	175.7	269.0	1375	4.38	440.	60	1.289	11	1.554	16	10	14.80	16.31	-25.25	-3.20	-2.71	-0.51	-0.84	-0.58	-1.54	1.09	15.61
15	130.0	175.7	269.0	1375	4.16	440.	60	1.286	11	1.543	16	9	15.13	16.85	-26.24	-3.20	-2.72	-0.51	-0.85	-0.59	-1.54	1.09	15.66
16	140.0	175.7	269.0	1375	3.95	440.	60	1.282	11	1.533	48	9	15.46	17.38	-27.20	-3.20	-2.73	-0.51	-0.86	-0.59	-1.55	1.09	15.70
17	150.0	175.7	269.0	1375	3.74	440.	60	1.279	11	1.523	16	9	15.78	17.90	-28.17	-3.21	-2.74	-0.51	-0.87	-0.59	-1.56	1.09	15.74
18	160.0	175.7	269.0	1375	3.52	440.	60	1.276	11	1.514	16	9	16.11	18.43	-29.13	-3.21	-2.75	-0.51	-0.88	-0.59	-1.56	1.09	15.79
19	170.0	175.7	269.0	1375	3.32	440.	60	1.273	11	1.505	48	9	16.44	18.94	-30.09	-3.21	-2.76	-0.51	-0.89	-0.59	-1.57	1.09	15.83
20	180.0	175.7	269.0	1375	3.11	440.	60	1.271	11	1.497	48	9	16.76	19.45	-31.03	-3.22	-2.78	-0.51	-0.91	-0.59	-1.57	1.09	15.88
21	190.0	175.7	269.0	1375	2.91	440.	60	1.268	11	1.489	48	9	17.09	19.97	-31.98	-3.22	-2.79	-0.51	-0.92	-0.60	-1.58	1.09	15.93
22	200.0	175.7	269.0	1375	2.70	440.	60	1.265	11	1.482	48	8	17.41	20.48	-32.93	-3.22	-2.80	-0.51	-0.93	-0.60	-1.59	1.09	15.97
23	210.0	175.7	269.0	1375	2.50	440.	60	1.263	20	1.476	48	8	17.74	20.98	-33.86	-3.23	-2.81	-0.52	-0.94	-0.60	-1.59	1.09	16.02
24	220.0	175.7	269.0	1375	2.31	440.	60	1.260	12	1.470	48	8	18.07	21.48	-34.79	-3.23	-2.82	-0.52	-0.95	-0.60	-1.60	1.09	16.07
25	230.0	175.7	269.0	1375	2.11	440.	60	1.258	12	1.464	16	8	18.39	21.98	-35.72	-3.24	-2.83	-0.52	-0.96	-0.60	-1.60	1.08	16.11
26	240.0	175.7	269.0	1375	1.91	440.	60	1.256	12	1.459	16	8	18.72	22.47	-36.65	-3.24	-2.84	-0.52	-0.97	-0.60	-1.61	1.08	16.16
27	250.0	175.7	269.0	1375	1.71	440.	60	1.253	12	1.454	16	8	19.05	22.97	-37.58	-3.25	-2.85	-0.52	-0.98	-0.61	-1.61	1.08	16.21
28	260.0	175.7	269.0	1375	1.53	440.	60	1.251	20	1.449	48	8	19.37	23.46	-38.49	-3.25	-2.86	-0.52	-0.99	-0.61	-1.62	1.08	16.26
29	270.0	175.7	269.0	1375	1.34	440.	60	1.249	12	1.444	48	7	19.70	23.93	-39.39	-3.26	-2.87	-0.52	-1.00	-0.61	-1.62	1.08	16.31
30	280.0	175.7	269.0	1375	1.15	440.	60	1.246	12	1.440	48	7	20.03	24.42	-40.29	-3.26	-2.88	-0.52	-1.02	-0.61	-1.63	1.08	16.36
31	290.0	175.7	269.0	1375	0.96	440.	60	1.244	12	1.437	48	7	20.35	24.90	-41.20	-3.27	-2.88	-0.52	-1.03	-0.61	-1.64	1.08	16.41
32	300.0	175.7	269.0	1375	0.78	440.	60	1.242	12	1.433	48	7	20.88	25.38	-42.11	-3.27	-2.89	-0.52	-1.04	-0.61	-1.64	1.08	16.46
33	310.0	175.7	269.0	1375	0.59	440.	60	1.240	12	1.430	48	1	21.01	25.86	-43.03	-3.28	-2.90	-0.52	-1.05	-0.61	-1.65	1.08	16.51
34	320.0	175.7	269.0	1375	0.41	440.	60	1.237	20	1.427	48	7	21.33	26.33	-43.91	-3.28	-2.91	-0.52	-1.06	-0.62	-1.65	1.08	16.56
35	330.0	175.7	269.0	1375	0.23	440.	60	1.235	12	1.423	16	7	21.66	26.79	-44.80	-3.29	-2.92	-0.52	-1.07	-0.62	-1.66	1.08	16.61
36	340.0	175.7	269.0	1375	0.05	440.	60	1.233	31	1.420	16	7	21.98	27.26	-45.69	-3.29	-2.93	-0.53	-1.08	-0.62	-1.66	1.08	16.66
37	343.1	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.233	37	1.419	48	7	22.08	27.41	-45.96	-3.30	-2.93	-0.53	-1.08	-0.62	-1.66	1.08	18.68
38	347.8	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	1.232	11	1.419	48	17	22.24	27.39	-46.17	-3.30	-2.94	-0.53	-1.09	-0.63	-1.66	1.08	16.68
39	353.0	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.233	11	1.496	16	18	22.41	27.39	-46.43	-3.31	-2.94	-0.53	-1.11	-0.64	-1.66	1.08	16.68
40	358.5	205.0	269.0	1375'	0.00	440.	60	1.235	11	1.592	16	19	22.59	27.41	-46.74	-3.33	-2.94	-0.53	-1.13	-0.66	-1.66	1.08	16.68
41	364.0	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.247	16	1.674	16	20	22.77	27.45	-47.09	-3.37	-2.94	-0.54	-1.15	-0.67	-1.66	1.08	16.66
42	369.1	224.5	269.0	1375	0.00	440.	60	1.263	16	1.737	16	20	22.93	27.48	-47.42	-3.40	-2.94	-0.54	-1.17	-0.69	-1.66	1.08	16.68
43	373.3	234.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.278	16	1.787	16	21	23.07	27.51	-47.66	-3.43	-2.94	-0.56	-1.18	-0.70	-1.66	1.08	16.68
44	375.3	244.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.287	16	1.803	16	21	23.14	27.49	-47.65	-3.44	-2.93	-0.65	-1.19	-0.71	-1.66	1.08	16.67
45	380.7	244.0	268.5	1306	0.00	440.	60	1.287	16	1.799	16	21	23.31	27.38	-46.63	-3.45	-2.95	-0.55	-1.17	-0.70	-1.66	1.08	16.68
46	385.8	244.0	268.1	1238	0.00	440.	60	1.287	16	1.798	16	21	23.48	27.22	-45.60	-3.47	-2.96	-0.56	-1.16	-0.70	-1.66	1.08	16.68
47	390.0	244.0	267.6	1183	0.00	440.	60	1.288	48	1.799	48	21	23.62	27.10	-44.73	-3.48	-2.98	-0.56	-1.16	-0.70	-1.66	1.08	16.68

Table 4

Displacement procedure of fuel assemblies in symmetry sector of 60° in the course of 15th fuel reloading (core loading 16)

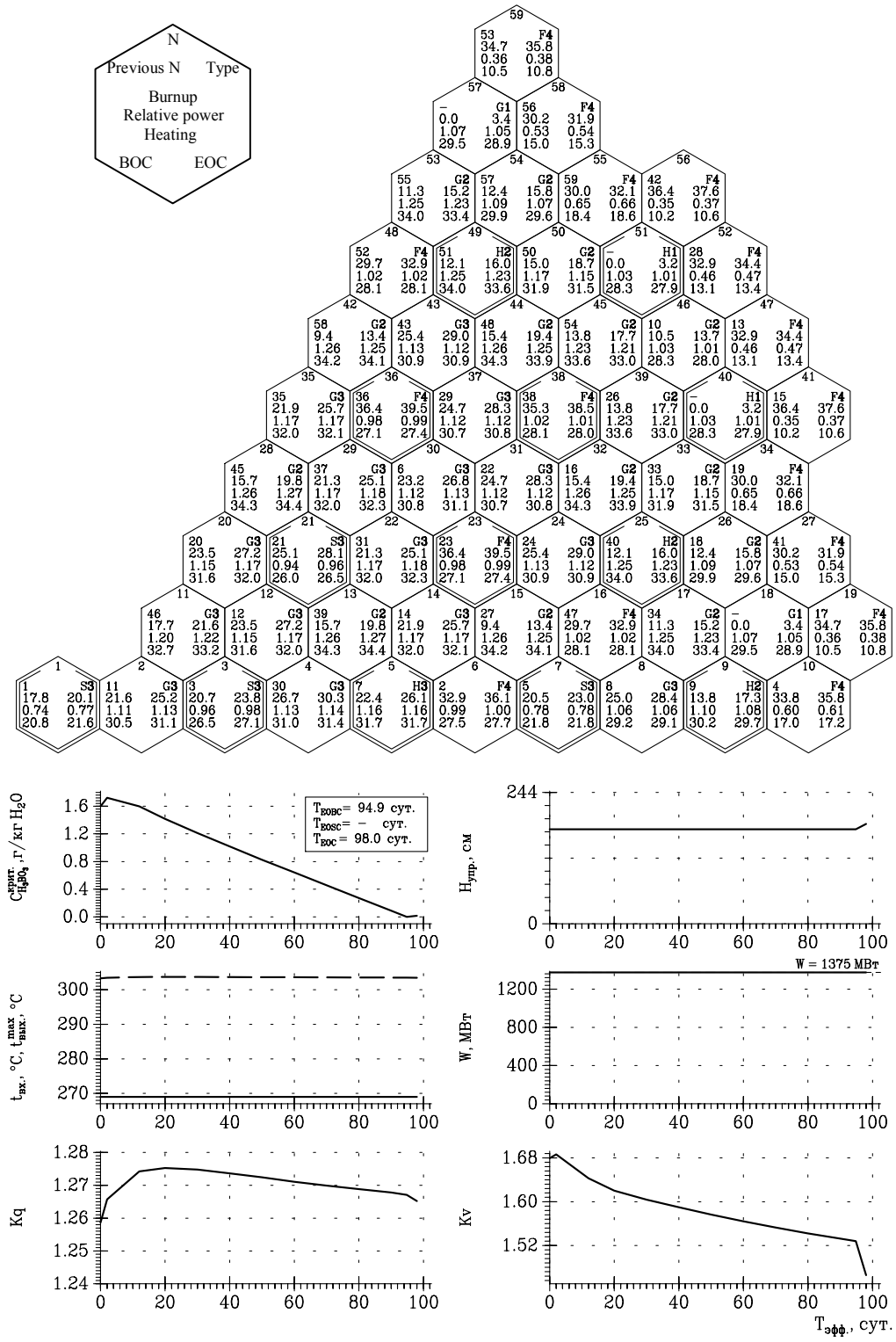
Fresh fuel assemblies of H-type (3.60% enrichment)

--> 9 --> 7 --> 38 -->
--> 40 --> 3 -->
--> 51 --> 5 -->

Fresh fuel assemblies of G-type (3.60% enrichment)

--> 10 --> 6 -->
--> 16 --> 47 --> 14 -->
--> 18 -->
--> 26 --> 24 --> 41 --> 11 -->
--> 27 --> 12 --> 19 --> 31 --> 4 -->
--> 33 --> 8 -->
--> 34 --> 29 --> 42 --> 28 --> 53 --> 44 -->
--> 39 -->
--> 45 -->
--> 48 --> 52 --> 35 -->
--> 50 --> 30 -->
--> 54 --> 43 --> 56 --> 46 -->
--> 55 --> 22 --> 15 --> 13 --> 17 --> 32 -->
--> 57 -->
--> 58 --> 20 --> 59 --> 37 --> 2 -->

History of the main NPC of the 17th core load during the reactor operation



- concentration of boric acid in coolant, g/kg;
- coolant inlet and outlet temperature, °C;
- FA relative power, K_q
- position of the CPS control rod ($H_{control}$), cm;
- reactor power, W;
- non-uniformity of power distribution in the reactor core volume, K_v

Fig. 5

Table 5

History of the main NPC of the 17th core load during the reactor operation

Xe=1, Sm=3

No	T_{eff} days	$H_{control}$ cm	T_{in} °C	W MW	C_{H3BO3} g/kg	G 10^{-2} m^3/h	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B_{avg} MWday/kgU	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} $1/(g/cm^3)$	$\partial\rho/\partial t$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_{U^*}$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(g/kg)	$\beta_{effective}$ $*10^2$	l_{prompt} $*10^5$ s
1	0.0	175.7	269.0	1375	1.60	440.	60	1.259	44	1.679	15	6	21.25	23.20	-38.29	-3.38	-2.81	-0.54	-1.00	-0.62	-1.62	1.08	16.27
2	2.0	175.7	269.0	1375	1.72	440.	60	1.266	28	1.687	42	6	21.32	23.09	-38.05	-3.39	-2.81	-0.54	-1.00	-0.62	-1.62	1.08	16.24
3	12.0	175.7	269.0	1375	1.60	440.	60	1.274	28	1.643	15	6	21.65	23.42	-38.71	-3.37	-2.83	-0.54	-1.01	-0.62	-1.62	1.08	16.28
4	20.0	175.7	269.0	1375	1.42	440.	60	1.275	28	1.620	15	6	21.91	23.82	-39.49	-3.36	-2.84	-0.54	-1.02	-0.62	-1.63	1.08	16.32
5	30.0	175.7	269.0	1375	1.21	440.	60	1.275	28	1.604	42	6	22.23	24.31	-40.43	-3.36	-2.85	-0.54	-1.03	-0.62	-1.63	1.08	16.38
6	40.0	175.7	269.0	1375	1.02	440.	60	1.274	28	1.590	42	6	22.56	24.79	-41.34	-3.36	-2.86	-0.54	-1.04	-0.63	-1.64	1.08	16.43
7	50.0	175.7	269.0	1375	0.83	440.	60	1.272	13	1.576	42	6	22.89	25.27	-42.26	-3.37	-2.87	-0.54	-1.05	-0.63	-1.64	1.08	16.48
8	60.0	175.7	269.0	1375	0.64	440.	60	1.271	28	1.564	42	6	23.21	25.74	-43.16	-3.37	-2.88	-0.54	-1.07	-0.63	-1.65	1.08	16.54
9	70.0	175.7	269.0	1375	0.46	440.	60	1.270	13	1.553	42	6	23.54	26.21	-44.06	-3.37	-2.89	-0.54	- 1.08	-0.63	-1.66	1.08	16.59
10	80.0	175.7	269.0	1375	0.27	440.	60	1.269	13	1.542	42	6	23.87	26.69	-44.97	-3.37	-2.90	-0.54	- 1.09	-0.64	-1.66	1.08	16.64
11	90.0	175.7	269.0	1375	0.09	440.	60	1.268	13	1.533	42	6	24.19	27.16	-45.88	-3.37	-2.91	-0.54	- 1.10	-0.64	-1.67	1.08	16.70
12	94.9	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.267	28	1.528	42	6	24.35	27.40	-46.33	-3.38	-2.91	-0.54	- 1.11	-0.64	-1.67	1.08	16.72
13	98.0	185.4	269.0	1375	0.02	440.	60	1.265	28	1.466	15	7	24.45	27.33	-46.43	-3.36	-2.92	-0.54	- 1.11	-0.65	-1.67	1.08	16.72

Column name to table 1, 3, 5, 7:

T_{eff} - effective operating time of core load
$H_{control}$ - position of the CPS control rod bank
T_{in} - coolant inlet temperature
W - power
C_{H3BO3} - concentration of boric acid in coolant
G - coolant flow rate
Sim - 60 degrees symmetry
K_q - non-uniformity of FA power
Nk - FA number
K_V - non-uniformity of power distribution in the reactor core volume
Nz - number of calculated zone throughout the height
B_{avg} - average burnup

Coefficient of reactivity:

$\partial\rho/\partial\gamma$ - for coolant density
$\partial\rho/\partial t$ - for coolant temperature
$\partial\rho/\partial t_U$ - for distributed fuel temperature
$\partial\rho/\partial t_U{}^*$ - for average fuel temperature
$\partial\rho/\partial N_U$ - for the reactor power without reference to coolant preheating
$\partial\rho/\partial N_B$ - for the reactor power with regard to coolant preheating at the constant core inlet temperature
$\partial\rho/\partial N_{KB}$ - for the reactor power with regard to coolant preheating at the constant average core temperature
$\partial\rho/\partial C$ - for boric acid concentration

$\beta_{effective}$ - effective delayed-neutron fraction
l_{prompt} - mean prompt lifetime

Table 6

Displacement procedure of fuel assemblies in symmetry sector of 60° in the course of 16th fuel reloading (core loading 17)

Fresh fuel assemblies of G-type (3.60% enrichment)

--> 18 --> 26 --> 39 --> 13 --> 47 --> 16 --> 32 -->
--> 57 --> 54 --> 45 --> 28 --> 52 --> 48 --> 44 -->

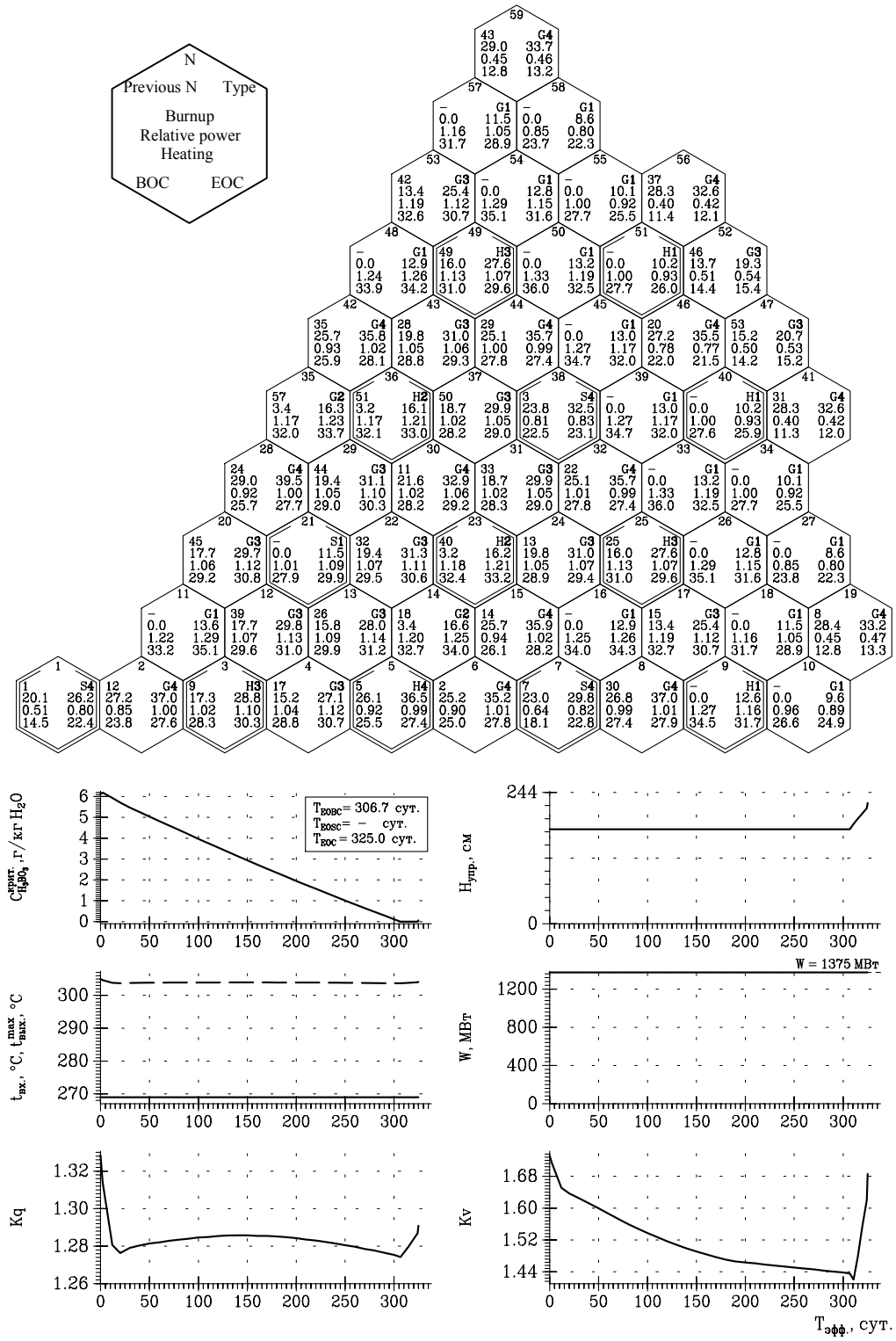
Fresh fuel assemblies of H-type (3.60% enrichment)

--> 40 --> 25 -->
--> 51 --> 49 -->

Transposition of fuel assemblies

11 --> 2 --> 6 --> 30 --> 4 --> 10 --> 46 --> 11
7 --> 5 --> 7
27 --> 15 --> 41 --> 27
34 --> 17 --> 19 --> 34
31 --> 22 --> 31
37 --> 29 --> 37
58 --> 42 --> 56 --> 58
55 --> 53 --> 59 --> 55

History of the main NPC of the 18th core load during the reactor operation



- concentration of boric acid in coolant, g/kg;
- coolant inlet and outlet temperature, °C;
- FA relative power, K_q
- position of the CPS control rod ($H_{control}$), cm;
- reactor power, W;
- non-uniformity of power distribution in the reactor core volume, K_v

Fig. 6

Table 7

History of the main NPC of the 18th core load during the reactor operation

Xe=1, Sm=3

No	T_{eff} days	$H_{control}$ cm	T_{in} °C	W MW	C_{H3BO3} g/kg	G 10^{-2} m^3/h	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	B_{avg} MWday/kgU	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} $1/(g/cm^3)$	$\partial\rho/\partial t$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial t_{U*}$ 10^{-5} $°C^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} MW^{-1}	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(g/kg)	$\beta_{effective}$ $*10^2$	l_{prompt} $*10^5$ s
1	0.0	175.7	269.0	1375	6.12	440.	60	1.328	33	1.732	33	11	12.88	12.96	-19.34	-3.08	-2.58	-0.49	-0.77	-0.58	-1.54	1.10	15.53
2	2.0	175.7	269.0	1375	6.19	440.	60	1.314	33	1.715	33	11	12.95	12.83	-19.06	-3.09	-2.58	-0.49	-0.77	-0.57	-1.53	1.10	15.51
3	12.0	175.7	269.0	1375	5.93	440.	60	1.281	33	1.651	16	11	13.27	13.00	-19.34	-3.10	-2.60	-0.49	-0.77	-0.57	-1.53	1.10	15.55
4	20.0	175.7	269.0	1375	5.71	440.	60	1.276	11	1.637	16	11	13.53	13.35	-19.98	-3.10	-2.61	-0.49	-0.77	-0.57	-1.54	1.10	15.58
5	30.0	175.7	269.0	1375	5.47	440.	60	1.279	11	1.625	16	11	13.86	13.84	-20.87	-3.10	-2.62	-0.49	-0.78	-0.57	-1.54	1.09	15.62
6	40.0	175.7	269.0	1375	5.25	440.	60	1.280	11	1.612	16	11	14.19	14.34	-21.75	-3.10	-2.63	-0.49	-0.79	-0.57	-1.55	1.09	15.66
7	50.0	175.7	269.0	1375	5.04	440.	60	1.281	11	1.599	16	11	14.51	14.85	-22.66	-3.10	-2.64	-0.50	-0.80	-0.57	-1.56	1.09	15.69
8	60.0	175.7	269.0	1375	4.83	440.	60	1.282	11	1.586	16	11	14.84	15.36	-23.57	-3.10	-2.65	-0.50	-0.81	-0.57	-1.56	1.09	15.73
9	70.0	175.7	269.0	1375	4.62	440.	60	1.283	11	1.573	16	11	15.17	15.86	-24.47	-3.10	-2.67	-0.50	-0.82	-0.58	-1.57	1.09	15.77
10	80.0	175.7	269.0	1375	4.41	440.	60	1.283	11	1.560	16	11	15.49	16.38	-25.40	-3.11	-2.68	-0.50	-0.83	-0.58	-1.57	1.09	15.81
11	90.0	175.7	269.0	1375	4.19	440.	60	1.264	11	1.549	16	10	15.82	16.91	-26.36	-3.11	-2.69	-0.50	-0.84	-0.58	-1.58	1.09	15.85
12	100.0	175.7	269.0	1375	3.97	440.	60	1.285	11	1.537	16	10	16.15	17.43	-27.32	-3.11	-2.70	-0.50	-0.86	-0.58	-1.58	1.09	15.89
13	110.0	175.7	269.0	1375	3.76	440.	60	1.285	11	1.527	16	10	16.47	17.95	-28.25	-3.12	-2.71	-0.50	-0.87	-0.58	-1.59	1.09	15.93
14	120.0	175.7	269.0	1375	3.56	440.	60	1.285	11	1.517	16	10	16.80	18.45	-29.18	-3.12	-2.72	-0.50	-0.88	-0.58	-1.59	1.09	15.98
15	130.0	175.7	269.0	1375	3.35	440.	60	1.286	11	1.508	16	10	17.12	18.97	-30.12	-3.12	-2.73	-0.50	-0.89	-0.58	-1.60	1.09	16.02
16	140.0	175.7	269.0	1375	3.15	440.	60	1.286	11	1.499	16	10	17.45	19.48	-31.05	-3.13	-2.74	-0.50	-0.90	-0.59	-1.60	1.09	16.06
17	150.0	175.7	269.0	1375	2.94	440.	60	1.286	11	1.491	16	9	17.78	19.99	-32.00	-3.13	-2.75	-0.50	-0.91	-0.59	-1.61	1.09	16.11
18	160.0	175.7	269.0	1375	2.74	440.	60	1.285	11	1.484	16	9	18.10	20.49	-32.92	-3.14	-2.76	-0.50	-0.92	-0.59	-1.62	1.09	16.15
19	170.0	175.7	269.0	1375	2.54	440.	60	1.285	11	1.477	16	9	18.43	20.98	-33.83	-3.14	-2.77	-0.50	-0.93	-0.59	-1.62	1.09	16.20
20	180.0	175.7	269.0	1375	2.35	440.	60	1.285	11	1.471	16	9	18.76	21.48	-34.75	-3.15	-2.78	-0.50	-0.94	-0.59	-1.63	1.09	16.25
21	190.0	175.7	269.0	1375	2.15	440.	60	1.285	11	1.466	11	7	19.08	21.97	-35.67	-3.16	-2.79	-0.50	-0.95	-0.59	-1.63	1.09	16.29
22	200.0	175.7	269.0	1375	1.95	440.	60	1.284	11	1.464	11	7	19.41	22.47	-36.60	-3.16	-2.80	-0.50	-0.96	-0.60	-1.64	1.09	16.34
23	210.0	175.7	269.0	1375	1.76	440.	60	1.284	11	1.461	11	7	19.74	22.95	-37.49	-3.17	-2.81	-0.51	-0.98	-0.60	-1.64	1.08	16.39
24	220.0	175.7	269.0	1375	1.58	440.	60	1.283	11	1.458	11	7	20.06	23.42	-38.38	-3.17	-2.82	-0.51	-0.99	-0.60	-1.65	1.08	16.44
25	230.0	175.7	269.0	1375	1.39	440.	60	1.282	11	1.456	11	7	20.39	23.90	-39.27	-3.18	-2.83	-0.51	-1.00	-0.60	-1.65	1.08	16.48
26	240.0	175.7	269.0	1375	1.20	440.	60	1.281	11	1.453	11	7	20.72	24.37	-40.17	-3.19	-2.84	-0.51	-1.01	-0.60	-1.66	1.08	16.53
27	250.0	175.7	269.0	1375	1.02	440.	60	1.281	11	1.451	11	7	21.04	24.85	-41.06	-3.19	-2.85	-0.51	-1.02	-0.60	-1.66	1.08	16.58
28	260.0	175.7	269.0	1375	0.83	440.	60	1.280	11	1.448	11	7	21.37	25.33	-41.96	-3.20	-2.86	-0.51	-1.03	-0.61	-1.67	1.08	16.63
29	270.0	175.7	269.0	1375	0.65	440.	60	1.279	11	1.446	11	7	21.69	25.79	-42.84	-3.21	-2.87	-0.51	-1.04	-0.61	-1.67	1.08	16.68
30	280.0	175.7	269.0	1375	0.47	440.	60	1.278	11	1.443	11	7	22.02	26.25	-43.70	-3.21	-2.87	-0.51	-1.05	-0.61	-1.68	1.08	16.73
31	290.0	175.7	269.0	1375	0.29	440.	60	1.277	11	1.441	11	7	22.35	26.71	-44.58	-3.22	-2.88	-0.51	-1.06	-0.61	-1.68	1.08	16.78
32	300.0	175.7	269.0	1375	0.12	440.	60	1.275	11	1.438	11	7	22.67	27.18	-45.45	-3.22	-2.89	-0.51	-1.07	-0.61	-1.69	1.08	16.84
33	306.7	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.274	11	1.436	11	6	22.89	27.49	-46.04	-3.23	-2.90	-0.52	-1.08	-0.61	-1.69	1.08	16.87
34	310.6	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	1.277	11	1.420	11	17	23.02	27.46	-46.22	-3.23	-2.90	-0.52	-1.09	-0.62	-1.69	1.08	16.87
35	314.9	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.280	11	1.478	11	19	23.16	27.46	-46.45	-3.24	-2.91	-0.52	-1.10	-0.63	-1.69	1.08	16.87
36	319.5	205.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.283	11	1.553	16	19	23.31	27.46	-46.71	-3.26	-2.91	-0.52	-1.11	-0.64	-1.69	1.08	16.87
37	324.1	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.287	11	1.620	16	20	23.46	27.48	-47.00	-3.28	-2.91	-0.52	-1.13	-0.66	-1.69	1.08	16.88
38	325.0	224.5	269.0	1375	0.06	440.	60	1.291	11	1.686	16	20	23.49	27.35	-47.00	-3.32	-2.90	-0.53	-1.14	-0.67	-1.69	1.08	16.86

Table 8

Displacement procedure of fuel assemblies in symmetry sector of 60° in the course of 17th fuel reloading (core loading 18)

Fresh fuel assemblies of H-type (3.60% enrichment)

--> 9 --> 3 --> 38 -->
--> 40 --> 23 -->
--> 51 --> 36 -->

Fresh fuel assemblies of G-type (3.60% enrichment)

--> 10 -->
--> 11 --> 30 --> 8 --> 19 -->
--> 16 -->
--> 18 --> 14 --> 15 --> 17 --> 4 -->
--> 26 --> 13 --> 24 --> 28 --> 43 --> 59 -->
--> 27 -->
--> 33 --> 31 --> 41 -->
--> 34 -->
--> 39 --> 12 --> 2 --> 6 -->
--> 45 --> 20 --> 46 --> 52 -->
--> 48 -->
--> 50 --> 37 --> 56 -->
--> 54 -->
--> 55 -->
--> 57 --> 35 --> 42 --> 53 --> 47 -->
--> 58 -->

Fresh fuel assemblies of S-type (2.40% enrichment)

--> 21 -->

Transposition of fuel assemblies

32 --> 22 --> 32
44 --> 29 --> 44

Energy release distribution in each fuel rod of FA 135 is shown in Fig.7. Fig.8 and 9 demonstrate the maximum fuel burnup in the pellet for layer 9 and the maximum fuel burnup in the fuel rod after the 18th core load. The figure shows that the maximum burnup in the fuel pellet made up 49.6 MWd/kgU after operation and it made up 43.4 MWd/kgU in the fuel rod.

Furthermore, you can find neutron-physical characteristics of fuel rods under examination (in accordance with PERMAK-A enumeration - 6, 16, 32, 54, 82 and 116) in the course of their operation during 4 years. Data for fuel rod 54 are given for information.

Tables 9-32 include the following data for each fuel rod:

- Axial relative power distribution;
- Axial fuel burnup distribution.

Tables 33-56 include the following data for each fuel rod:

- Cladding temperature;
- Linear power;

Tables 57-60 show fast neutron fluence.

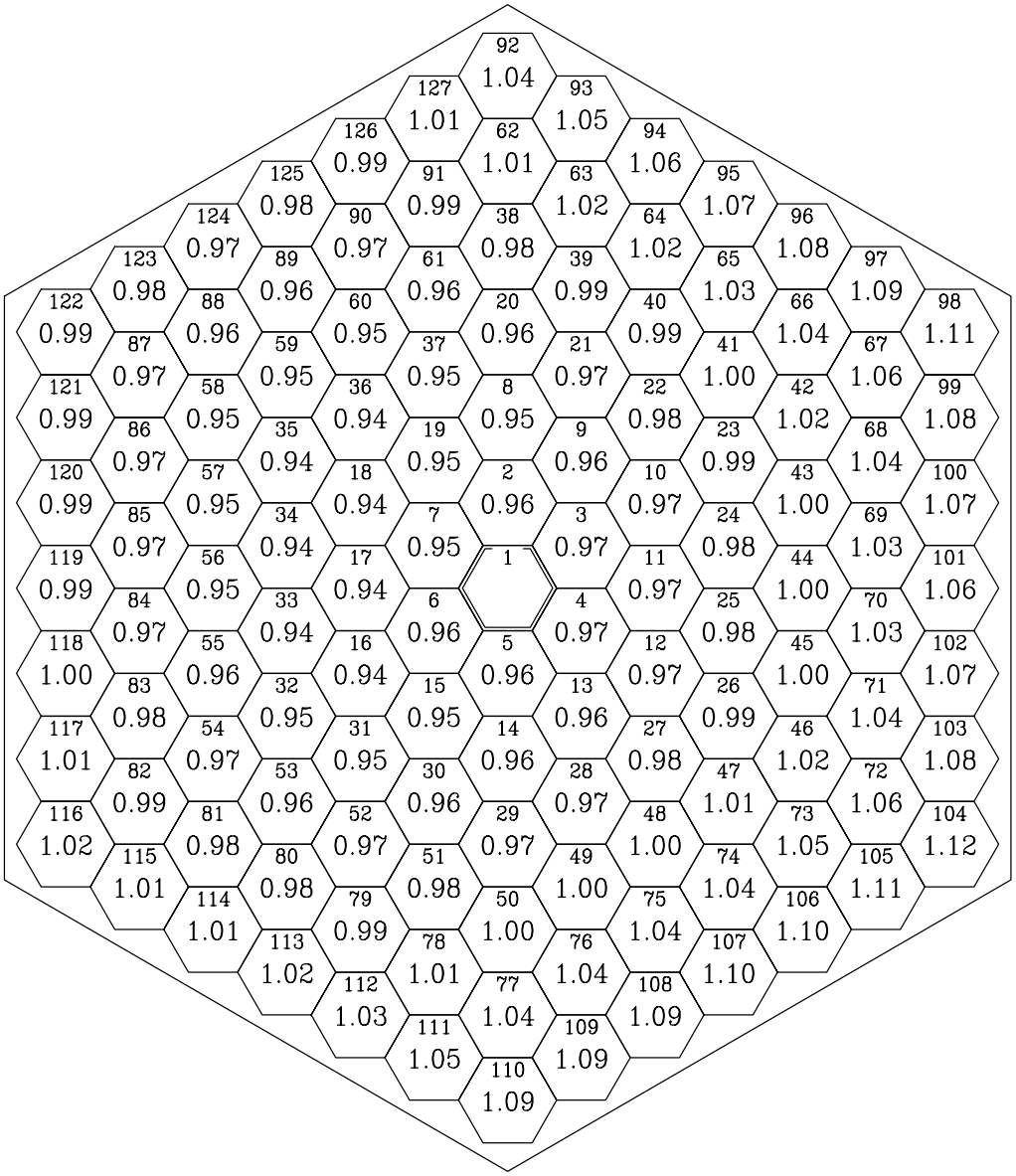
Conclusion

Neutron-physical characteristics of the reactor core of the 4th power unit (Novovoronezh NPP) were calculated. Characteristics of 5 fuel rods under examination are given in details. Further, the data amount can be increased as needed. It is necessary to make the detailed comparison between the measuring data and calculation ones after the isotopic composition measurement because it will allow for additional confirmation of the made calculation precision.

References

1. S.N.Bolshagin et al. The BIPR-7A computer code (version 1.3) (Certificate No.137 of 21.02.2002)
2. M.Yu.Tomilov et al. The PERMAK-A computer code (version 1.3) (Certificate No.136 of 21.02.2002)
3. V.D. Sidorenko et al. Spectral Code TVS-M for Calculation of Characteristics of Cells, Supercells and Fuel Assemblies of VVER-Type Reactors. 5-th Symposium of the AER, Dobogoko, October 15-20, 1995 (Software certificate (computer code TVS-M, version 1.2). Registration number of the software (No.473), registration number of the certificate (No.135) of 21.02.02)

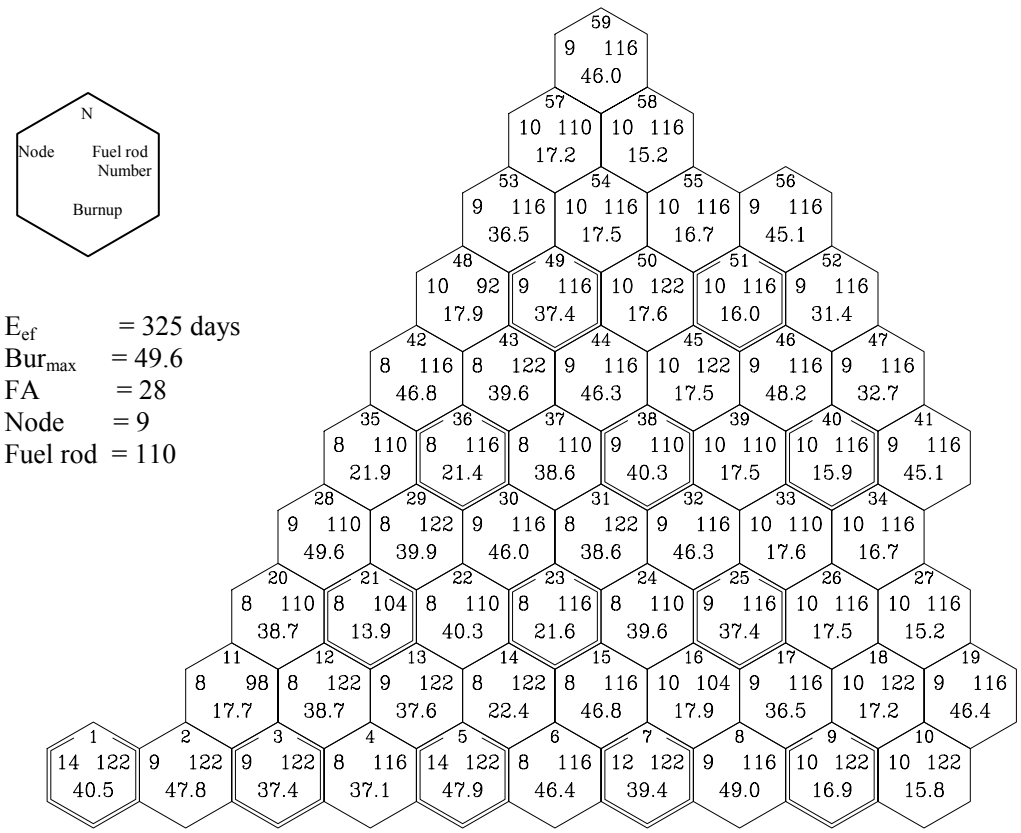
Cross-section relative power distribution on the fuel assembly (core load 18)



Effective time	0.00 days
Power	1375 MW
$C^{critical}_{H_3BO_3}$	6.12 g/kg
Linear power	155.1 W/cm
FA Number	28
Node	10
Fuel rod Number	104
Kk_{max}	1.12

Fig. 7

Maximum fuel burnup in the pellet (MWd/kg)
18th core load



E_{ef} = 325 days
Bur_{max} = 49.6
FA = 28
Node = 9
Fuel rod = 110

Fig. 8

Maximum fuel burnup in the fuel rod (MWd/kg)
18th – core load

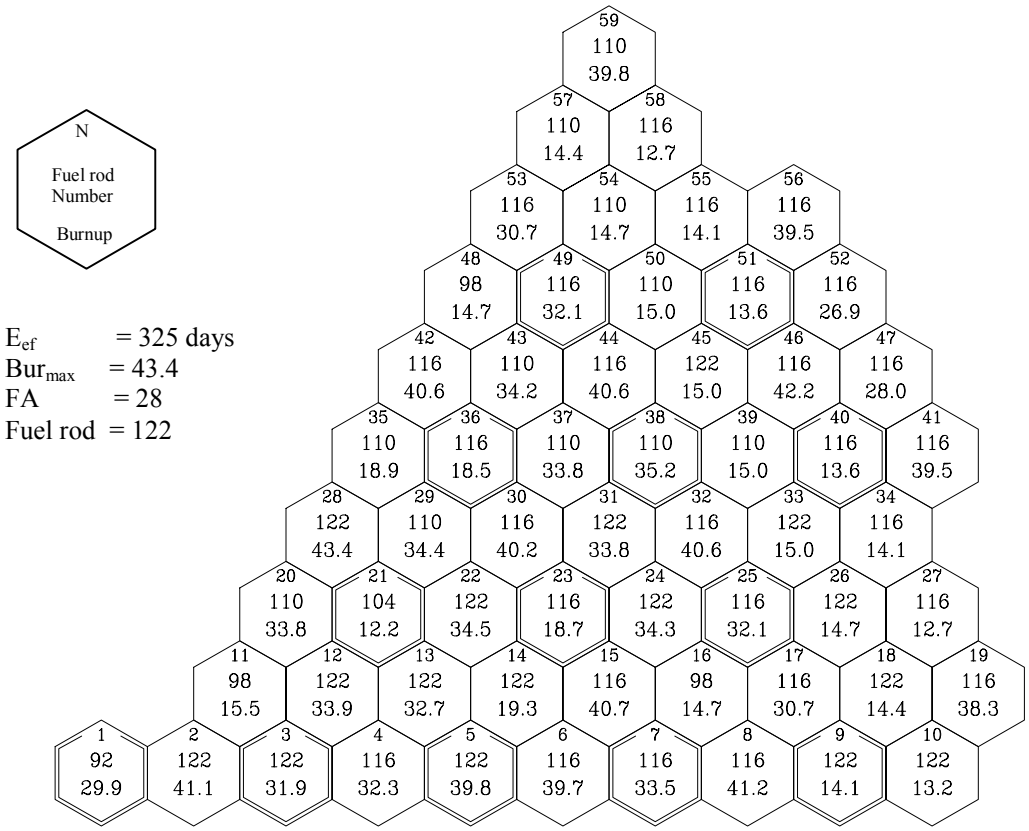


Fig. 9

Table 9

Burnup history of fuel rod No.6 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.32	-	0.43	1.20	0.52	2.73	0.55	3.78	0.82	4.58
24	0.45	-	0.59	1.66	0.69	3.74	0.74	5.16	1.08	6.23
23	0.57	-	0.74	2.10	0.85	4.69	0.90	6.43	1.29	7.72
22	0.68	-	0.85	2.46	0.97	5.43	1.01	7.38	1.40	8.82
21	0.78	-	0.94	2.76	1.04	6.01	1.08	8.11	1.44	9.63
20	0.87	-	1.01	3.03	1.10	6.49	1.13	8.70	1.44	10.25
19	0.95	-	1.08	3.28	1.15	6.92	1.16	9.22	1.40	10.77
18	1.04	-	1.14	3.52	1.19	7.33	1.20	9.69	1.35	11.22
17	1.12	-	1.19	3.74	1.22	7.68	1.22	10.10	1.29	11.59
16	1.20	-	1.23	3.92	1.24	7.96	1.23	10.42	1.23	11.87
15	1.26	-	1.26	4.08	1.26	8.19	1.24	10.67	1.18	12.09
14	1.31	-	1.29	4.20	1.27	8.37	1.25	10.87	1.14	12.25
13	1.36	-	1.31	4.30	1.27	8.52	1.26	11.03	1.10	12.37
12	1.40	-	1.32	4.38	1.28	8.63	1.26	11.15	1.07	12.47
11	1.43	-	1.33	4.44	1.29	8.71	1.27	11.25	1.05	12.54
10	1.45	-	1.34	4.48	1.29	8.77	1.27	11.32	1.03	12.60
9	1.46	-	1.34	4.50	1.29	8.80	1.28	11.35	1.02	12.62
8	1.46	-	1.34	4.48	1.29	8.77	1.28	11.33	1.01	12.59
7	1.44	-	1.32	4.42	1.29	8.68	1.28	11.23	1.00	12.48
6	1.40	-	1.29	4.30	1.27	8.49	1.27	11.01	0.98	12.24
5	1.32	-	1.24	4.10	1.24	8.15	1.24	10.60	0.96	11.80
4	1.21	-	1.16	3.79	1.17	7.58	1.18	9.91	0.91	11.05
3	1.05	-	1.02	3.31	1.05	6.69	1.07	8.79	0.83	9.83
2	0.83	-	0.82	2.63	0.86	5.37	0.89	7.10	0.68	7.96
1	0.55	-	0.56	1.78	0.60	3.67	0.63	4.89	0.48	5.49

Table 10

Burnup history of fuel rod No.6 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.34	4.58	0.45	5.87	0.53	7.46	0.60	10.10	0.97	11.37
24	0.47	6.22	0.61	7.98	0.70	10.12	0.78	13.59	1.25	15.24
23	0.59	7.72	0.75	9.90	0.85	12.50	0.92	16.63	1.44	18.58
22	0.68	8.82	0.85	11.33	0.94	14.25	1.00	18.80	1.53	20.91
21	0.77	9.63	0.93	12.42	1.01	15.58	1.05	20.40	1.54	22.58
20	0.86	10.25	1.00	13.31	1.06	16.67	1.09	21.69	1.50	23.87
19	0.96	10.77	1.07	14.12	1.11	17.67	1.12	22.88	1.43	25.02
18	1.07	11.22	1.15	14.88	1.16	18.66	1.15	24.09	1.35	26.14
17	1.17	11.59	1.21	15.51	1.20	19.46	1.18	25.03	1.27	27.00
16	1.25	11.87	1.26	16.00	1.23	20.06	1.19	25.71	1.19	27.59
15	1.31	12.09	1.29	16.36	1.24	20.49	1.19	26.18	1.13	27.98
14	1.36	12.25	1.31	16.64	1.25	20.81	1.19	26.51	1.08	28.24
13	1.40	12.37	1.32	16.84	1.25	21.04	1.19	26.75	1.04	28.43
12	1.43	12.47	1.33	17.00	1.25	21.22	1.20	26.93	1.01	28.56
11	1.45	12.54	1.33	17.11	1.26	21.34	1.20	27.07	0.99	28.67
10	1.46	12.60	1.34	17.18	1.26	21.42	1.20	27.17	0.98	28.75
9	1.46	12.62	1.34	17.20	1.26	21.45	1.21	27.21	0.97	28.78
8	1.45	12.59	1.33	17.15	1.26	21.39	1.21	27.17	0.97	28.74
7	1.43	12.48	1.32	16.97	1.26	21.19	1.22	26.99	0.97	28.55
6	1.39	12.24	1.30	16.62	1.25	20.79	1.22	26.57	0.97	28.12
5	1.32	11.80	1.26	16.00	1.23	20.06	1.21	25.75	0.96	27.30
4	1.22	11.05	1.19	14.97	1.18	18.82	1.18	24.32	0.93	25.82
3	1.08	9.83	1.07	13.32	1.08	16.82	1.10	21.92	0.87	23.32
2	0.87	7.96	0.88	10.80	0.91	13.73	0.95	18.06	0.75	19.26
1	0.60	5.49	0.62	7.47	0.65	9.55	0.69	12.69	0.55	13.57

Table 11

Burnup history of fuel rod No.6 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff=0.00 days		Teff=94.86 days	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.48	11.37	0.58	13.01
24	0.63	15.24	0.75	17.39
23	0.75	18.58	0.88	21.12
22	0.83	20.91	0.96	23.70
21	0.88	22.58	1.01	25.54
20	0.93	23.87	1.04	26.96
19	0.98	25.02	1.08	28.24
18	1.04	26.14	1.12	29.52
17	1.09	27.00	1.15	30.49
16	1.13	27.59	1.16	31.16
15	1.16	27.98	1.18	31.62
14	1.19	28.24	1.18	31.93
13	1.21	28.43	1.19	32.16
12	1.24	28.56	1.20	32.34
11	1.26	28.67	1.20	32.49
10	1.29	28.75	1.21	32.61
9	1.31	28.78	1.22	32.69
8	1.33	28.74	1.23	32.69
7	1.35	28.55	1.24	32.53
6	1.35	28.13	1.24	32.11
5	1.34	27.30	1.23	31.24
4	1.30	25.82	1.19	29.64
3	1.21	23.32	1.12	26.88
2	1.03	19.26	0.97	22.32
1	0.75	13.57	0.72	15.82

Table 12

Burnup history of fuel rod No.6 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00 days		Teff=200.00 days		Teff=306.73 days	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.43	13.07	0.53	14.64	0.59	16.46	0.63	18.58
24	0.57	17.47	0.69	19.56	0.76	21.93	0.80	24.66
23	0.69	21.21	0.82	23.71	0.89	26.50	0.92	29.65
22	0.77	23.80	0.90	26.57	0.96	29.62	0.99	33.00
21	0.83	25.65	0.96	28.61	1.00	31.80	1.02	35.31
20	0.88	27.08	0.99	30.18	1.02	33.46	1.03	37.04
19	0.92	28.36	1.01	31.58	1.03	34.91	1.03	38.51
18	0.95	29.64	1.03	32.93	1.03	36.30	1.03	39.90
17	0.98	30.61	1.04	33.97	1.03	37.36	1.03	40.94
16	1.00	31.29	1.04	34.69	1.03	38.08	1.02	41.67
15	1.02	31.74	1.05	35.19	1.03	38.58	1.02	42.15
14	1.03	32.05	1.05	35.52	1.03	38.92	1.02	42.48
13	1.03	32.28	1.05	35.77	1.03	39.17	1.02	42.72
12	1.04	32.46	1.05	35.96	1.03	39.36	1.02	42.92
11	1.04	32.61	1.05	36.12	1.03	39.51	1.02	43.08
10	1.04	32.73	1.05	36.24	1.03	39.64	1.02	43.21
9	1.03	32.81	1.05	36.31	1.04	39.71	1.03	43.31
8	1.02	32.81	1.05	36.28	1.04	39.70	1.04	43.32
7	1.01	32.66	1.05	36.10	1.05	39.52	1.04	43.16
6	0.98	32.23	1.04	35.62	1.04	39.01	1.05	42.65
5	0.94	31.36	1.02	34.64	1.03	37.97	1.04	41.58
4	0.89	29.76	0.97	32.86	1.00	36.08	1.02	39.59
3	0.80	26.99	0.90	29.82	0.93	32.81	0.96	36.11
2	0.67	22.42	0.77	24.82	0.81	27.39	0.85	30.27
1	0.48	15.89	0.56	17.63	0.60	19.52	0.64	21.69

Table 13

Burnup history of fuel rod No.16 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.32	—	0.42	1.19	0.51	2.71	0.55	3.76	0.82	4.56
24	0.44	-	0.58	1.65	0.69	3.72	0.73	5.12	1.08	6.18
23	0.57	-	0.73	2.09	0.85	4.66	0.89	6.37	1.29	7.66
22	0.68	-	0.84	2.44	0.96	5.38	1.00	7.31	1.40	8.74
21	0.77	-	0.93	2.74	1.03	5.94	1.07	8.02	1.44	9.53
20	0.86	-	1.00	3.00	1.09	6.42	1.12	8.61	1.43	10.15
19	0.95	-	1.07	3.25	1.14	6.86	1.15	9.13	1.40	10.67
18	1.03	-	1.13	3.49	1.17	7.26	1.18	9.60	1.34	11.12
17	1.11	-	1.18	3.71	1.21	7.61	1.21	10.01	1.28	11.49
16	1.19	-	1.22	3.89	1.23	7.90	1.22	10.33	1.23	11.77
15	1.25	-	1.25	4.04	1.24	8.12	1.23	10.58	1.17	11.99
14	1.30	-	1.28	4.17	1.25	8.30	1.24	10.78	1.13	12.15
13	1.35	-	1.29	4.27	1.26	8.44	1.25	10.93	1.09	12.27
12	1.39	-	1.31	4.34	1.27	8.55	1.25	11.06	1.06	12.36
11	1.42	-	1.32	4.40	1.27	8.64	1.26	11.15	1.04	12.43
10	1.44	-	1.32	4.44	1.28	8.69	1.26	11.21	1.02	12.48
9	1.45	-	1.33	4.46	1.28	8.72	1.27	11.24	1.01	12.50
8	1.44	-	1.32	4.44	1.28	8.69	1.27	11.22	1.00	12.47
7	1.43	-	1.31	4.39	1.28	8.61	1.27	11.13	0.99	12.37
6	1.38	-	1.28	4.27	1.26	8.42	1.26	10.91	0.98	12.13
5	1.31	-	1.23	4.07	1.23	8.08	1.23	10.51	0.95	11.70
4	1.20	-	1.15	3.76	1.16	7.52	1.17	9.83	0.90	10.96
3	1.05	-	1.02	3.29	1.04	6.65	1.06	8.74	0.82	9.76
2	0.82	-	0.82	2.62	0.86	5.34	0.88	7.06	0.68	7.91
1	0.55	-	0.56	1.78	0.60	3.66	0.62	4.87	0.48	5.47

Table 14

Burnup history of fuel rod No.16 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.33	4.56	0.44	5.82	0.52	7.38	0.59	9.97	0.96	11.21
24	0.46	6.18	0.60	7.91	0.69	10.00	0.77	13.41	1.24	15.03
23	0.57	7.66	0.73	9.80	0.83	12.34	0.91	16.40	1.43	18.32
22	0.67	8.74	0.83	11.20	0.92	14.06	0.99	18.53	1.51	20.61
21	0.76	9.53	0.91	12.27	0.99	15.37	1.04	20.10	1.52	22.26
20	0.84	10.15	0.98	13.15	1.04	16.45	1.07	21.38	1.48	23.54
19	0.94	10.67	1.05	13.95	1.09	17.45	1.10	22.58	1.42	24.69
18	1.05	11.12	1.13	14.72	1.15	18.44	1.14	23.79	1.34	25.83
17	1.15	11.49	1.19	15.36	1.19	19.25	1.17	24.75	1.25	26.70
16	1.23	11.77	1.24	15.84	1.21	19.85	1.18	25.43	1.18	27.29
15	1.29	11.99	1.27	16.20	1.23	20.28	1.18	25.90	1.12	27.68
14	1.34	12.15	1.29	16.47	1.23	20.59	1.18	26.23	1.07	27.94
13	1.38	12.27	1.30	16.67	1.24	20.82	1.18	26.46	1.03	28.12
12	1.41	12.36	1.31	16.82	1.24	20.98	1.18	26.63	1.00	28.25
11	1.43	12.43	1.31	16.93	1.24	21.10	1.19	26.77	0.98	28.35
10	1.44	12.48	1.32	17.00	1.24	21.18	1.19	26.86	0.97	28.42
9	1.44	12.50	1.32	17.02	1.25	21.20	1.19	26.90	0.96	28.45
8	1.43	12.47	1.31	16.96	1.25	21.14	1.20	26.86	0.96	28.41
7	1.40	12.37	1.30	16.79	1.25	20.95	1.21	26.67	0.96	28.22
6	1.36	12.13	1.28	16.45	1.24	20.55	1.21	26.25	0.96	27.80
5	1.30	11.70	1.24	15.84	1.21	19.83	1.20	25.45	0.95	26.98
4	1.20	10.96	1.17	14.82	1.16	18.61	1.16	24.03	0.92	25.52
3	1.06	9.76	1.05	13.20	1.06	16.64	1.08	21.66	0.86	23.05
2	0.85	7.91	0.87	10.71	0.89	13.59	0.93	17.85	0.74	19.04
1	0.59	5.47	0.61	7.42	0.64	9.46	0.68	12.55	0.54	13.42

Table 15

Burnup history of fuel rod No.16 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff.=0.00 days.		Teff= 94.86 days.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.47	11.21	0.57	12.82
24	0.61	15.03	0.74	17.14
23	0.73	18.32	0.86	20.81
22	0.81	20.61	0.94	23.35
21	0.86	22.26	0.99	25.16
20	0.91	23.54	1.02	26.57
19	0.96	24.69	1.06	27.86
18	1.02	25.83	1.10	29.15
17	1.07	26.70	1.13	30.14
16	1.11	27.29	1.15	30.82
15	1.14	27.68	1.16	31.27
14	1.17	27.94	1.17	31.58
13	1.20	28.12	1.18	31.81
12	1.22	28.25	1.18	31.99
11	1.25	28.35	1.19	32.13
10	1.27	28.42	1.20	32.25
9	1.30	28.45	1.21	32.32
8	1.32	28.41	1.22	32.31
7	1.33	28.22	1.22	32.16
6	1.33	27.80	1.23	31.74
5	1.32	26.98	1.21	30.88
4	1.28	25.52	1.18	29.30
3	1.19	23.05	1.10	26.57
2	1.02	19.04	0.95	22.06
1	0.74	13.42	0.70	15.63

Table 16

Burnup history of fuel rod No.16 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff.=0.00 days.		Teff= 100.00 days.		Teff=200.00 days.		Teff=306.73 days.	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.42	12.88	0.52	14.43	0.58	16.23	0.62	18.32
24	0.56	17.22	0.69	19.28	0.75	21.63	0.80	24.32
23	0.68	20.90	0.81	23.37	0.88	26.13	0.92	29.25
22	0.76	23.45	0.90	26.19	0.95	29.21	0.98	32.57
21	0.82	25.27	0.95	28.20	0.99	31.37	1.01	34.85
20	0.87	26.69	0.98	29.76	1.01	33.02	1.02	36.56
19	0.91	27.98	1.00	31.16	1.02	34.47	1.03	38.04
18	0.94	29.27	1.02	32.54	1.03	35.88	1.02	39.45
17	0.97	30.27	1.03	33.59	1.03	36.95	1.02	40.51
16	0.99	30.94	1.03	34.32	1.03	37.68	1.02	41.24
15	1.00	31.39	1.04	34.81	1.02	38.17	1.01	41.72
14	1.01	31.71	1.04	35.14	1.02	38.51	1.01	42.05
13	1.02	31.93	1.04	35.38	1.02	38.75	1.01	42.29
12	1.03	32.10	1.04	35.57	1.02	38.94	1.01	42.47
11	1.03	32.25	1.04	35.72	1.02	39.09	1.01	42.63
10	1.02	32.37	1.04	35.83	1.03	39.21	1.02	42.76
9	1.02	32.44	1.05	35.90	1.03	39.28	1.02	42.86
8	1.01	32.43	1.05	35.87	1.03	39.27	1.03	42.87
7	1.00	32.28	1.04	35.69	1.04	39.08	1.04	42.70
6	0.97	31.86	1.03	35.21	1.04	38.58	1.04	42.20
5	0.93	31.00	1.01	34.24	1.02	37.55	1.04	41.13
4	0.88	29.41	0.96	32.48	0.99	35.67	1.01	39.16
3	0.79	26.67	0.89	29.48	0.93	32.43	0.95	35.71
2	0.66	22.15	0.76	24.52	0.80	27.06	0.84	29.91
1	0.48	15.70	0.55	17.41	0.60	19.28	0.63	21.41

Table 17

Burnup history of fuel rod No.32 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days.		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.33	-	0.43	1.22	0.52	2.77	0.56	3.84	0.85	4.65
24	0.45	-	0.59	1.68	0.70	3.79	0.75	5.22	1.11	6.30
23	0.58	-	0.74	2.12	0.86	4.74	0.91	6.49	1.32	7.80
22	0.69	-	0.86	2.48	0.97	5.47	1.01	7.43	1.43	8.89
21	0.78	-	0.94	2.78	1.05	6.04	1.08	8.15	1.47	9.69
20	0.87	-	1.02	3.05	1.11	6.52	1.13	8.74	1.47	10.32
19	0.96	-	1.09	3.31	1.15	6.97	1.17	9.28	1.43	10.85
18	1.05	-	1.15	3.55	1.20	7.38	1.21	9.76	1.37	11.31
17	1.13	-	1.20	3.78	1.23	7.75	1.23	10.19	1.31	11.70
16	1.21	-	1.24	3.96	1.25	8.04	1.25	10.52	1.25	11.99
15	1.27	-	1.28	4.12	1.27	8.28	1.26	10.78	1.20	12.21
14	1.33	-	1.30	4.24	1.28	8.46	1.27	10.98	1.15	12.37
13	1.37	-	1.32	4.34	1.29	8.60	1.27	11.14	1.11	12.50
12	1.41	-	1.33	4.42	1.29	8.71	1.28	11.26	1.08	12.59
11	1.44	-	1.34	4.48	1.30	8.80	1.28	11.35	1.06	12.66
10	1.46	-	1.35	4.52	1.30	8.85	1.28	11.42	1.04	12.71
9	1.47	-	1.35	4.54	1.31	8.88	1.29	11.45	1.03	12.73
8	1.47	-	1.35	4.52	1.31	8.86	1.29	11.43	1.02	12.71
7	1.45	-	1.33	4.47	1.30	8.77	1.29	11.34	1.01	12.60
6	1.41	-	1.31	4.35	1.28	8.58	1.28	11.12	1.00	12.36
5	1.34	-	1.26	4.15	1.25	8.24	1.25	10.72	0.97	11.93
4	1.23	-	1.17	3.84	1.18	7.68	1.19	10.03	0.92	11.18
3	1.07	-	1.04	3.37	1.07	6.80	1.08	8.93	0.84	9.97
2	0.84	-	0.84	2.68	0.88	5.47	0.90	7.23	0.70	8.10
1	0.57	-	0.58	1.83	0.61	3.76	0.64	5.00	0.49	5.61

Table 18

Burnup history of fuel rod No.32 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.33	4.65	0.45	5.93	0.52	7.50	0.59	10.11	0.97	11.36
24	0.46	6.30	0.60	8.04	0.69	10.15	0.77	13.58	1.26	15.22
23	0.58	7.80	0.74	9.95	0.83	12.52	0.91	16.60	1.45	18.54
22	0.67	8.89	0.84	11.37	0.93	14.25	0.99	18.74	1.53	20.85
21	0.76	9.69	0.91	12.45	0.99	15.57	1.04	20.33	1.54	22.50
20	0.85	10.32	0.98	13.34	1.04	16.65	1.08	21.61	1.50	23.80
19	0.95	10.85	1.06	14.16	1.10	17.68	1.11	22.84	1.44	24.98
18	1.06	11.31	1.14	14.95	1.16	18.70	1.15	24.10	1.35	26.15
17	1.16	11.70	1.20	15.60	1.20	19.53	1.18	25.09	1.27	27.05
16	1.24	11.99	1.25	16.10	1.22	20.14	1.19	25.78	1.19	27.66
15	1.30	12.21	1.28	16.47	1.24	20.58	1.19	26.26	1.13	28.06
14	1.35	12.37	1.30	16.74	1.24	20.89	1.19	26.59	1.08	28.32
13	1.39	12.50	1.31	16.94	1.25	21.12	1.19	26.82	1.04	28.50
12	1.42	12.59	1.32	17.09	1.25	21.29	1.19	27.00	1.01	28.63
11	1.44	12.66	1.33	17.20	1.25	21.41	1.20	27.13	0.99	28.73
10	1.45	12.71	1.33	17.27	1.25	21.49	1.20	27.22	0.98	28.80
9	1.45	12.73	1.33	17.29	1.26	21.51	1.21	27.26	0.97	28.83
8	1.44	12.71	1.32	17.23	1.26	21.45	1.21	27.21	0.97	28.78
7	1.41	12.60	1.31	17.06	1.26	21.26	1.22	27.03	0.97	28.60
6	1.37	12.36	1.29	16.71	1.25	20.85	1.22	26.61	0.97	28.17
5	1.30	11.93	1.25	16.10	1.22	20.13	1.21	25.80	0.96	27.35
4	1.21	11.18	1.18	15.07	1.17	18.90	1.17	24.38	0.93	25.88
3	1.07	9.97	1.06	13.44	1.07	16.92	1.10	21.99	0.87	23.39
2	0.86	8.10	0.88	10.93	0.90	13.83	0.94	18.14	0.75	19.34
1	0.59	5.61	0.62	7.58	0.65	9.64	0.69	12.76	0.55	13.64

Table 19

Burnup history of fuel rod No.32 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff=0.00 days.		Teff= 94.86 days.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.47	11.36	0.57	12.98
24	0.62	15.22	0.74	17.34
23	0.73	18.53	0.87	21.04
22	0.81	20.85	0.94	23.59
21	0.87	22.50	0.99	25.41
20	0.91	23.80	1.03	26.84
19	0.97	24.98	1.07	28.16
18	1.03	26.15	1.11	29.50
17	1.08	27.05	1.14	30.53
16	1.12	27.66	1.16	31.22
15	1.15	28.06	1.17	31.68
14	1.18	28.32	1.18	32.00
13	1.21	28.50	1.19	32.22
12	1.23	28.63	1.19	32.40
11	1.26	28.73	1.20	32.54
10	1.28	28.80	1.21	32.65
9	1.31	28.83	1.22	32.73
8	1.33	28.78	1.23	32.72
7	1.34	28.60	1.24	32.57
6	1.35	28.17	1.24	32.14
5	1.33	27.35	1.23	31.28
4	1.29	25.88	1.19	29.69
3	1.20	23.39	1.12	26.94
2	1.03	19.34	0.96	22.39
1	0.75	13.64	0.71	15.88

Table 20

Burnup history of fuel rod No.32 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff.=0.00 days.		Teff= 100.00 days.		Teff=200.00 days.		Teff=306.73 days.	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.43	13.04	0.53	14.61	0.59	16.43	0.63	18.55
24	0.57	17.42	0.70	19.50	0.76	21.88	0.81	24.61
23	0.69	21.13	0.82	23.62	0.89	26.42	0.93	29.58
22	0.77	23.70	0.91	26.47	0.96	29.51	0.99	32.92
21	0.83	25.52	0.96	28.49	1.00	31.69	1.02	35.21
20	0.88	26.96	0.99	30.06	1.02	33.35	1.03	36.94
19	0.92	28.28	1.01	31.49	1.03	34.83	1.04	38.44
18	0.95	29.62	1.03	32.91	1.04	36.29	1.03	39.89
17	0.97	30.65	1.04	34.00	1.04	37.39	1.03	40.99
16	0.99	31.34	1.04	34.74	1.03	38.14	1.03	41.73
15	1.01	31.80	1.05	35.24	1.03	38.63	1.02	42.21
14	1.02	32.11	1.05	35.58	1.03	38.97	1.02	42.55
13	1.03	32.34	1.05	35.82	1.03	39.22	1.02	42.79
12	1.03	32.52	1.05	36.01	1.03	39.40	1.02	42.97
11	1.03	32.66	1.05	36.15	1.03	39.55	1.02	43.13
10	1.03	32.78	1.05	36.27	1.03	39.67	1.03	43.26
9	1.02	32.85	1.05	36.33	1.04	39.74	1.03	43.35
8	1.02	32.84	1.05	36.31	1.04	39.73	1.04	43.35
7	1.00	32.69	1.05	36.13	1.05	39.54	1.05	43.19
6	0.98	32.27	1.04	35.64	1.04	39.04	1.05	42.69
5	0.94	31.40	1.01	34.67	1.03	38.00	1.04	41.62
4	0.88	29.81	0.97	32.91	1.00	36.12	1.02	39.64
3	0.80	27.05	0.90	29.88	0.94	32.86	0.96	36.17
2	0.67	22.49	0.76	24.88	0.81	27.44	0.85	30.33
1	0.48	15.95	0.56	17.68	0.60	19.57	0.64	21.73

Table 21

Burnup history of fuel rod No.54 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.34	—	0.45	1.27	0.54	2.88	0.58	4.00	0.89	4.84
24	0.47	-	0.62	1.74	0.73	3.94	0.78	5.42	1.17	6.55
23	0.60	-	0.77	2.20	0.89	4.91	0.94	6.73	1.38	8.09
22	0.71	-	0.89	2.57	1.01	5.66	1.05	7.70	1.50	9.22
21	0.81	-	0.98	2.88	1.09	6.25	1.12	8.44	1.54	10.05
20	0.90	-	1.05	3.15	1.15	6.75	1.18	9.05	1.53	10.70
19	0.99	-	1.13	3.42	1.20	7.22	1.22	9.61	1.49	11.25
18	1.08	-	1.19	3.68	1.24	7.65	1.25	10.12	1.43	11.73
17	1.17	-	1.25	3.92	1.28	8.04	1.28	10.57	1.36	12.15
16	1.25	-	1.29	4.11	1.30	8.35	1.30	10.93	1.30	12.46
15	1.32	-	1.32	4.27	1.32	8.59	1.31	11.20	1.25	12.69
14	1.37	-	1.35	4.40	1.33	8.78	1.32	11.41	1.20	12.86
13	1.42	-	1.37	4.51	1.34	8.93	1.32	11.57	1.16	12.98
12	1.46	-	1.38	4.59	1.34	9.05	1.33	11.70	1.13	13.08
11	1.49	-	1.40	4.65	1.35	9.13	1.33	11.79	1.10	13.16
10	1.51	-	1.40	4.69	1.35	9.19	1.34	11.86	1.08	13.21
9	1.52	-	1.41	4.71	1.36	9.22	1.34	11.90	1.07	13.23
8	1.52	-	1.40	4.70	1.36	9.20	1.34	11.88	1.06	13.20
7	1.50	-	1.39	4.64	1.35	9.11	1.34	11.78	1.05	13.09
6	1.46	-	1.36	4.52	1.34	8.92	1.33	11.56	1.04	12.86
5	1.39	-	1.31	4.32	1.30	8.57	1.30	11.15	1.01	12.41
4	1.28	-	1.22	4.00	1.23	7.99	1.24	10.45	0.96	11.65
3	1.11	-	1.08	3.51	1.11	7.09	1.13	9.31	0.88	10.40
2	0.88	-	0.87	2.80	0.92	5.72	0.94	7.55	0.73	8.46
1	0.60	-	0.60	1.91	0.64	3.94	0.67	5.23	0.52	5.88

Table 22

Burnup history of fuel rod No.54 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.34	4.84	0.46	6.15	0.54	7.77	0.61	10.45	1.01	11.74
24	0.47	6.55	0.62	8.34	0.71	10.50	0.79	14.02	1.30	15.71
23	0.59	8.09	0.76	10.30	0.85	12.93	0.93	17.12	1.49	19.11
22	0.69	9.22	0.86	11.76	0.95	14.71	1.02	19.32	1.58	21.48
21	0.78	10.05	0.94	12.87	1.02	16.06	1.07	20.93	1.59	23.17
20	0.87	10.70	1.01	13.79	1.07	17.18	1.10	22.26	1.55	24.50
19	0.97	11.25	1.08	14.64	1.12	18.25	1.14	23.53	1.47	25.73
18	1.08	11.73	1.17	15.46	1.18	19.31	1.18	24.84	1.39	26.95
17	1.19	12.15	1.24	16.15	1.23	20.19	1.21	25.88	1.30	27.90
16	1.27	12.46	1.28	16.67	1.26	20.82	1.22	26.61	1.22	28.53
15	1.33	12.69	1.31	17.05	1.27	21.27	1.22	27.10	1.16	28.94
14	1.38	12.86	1.33	17.34	1.28	21.60	1.22	27.44	1.11	29.21
13	1.42	12.98	1.34	17.54	1.28	21.83	1.22	27.68	1.07	29.39
12	1.45	13.08	1.35	17.70	1.28	22.01	1.22	27.85	1.04	29.52
11	1.47	13.16	1.36	17.81	1.28	22.13	1.23	27.99	1.01	29.63
10	1.48	13.21	1.36	17.88	1.29	22.21	1.23	28.08	1.00	29.70
9	1.48	13.23	1.36	17.90	1.29	22.23	1.23	28.12	0.99	29.73
8	1.47	13.20	1.36	17.84	1.29	22.16	1.24	28.07	0.99	29.68
7	1.45	13.09	1.34	17.67	1.29	21.97	1.25	27.89	0.99	29.49
6	1.40	12.86	1.32	17.32	1.28	21.56	1.25	27.46	0.99	29.06
5	1.34	12.41	1.28	16.69	1.25	20.82	1.24	26.64	0.98	28.22
4	1.24	11.65	1.21	15.64	1.20	19.57	1.20	25.19	0.95	26.73
3	1.09	10.40	1.09	13.96	1.10	17.54	1.13	22.75	0.89	24.19
2	0.88	8.46	0.90	11.37	0.93	14.36	0.97	18.80	0.77	20.03
1	0.61	5.88	0.64	7.91	0.67	10.03	0.71	13.25	0.57	14.16

Table 23

Burnup history of fuel rod No.54 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff=0.00 days		Teff= 94.86 days	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.48	11.74	0.58	13.40
24	0.63	15.71	0.76	17.88
23	0.75	19.11	0.89	21.67
22	0.83	21.48	0.96	24.28
21	0.88	23.17	1.01	26.14
20	0.93	24.50	1.05	27.61
19	0.99	25.73	1.09	28.98
18	1.05	26.95	1.13	30.38
17	1.10	27.90	1.17	31.45
16	1.15	28.53	1.19	32.17
15	1.18	28.94	1.20	32.65
14	1.21	29.21	1.21	32.97
13	1.23	29.39	1.21	33.20
12	1.26	29.52	1.22	33.38
11	1.29	29.63	1.23	33.53
10	1.31	29.70	1.24	33.64
9	1.34	29.73	1.25	33.72
8	1.36	29.68	1.26	33.71
7	1.37	29.49	1.26	33.56
6	1.38	29.06	1.27	33.13
5	1.37	28.22	1.26	32.26
4	1.33	26.73	1.22	30.64
3	1.23	24.19	1.15	27.84
2	1.06	20.03	0.99	23.18
1	0.77	14.16	0.74	16.47

Table 24

Burnup history of fuel rod No.54 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00 days		Teff=200.00 days		Teff=306.73 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.44	13.46	0.55	15.08	0.61	16.96	0.65	19.15
24	0.59	17.96	0.72	20.11	0.79	22.56	0.83	25.37
23	0.71	21.77	0.85	24.33	0.91	27.20	0.95	30.45
22	0.79	24.39	0.93	27.23	0.99	30.36	1.01	33.85
21	0.85	26.25	0.98	29.29	1.03	32.57	1.05	36.18
20	0.90	27.73	1.01	30.91	1.05	34.27	1.06	37.94
19	0.94	29.10	1.04	32.38	1.06	35.80	1.06	39.48
18	0.97	30.50	1.05	33.86	1.06	37.30	1.06	40.98
17	0.99	31.58	1.06	35.00	1.06	38.45	1.05	42.12
16	1.01	32.30	1.06	35.77	1.05	39.22	1.05	42.88
15	1.03	32.77	1.07	36.28	1.05	39.74	1.04	43.38
14	1.04	33.09	1.07	36.62	1.05	40.08	1.04	43.72
13	1.05	33.32	1.07	36.87	1.05	40.33	1.04	43.96
12	1.05	33.50	1.07	37.06	1.05	40.51	1.04	44.15
11	1.05	33.65	1.07	37.21	1.05	40.67	1.04	44.31
10	1.05	33.76	1.07	37.32	1.05	40.79	1.04	44.44
9	1.04	33.84	1.07	37.39	1.06	40.86	1.05	44.53
8	1.03	33.84	1.07	37.37	1.06	40.85	1.06	44.55
7	1.02	33.68	1.07	37.18	1.07	40.67	1.07	44.39
6	0.99	33.25	1.06	36.70	1.06	40.16	1.07	43.88
5	0.96	32.38	1.03	35.71	1.05	39.12	1.06	42.81
4	0.90	30.76	0.99	33.93	1.02	37.21	1.04	40.81
3	0.82	27.95	0.92	30.84	0.96	33.90	0.99	37.28
2	0.69	23.28	0.78	25.73	0.83	28.36	0.87	31.33
1	0.50	16.54	0.58	18.32	0.62	20.27	0.66	22.50

Table 25

Burnup history of fuel rod No.82 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.36	—	0.48	1.34	0.58	3.06	0.62	4.25	0.95	5.15
24	0.50	-	0.65	1.85	0.77	4.17	0.83	5.75	1.25	6.95
23	0.63	-	0.81	2.33	0.95	5.20	1.00	7.12	1.48	8.57
22	0.75	-	0.94	2.71	1.07	5.98	1.11	8.14	1.60	9.75
21	0.85	-	1.03	3.03	1.15	6.60	1.19	8.92	1.64	10.62
20	0.94	-	1.11	3.33	1.21	7.13	1.25	9.57	1.63	11.31
19	1.04	-	1.19	3.61	1.27	7.63	1.29	10.16	1.58	11.91
18	1.14	-	1.26	3.89	1.31	8.09	1.33	10.71	1.52	12.43
17	1.23	-	1.32	4.14	1.35	8.52	1.36	11.20	1.45	12.87
16	1.32	-	1.37	4.35	1.38	8.85	1.38	11.59	1.38	13.21
15	1.39	-	1.41	4.53	1.40	9.11	1.39	11.88	1.32	13.46
14	1.45	-	1.43	4.66	1.41	9.31	1.40	12.10	1.27	13.63
13	1.50	-	1.45	4.78	1.42	9.47	1.40	12.27	1.23	13.77
12	1.54	-	1.47	4.86	1.43	9.59	1.41	12.41	1.19	13.87
11	1.57	-	1.48	4.93	1.43	9.69	1.41	12.51	1.17	13.96
10	1.60	-	1.49	4.97	1.44	9.75	1.42	12.59	1.15	14.01
9	1.61	-	1.49	4.99	1.44	9.78	1.42	12.62	1.14	14.04
8	1.61	-	1.49	4.98	1.44	9.76	1.42	12.61	1.13	14.01
7	1.59	-	1.47	4.92	1.44	9.67	1.42	12.51	1.12	13.90
6	1.54	-	1.44	4.80	1.42	9.47	1.41	12.28	1.10	13.65
5	1.47	-	1.39	4.59	1.38	9.11	1.38	11.85	1.07	13.19
4	1.35	-	1.30	4.25	1.31	8.50	1.32	11.11	1.02	12.39
3	1.18	-	1.15	3.74	1.19	7.55	1.21	9.92	0.93	11.08
2	0.94	-	0.93	2.99	0.98	6.11	1.00	8.07	0.78	9.04
1	0.64	-	0.65	2.05	0.69	4.22	0.71	5.60	0.55	6.29

Table 26

Burnup history of fuel rod No.82 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.36	5.15	0.48	6.52	0.56	8.22	0.64	11.03	1.06	12.39
24	0.49	6.95	0.65	8.82	0.75	11.09	0.83	14.77	1.36	16.55
23	0.62	8.57	0.79	10.89	0.89	13.63	0.97	18.01	1.56	20.09
22	0.72	9.75	0.89	12.41	0.99	15.49	1.06	20.29	1.65	22.55
21	0.81	10.62	0.98	13.57	1.06	16.90	1.11	21.97	1.66	24.31
20	0.90	11.31	1.05	14.54	1.11	18.07	1.14	23.36	1.61	25.69
19	1.01	11.91	1.13	15.44	1.17	19.20	1.18	24.70	1.53	26.98
18	1.13	12.43	1.22	16.32	1.23	20.33	1.22	26.08	1.44	28.27
17	1.24	12.87	1.29	17.06	1.28	21.26	1.25	27.18	1.35	29.27
16	1.32	13.21	1.33	17.61	1.31	21.93	1.26	27.94	1.27	29.94
15	1.39	13.45	1.37	18.01	1.32	22.41	1.27	28.46	1.20	30.36
14	1.44	13.63	1.39	18.31	1.33	22.75	1.27	28.81	1.15	30.65
13	1.48	13.77	1.40	18.53	1.33	23.00	1.27	29.06	1.10	30.84
12	1.51	13.87	1.41	18.70	1.33	23.18	1.27	29.25	1.07	30.98
11	1.53	13.96	1.41	18.81	1.33	23.31	1.27	29.39	1.05	31.08
10	1.54	14.01	1.42	18.89	1.34	23.39	1.27	29.48	1.03	31.16
9	1.54	14.04	1.42	18.91	1.34	23.41	1.28	29.52	1.03	31.19
8	1.53	14.01	1.41	18.85	1.34	23.35	1.28	29.48	1.03	31.14
7	1.51	13.90	1.40	18.67	1.34	23.15	1.29	29.30	1.03	30.95
6	1.46	13.65	1.38	18.31	1.33	22.73	1.29	28.86	1.03	30.51
5	1.39	13.19	1.33	17.66	1.30	21.97	1.28	28.02	1.02	29.66
4	1.29	12.39	1.26	16.57	1.25	20.67	1.25	26.52	0.99	28.12
3	1.14	11.08	1.14	14.81	1.15	18.56	1.17	23.99	0.93	25.49
2	0.93	9.04	0.95	12.10	0.97	15.23	1.01	19.87	0.81	21.17
1	0.64	6.29	0.67	8.43	0.70	10.67	0.75	14.05	0.59	15.01

Table 27

Burnup history of fuel rod No.82 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff=0.00 days.		Teff= 94.86 days.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.50	12.39	0.61	14.12
24	0.66	16.55	0.79	18.81
23	0.78	20.09	0.92	22.75
22	0.86	22.55	1.00	25.46
21	0.91	24.31	1.05	27.39
20	0.97	25.69	1.08	28.91
19	1.02	26.98	1.12	30.35
18	1.09	28.27	1.17	31.81
17	1.14	29.27	1.20	32.95
16	1.19	29.93	1.22	33.71
15	1.22	30.36	1.24	34.20
14	1.25	30.65	1.25	34.53
13	1.28	30.84	1.25	34.77
12	1.30	30.98	1.26	34.96
11	1.33	31.08	1.27	35.11
10	1.36	31.16	1.28	35.24
9	1.38	31.19	1.29	35.31
8	1.41	31.14	1.30	35.31
7	1.42	30.95	1.30	35.16
6	1.43	30.51	1.31	34.73
5	1.42	29.66	1.30	33.84
4	1.38	28.12	1.27	32.19
3	1.29	25.49	1.19	29.30
2	1.11	21.17	1.04	24.47
1	0.82	15.01	0.78	17.45

Table 28

Burnup history of fuel rod No.82 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff.=0.00 days.		Teff= 100.00 days.		Teff=200.00 days.		Teff=306.73 days.	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.46	14.19	0.57	15.90	0.64	17.87	0.68	20.17
24	0.62	18.90	0.75	21.15	0.82	23.71	0.86	26.65
23	0.74	22.85	0.88	25.53	0.95	28.52	0.99	31.89
22	0.82	25.57	0.96	28.53	1.02	31.77	1.05	35.38
21	0.89	27.50	1.02	30.66	1.06	34.05	1.08	37.78
20	0.93	29.03	1.05	32.32	1.08	35.80	1.09	39.58
19	0.97	30.47	1.07	33.86	1.09	37.39	1.09	41.18
18	1.00	31.94	1.08	35.41	1.09	38.95	1.08	42.73
17	1.02	33.08	1.09	36.60	1.08	40.15	1.08	43.92
16	1.04	33.83	1.09	37.40	1.08	40.96	1.07	44.71
15	1.06	34.33	1.09	37.93	1.08	41.49	1.07	45.22
14	1.07	34.66	1.10	38.29	1.08	41.84	1.06	45.57
13	1.07	34.90	1.10	38.55	1.07	42.10	1.06	45.82
12	1.08	35.09	1.10	38.74	1.07	42.29	1.06	46.01
11	1.08	35.24	1.10	38.90	1.08	42.45	1.06	46.18
10	1.08	35.36	1.10	39.02	1.08	42.57	1.07	46.31
9	1.07	35.44	1.10	39.09	1.08	42.65	1.07	46.41
8	1.06	35.44	1.10	39.07	1.09	42.64	1.08	46.43
7	1.05	35.29	1.10	38.89	1.09	42.46	1.09	46.27
6	1.02	34.86	1.09	38.40	1.09	41.95	1.09	45.76
5	0.98	33.97	1.06	37.40	1.08	40.90	1.09	44.68
4	0.93	32.31	1.02	35.58	1.05	38.96	1.07	42.65
3	0.85	29.42	0.95	32.42	0.99	35.57	1.01	39.06
2	0.72	24.57	0.82	27.13	0.86	29.87	0.90	32.94
1	0.52	17.52	0.60	19.40	0.65	21.45	0.69	23.79

Table 29

Burnup history of fuel rod No.116 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.26, the 1st year of operation (Core load 15)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff.=0.00 days		Teff= 100.00 days		Teff=200.00 days		Teff=260.77 days		Teff=296.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.39	—	0.52	1.46	0.63	3.32	0.68	4.61	1.05	5.60
24	0.53	-	0.71	2.00	0.84	4.52	0.90	6.23	1.37	7.54
23	0.68	-	0.88	2.51	1.03	5.62	1.08	7.70	1.62	9.28
22	0.80	-	1.01	2.92	1.15	6.46	1.21	8.79	1.75	10.55
21	0.91	-	1.12	3.27	1.24	7.12	1.29	9.63	1.79	11.48
20	1.01	-	1.20	3.58	1.31	7.70	1.34	10.33	1.77	12.22
19	1.12	-	1.29	3.89	1.37	8.24	1.39	10.99	1.72	12.87
18	1.22	-	1.36	4.20	1.42	8.75	1.43	11.59	1.65	13.44
17	1.33	-	1.43	4.48	1.47	9.22	1.47	12.13	1.57	13.94
16	1.42	-	1.49	4.71	1.50	9.59	1.49	12.56	1.49	14.31
15	1.49	-	1.53	4.90	1.52	9.88	1.50	12.88	1.43	14.58
14	1.56	-	1.56	5.05	1.53	10.10	1.51	13.12	1.37	14.78
13	1.61	-	1.58	5.17	1.54	10.27	1.52	13.31	1.33	14.93
12	1.66	-	1.60	5.27	1.55	10.41	1.52	13.46	1.29	15.04
11	1.69	-	1.61	5.34	1.56	10.51	1.53	13.57	1.26	15.13
10	1.72	-	1.62	5.39	1.56	10.58	1.53	13.65	1.24	15.20
9	1.73	-	1.62	5.41	1.57	10.62	1.54	13.70	1.23	15.23
8	1.73	-	1.62	5.40	1.57	10.60	1.54	13.69	1.22	15.20
7	1.71	-	1.60	5.34	1.56	10.51	1.54	13.59	1.21	15.09
6	1.67	-	1.57	5.21	1.54	10.30	1.53	13.35	1.19	14.83
5	1.59	-	1.52	4.99	1.50	9.91	1.50	12.89	1.16	14.34
4	1.46	-	1.42	4.63	1.43	9.27	1.43	12.11	1.11	13.49
3	1.28	-	1.26	4.08	1.29	8.24	1.31	10.82	1.02	12.09
2	1.02	-	1.02	3.27	1.07	6.68	1.10	8.83	0.85	9.89
1	0.70	-	0.71	2.25	0.76	4.63	0.78	6.15	0.61	6.91

Table 30

Burnup history of fuel rod No.116 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 2nd year of operation (Core load 16)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod										
Node	Teff=0.00 days		Teff= 100.00days		Teff=200.00 days		Teff=343.08 days		Teff=390.00 days	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.38	5.60	0.51	7.07	0.60	8.88	0.68	11.89	1.14	13.35
24	0.53	7.54	0.69	9.54	0.80	11.96	0.88	15.89	1.45	17.78
23	0.66	9.28	0.84	11.75	0.95	14.67	1.03	19.32	1.66	21.53
22	0.76	10.55	0.95	13.37	1.05	16.65	1.12	21.73	1.74	24.12
21	0.86	11.48	1.04	14.62	1.12	18.14	1.17	23.50	1.74	25.96
20	0.96	12.22	1.11	15.65	1.17	19.39	1.20	24.96	1.69	27.42
19	1.07	12.88	1.19	16.63	1.23	20.60	1.23	26.39	1.61	28.79
18	1.20	13.44	1.29	17.57	1.30	21.81	1.28	27.85	1.50	30.14
17	1.31	13.94	1.36	18.38	1.35	22.82	1.30	29.03	1.40	31.21
16	1.40	14.31	1.41	18.98	1.37	23.54	1.32	29.84	1.32	31.91
15	1.47	14.58	1.44	19.42	1.39	24.05	1.32	30.39	1.25	32.37
14	1.53	14.78	1.46	19.74	1.39	24.41	1.32	30.76	1.19	32.66
13	1.57	14.93	1.48	19.97	1.40	24.68	1.32	31.02	1.14	32.87
12	1.60	15.04	1.49	20.15	1.40	24.87	1.32	31.22	1.11	33.02
11	1.62	15.13	1.49	20.28	1.40	25.01	1.32	31.37	1.09	33.13
10	1.64	15.20	1.49	20.36	1.40	25.10	1.32	31.47	1.07	33.21
9	1.64	15.23	1.49	20.39	1.40	25.13	1.33	31.52	1.07	33.24
8	1.62	15.20	1.49	20.33	1.41	25.07	1.33	31.48	1.06	33.20
7	1.60	15.09	1.48	20.15	1.40	24.87	1.34	31.29	1.07	33.01
6	1.55	14.83	1.45	19.77	1.40	24.43	1.34	30.85	1.07	32.57
5	1.48	14.34	1.41	19.09	1.37	23.64	1.34	29.98	1.06	31.69
4	1.37	13.49	1.33	17.94	1.32	22.28	1.31	28.43	1.03	30.10
3	1.22	12.09	1.21	16.07	1.22	20.05	1.23	25.79	0.98	27.36
2	0.99	9.89	1.01	13.16	1.04	16.51	1.07	21.45	0.85	22.82
1	0.69	6.91	0.72	9.21	0.75	11.61	0.80	15.24	0.64	16.26

Table 31

Burnup history of fuel rod No.116 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.24, the 3rd year of operation (Core load 17)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod				
Node	Teff=0.00 days.		Teff= 94.86 days.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.54	13.35	0.65	15.21
24	0.70	17.78	0.84	20.19
23	0.83	21.53	0.97	24.34
22	0.90	24.12	1.05	27.18
21	0.96	25.96	1.09	29.19
20	1.01	27.42	1.13	30.78
19	1.07	28.79	1.17	32.30
18	1.14	30.14	1.22	33.83
17	1.19	31.21	1.25	35.04
16	1.24	31.91	1.27	35.84
15	1.27	32.37	1.28	36.36
14	1.30	32.67	1.29	36.71
13	1.33	32.87	1.30	36.96
12	1.36	33.02	1.30	37.15
11	1.39	33.13	1.31	37.32
10	1.41	33.21	1.32	37.45
9	1.44	33.25	1.33	37.53
8	1.47	33.20	1.34	37.54
7	1.49	33.01	1.35	37.39
6	1.50	32.57	1.35	36.96
5	1.49	31.69	1.35	36.05
4	1.45	30.10	1.32	34.36
3	1.36	27.36	1.25	31.38
2	1.19	22.82	1.10	26.33
1	0.88	16.26	0.83	18.89

Table 32

Burnup history of fuel rod No.116 in fuel assembly operating under reloading conditions '26-->24-->24-->28'. Fuel assembly No.28, the 4th year of operation (Core load 18)

Axial relative power and burnup distribution of fuel rod								
Node	Teff=0.00 days.		Teff= 100.00 days.		Teff=200.00 days.		Teff=306.73 days.	
	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг	PSI	Виг
25	0.50	15.28	0.62	17.11	0.68	19.23	0.73	21.68
24	0.66	20.28	0.80	22.68	0.87	25.39	0.91	28.49
23	0.78	24.45	0.93	27.27	1.00	30.42	1.03	33.94
22	0.87	27.29	1.01	30.40	1.06	33.79	1.09	37.54
21	0.93	29.31	1.06	32.61	1.10	36.14	1.11	40.00
20	0.97	30.91	1.09	34.34	1.12	37.95	1.12	41.85
19	1.01	32.42	1.10	35.95	1.12	39.60	1.12	43.50
18	1.04	33.96	1.11	37.56	1.12	41.22	1.11	45.11
17	1.06	35.18	1.12	38.82	1.11	42.48	1.10	46.34
16	1.07	35.97	1.12	39.66	1.11	43.31	1.09	47.16
15	1.09	36.49	1.12	40.21	1.11	43.86	1.09	47.69
14	1.10	36.84	1.13	40.58	1.10	44.23	1.09	48.05
13	1.11	37.09	1.13	40.85	1.10	44.50	1.08	48.31
12	1.11	37.29	1.13	41.05	1.10	44.70	1.08	48.51
11	1.11	37.45	1.13	41.22	1.10	44.86	1.09	48.68
10	1.11	37.58	1.13	41.35	1.10	45.00	1.09	48.83
9	1.10	37.67	1.13	41.42	1.11	45.08	1.10	48.93
8	1.09	37.67	1.13	41.41	1.11	45.08	1.11	48.95
7	1.08	37.52	1.13	41.23	1.12	44.90	1.11	48.79
6	1.05	37.09	1.11	40.74	1.12	44.39	1.12	48.29
5	1.02	36.18	1.09	39.73	1.11	43.33	1.11	47.20
4	0.96	34.49	1.05	37.88	1.08	41.36	1.09	45.16
3	0.88	31.50	0.98	34.63	1.02	37.90	1.04	41.50
2	0.75	26.44	0.86	29.13	0.90	32.01	0.94	35.22
1	0.56	18.97	0.65	20.98	0.69	23.17	0.73	25.66

Table 33

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 116										
Node	Teff=0.0 days		Teff =100.0		Teff =200.0		Teff =260.77		Teff =296.00	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	49.5	314.1	66.7	315.4	80.6	315.9	86.6	315.2	127.4
24	316.3	68.5	319.4	90.6	321.7	107.7	322.6	114.9	324.8	166.6
23	318.3	87.1	321.8	112.7	324.2	131.7	325.2	138.9	327.8	196.8
22	320.0	102.5	323.4	129.8	325.9	148.1	326.5	154.7	328.9	212.6
21	321.1	116.3	324.2	143.0	326.6	159.6	327.0	165.1	328.7	217.8
20	321.6	129.7	324.8	154.4	326.5	168.6	326.7	172.7	327.2	215.9
19	322.3	143.1	324.6	164.7	325.9	175.9	326.1	178.6	325.0	209.4
18	323.0	156.6	324.4	175.1	325.1	182.4	325.2	183.6	322.1	200.4
17	323.1	170.1	324.0	183.4	324.6	187.7	324.4	187.6	318.9	190.5
16	323.3	181.7	323.7	190.4	323.3	192.5	322.8	190.6	315.9	181.9
15	323.2	191.2	322.6	195.9	322.2	194.7	321.3	192.7	313.2	174.1
14	322.3	199.4	321.1	199.5	320.4	196.2	319.8	193.6	310.7	166.7
13	321.7	206.4	319.9	202.3	319.1	197.4	318.3	194.4	308.3	161.2
12	320.7	212.2	318.5	204.5	317.3	198.3	316.5	195.1	305.9	156.8
11	319.4	216.9	316.6	206.2	315.6	199.1	315.0	195.8	304.0	153.4
10	317.8	220.2	314.8	207.4	313.7	199.9	313.1	196.6	301.9	150.9
9	316.1	222.0	313.0	207.9	311.7	200.5	311.2	197.4	300.3	149.7
8	313.9	221.8	311.2	207.5	310.0	200.8	309.5	197.2	298.8	148.3
7	311.6	219.1	308.8	205.6	308.1	200.1	307.6	197.1	297.1	146.9
6	309.1	214.0	306.3	201.6	305.9	197.9	305.6	195.7	295.3	144.9
5	305.6	203.5	303.9	194.0	303.4	192.8	303.2	192.5	293.6	141.4
4	302.1	187.7	300.5	181.3	300.8	182.8	300.7	184.1	291.8	135.4
3	297.4	164.1	296.7	161.4	297.0	166.0	297.6	168.2	289.4	123.7
2	291.9	130.8	291.7	131.3	292.4	136.9	292.7	140.3	286.0	103.6
1	288.3	89.3	288.3	90.8	289.1	96.7	289.6	100.3	283.6	74.0

Table 34

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 16										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =260.77 days		Teff =296.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	40.8	314.1	54.5	315.4	65.6	315.9	70.5	315.2	99.9
24	316.3	57.0	319.4	74.8	321.7	88.5	322.6	94.0	324.8	132.0
23	318.3	73.2	321.8	93.4	324.2	108.2	325.2	114.2	327.8	156.7
22	320.0	86.5	323.4	108.0	325.9	122.3	326.5	127.9	328.9	170.1
21	321.1	98.7	324.2	119.0	326.6	132.4	327.0	136.4	328.7	175.1
20	321.6	110.1	324.8	128.7	326.5	139.3	326.7	142.9	327.2	174.5
19	322.3	120.9	324.6	136.7	325.9	145.5	326.1	147.9	325.0	170.0
18	323.0	132.5	324.4	144.8	325.1	150.2	325.2	152.2	322.1	163.5
17	323.1	142.7	324.0	151.1	324.6	154.8	324.4	154.8	318.9	156.1
16	323.3	152.5	323.7	156.2	323.3	157.4	322.8	156.6	315.9	149.0
15	323.2	160.5	322.6	160.1	322.2	159.2	321.3	158.5	313.2	143.3
14	322.3	167.4	321.1	163.8	320.4	160.5	319.8	159.3	310.7	137.8
13	321.7	173.3	319.9	166.1	319.1	161.4	318.3	159.9	308.3	133.3
12	320.7	178.2	318.5	168.0	317.3	163.0	316.5	160.4	305.9	129.6
11	319.4	181.2	316.6	169.3	315.6	162.9	315.0	161.0	304.0	126.8
10	317.8	183.9	314.8	169.4	313.7	163.5	313.1	161.7	301.9	124.7
9	316.1	185.4	313.0	169.9	311.7	164.0	311.2	162.4	300.3	123.2
8	313.9	185.3	311.2	169.5	310.0	164.2	309.5	162.8	298.8	122.1
7	311.6	183.1	308.8	168.0	308.1	163.6	307.6	162.0	297.1	120.3
6	309.1	177.1	306.3	164.7	305.9	161.8	305.6	160.9	295.3	118.7
5	305.6	168.4	303.9	157.7	303.4	156.9	303.2	157.6	293.6	115.9
4	302.1	154.0	300.5	147.4	300.8	148.7	300.7	150.0	291.8	109.9
3	297.4	134.1	296.7	130.0	297.0	133.9	297.6	136.4	289.4	99.9
2	291.9	105.5	291.7	104.9	292.4	109.8	292.7	112.6	286.0	82.9
1	288.3	71.1	288.3	71.9	289.1	76.9	289.6	79.7	283.6	58.6

Table 35

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 32										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =260.77 days		Teff =296.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	41.7	314.1	55.6	315.4	67.0	315.9	71.9	315.2	102.9
24	316.3	57.9	319.4	75.9	321.7	89.9	322.6	95.9	324.8	135.3
23	318.3	74.3	321.8	95.3	324.2	110.3	325.2	116.5	327.8	160.6
22	320.0	87.8	323.4	109.7	325.9	124.8	326.5	129.8	328.9	174.3
21	321.1	100.1	324.2	120.8	326.6	134.4	327.0	139.2	328.7	179.5
20	321.6	111.7	324.8	130.6	326.5	142.1	326.7	145.0	327.2	178.8
19	322.3	122.7	324.6	139.4	325.9	147.7	326.1	150.1	325.0	173.4
18	323.0	134.4	324.4	147.0	325.1	153.2	325.2	154.4	322.1	166.7
17	323.1	145.5	324.0	154.1	324.6	157.1	324.4	157.9	318.9	159.1
16	323.3	154.7	323.7	159.3	323.3	160.5	322.8	159.7	315.9	151.9
15	323.2	162.9	322.6	163.3	322.2	162.4	321.3	161.6	313.2	146.1
14	322.3	169.9	321.1	166.3	320.4	163.6	319.8	162.4	310.7	140.5
13	321.7	175.8	319.9	168.6	319.1	164.6	318.3	163.0	308.3	135.9
12	320.7	180.8	318.5	170.5	317.3	165.4	316.5	163.6	305.9	132.2
11	319.4	184.8	316.6	171.9	315.6	166.1	315.0	164.2	304.0	129.3
10	317.8	187.6	314.8	172.8	313.7	166.7	313.1	164.9	301.9	127.2
9	316.1	188.2	313.0	173.3	311.7	167.3	311.2	165.6	300.3	125.6
8	313.9	188.0	311.2	172.9	310.0	167.4	309.5	165.2	298.8	124.5
7	311.6	185.8	308.8	171.4	308.1	166.9	307.6	165.2	297.1	123.3
6	309.1	180.7	306.3	167.1	305.9	164.2	305.6	164.0	295.3	121.1
5	305.6	171.8	303.9	160.9	303.4	160.0	303.2	159.9	293.6	118.1
4	302.1	157.1	300.5	150.3	300.8	151.7	300.7	152.9	291.8	112.1
3	297.4	136.7	296.7	133.3	297.0	136.5	297.6	139.1	289.4	101.9
2	291.9	108.1	291.7	107.0	292.4	112.0	292.7	115.4	286.0	85.0
1	288.3	72.9	288.3	73.7	289.1	78.8	289.6	81.7	283.6	60.1

Table 36

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 54										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =260.77 days		Teff =296.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	43.3	314.1	57.8	315.4	69.6	315.9	74.8	315.2	108.0
24	316.3	60.2	319.4	78.9	321.7	93.4	322.6	99.7	324.8	142.0
23	318.3	76.9	321.8	98.6	324.2	114.7	325.2	120.6	327.8	168.5
22	320.0	90.8	323.4	113.5	325.9	129.1	326.5	134.9	328.9	182.0
21	321.1	103.1	324.2	125.6	326.6	139.1	327.0	143.9	328.7	187.3
20	321.6	115.0	324.8	135.1	326.5	147.0	326.7	150.7	327.2	186.5
19	322.3	126.9	324.6	144.2	325.9	153.5	326.1	155.9	325.0	180.9
18	323.0	139.0	324.4	152.7	325.1	159.2	325.2	160.4	322.1	173.9
17	323.1	150.4	324.0	160.1	324.6	163.2	324.4	164.0	318.9	166.0
16	323.3	160.0	323.7	165.5	323.3	166.8	322.8	165.9	315.9	158.5
15	323.2	168.4	322.6	169.6	322.2	168.7	321.3	167.8	313.2	151.7
14	322.3	175.6	321.1	172.8	320.4	170.0	319.8	168.7	310.7	145.9
13	321.7	181.8	319.9	175.2	319.1	171.0	318.3	169.3	308.3	141.1
12	320.7	186.9	318.5	177.1	317.3	171.8	316.5	169.9	305.9	137.2
11	319.4	191.0	316.6	178.6	315.6	172.5	315.0	170.5	304.0	134.3
10	317.8	193.9	314.8	179.6	313.7	173.2	313.1	171.2	301.9	132.0
9	316.1	195.5	313.0	180.0	311.7	173.8	311.2	171.9	300.3	130.4
8	313.9	195.3	311.2	179.7	310.0	173.9	309.5	172.4	298.8	129.2
7	311.6	192.1	308.8	178.0	308.1	173.4	307.6	171.6	297.1	128.0
6	309.1	186.8	306.3	173.7	305.9	171.4	305.6	170.4	295.3	126.3
5	305.6	177.6	303.9	167.2	303.4	166.2	303.2	166.9	293.6	122.7
4	302.1	163.2	300.5	156.2	300.8	157.6	300.7	158.9	291.8	117.0
3	297.4	142.7	296.7	138.5	297.0	142.6	297.6	145.2	289.4	106.4
2	291.9	112.9	291.7	112.3	292.4	117.0	292.7	120.5	286.0	88.7
1	288.3	76.4	288.3	77.4	289.1	82.3	289.6	85.4	283.6	63.0

Table 37

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 6										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =260.77 days		Teff =296.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	41	314.1	54.8	315.4	66.0	315.9	71.2	315.2	99.9
24	316.3	57.3	319.4	75.1	321.7	89.0	322.6	95.0	324.8	132.0
23	318.3	73.6	321.8	94.3	324.2	109.3	325.2	115.4	327.8	156.7
22	320.0	87.4	323.4	109.1	325.9	123.6	326.5	129.2	328.9	170.1
21	321.1	99.6	324.2	120.2	326.6	133.8	327.0	138.5	328.7	176.0
20	321.6	111.2	324.8	130.0	326.5	141.4	326.7	144.3	327.2	175.3
19	322.3	122.1	324.6	138.1	325.9	147.0	326.1	149.4	325.0	170.8
18	323.0	133.8	324.4	146.2	325.1	151.7	325.2	152.9	322.1	164.3
17	323.1	144.1	324.0	152.6	324.6	156.3	324.4	156.4	318.9	157.6
16	323.3	153.2	323.7	157.8	323.3	159.0	322.8	158.2	315.9	150.5
15	323.2	161.3	322.6	161.7	322.2	160.8	321.3	159.3	313.2	144.0
14	322.3	168.2	321.1	164.7	320.4	162.1	319.8	160.1	310.7	138.5
13	321.7	174.1	319.9	167.0	319.1	163.0	318.3	161.5	308.3	133.9
12	320.7	179.1	318.5	168.8	317.3	163.8	316.5	162.0	305.9	130.3
11	319.4	183.0	316.6	170.2	315.6	164.5	315.0	162.6	304.0	127.4
10	317.8	185.7	314.8	171.1	313.7	165.1	313.1	163.3	301.9	125.3
9	316.1	187.3	313.0	171.6	311.7	165.6	311.2	164.0	300.3	123.8
8	313.9	187.1	311.2	171.2	310.0	165.8	309.5	163.6	298.8	122.7
7	311.6	184.0	308.8	169.7	308.1	165.3	307.6	163.6	297.1	121.5
6	309.1	178.9	306.3	165.5	305.9	162.6	305.6	162.4	295.3	119.9
5	305.6	169.3	303.9	159.3	303.4	158.4	303.2	158.4	293.6	116.4
4	302.1	155.5	300.5	148.1	300.8	149.5	300.7	151.5	291.8	110.5
3	297.4	134.7	296.7	131.3	297.0	135.2	297.6	137.0	289.4	100.4
2	291.9	106.0	291.7	105.5	292.4	110.4	292.7	113.7	286.0	83.3
1	288.3	71.1	288.3	71.9	289.1	77.3	289.6	80.1	283.6	58.9

Table 38

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 15, FA 26, fuel rod 82										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =260.77 days		Teff =296.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	312.5	45.8	314.1	61.4	315.4	74.0	315.9	79.8	315.2	116.2
24	316.3	63.6	319.4	83.8	321.7	99.2	322.6	105.9	324.8	152.0
23	318.3	80.9	321.8	104.2	324.2	121.3	325.2	128.0	327.8	180.3
22	320.0	95.6	323.4	120.0	325.9	136.5	326.5	142.6	328.9	194.7
21	321.1	108.5	324.2	132.2	326.6	147.7	327.0	152.8	328.7	200.4
20	321.6	121.0	324.8	142.8	326.5	155.3	326.7	159.9	327.2	198.6
19	322.3	133.5	324.6	152.4	325.9	162.2	326.1	165.5	325.0	192.6
18	323.0	146.2	324.4	161.4	325.1	168.2	325.2	170.1	322.1	185.2
17	323.1	158.1	324.0	169.1	324.6	173.2	324.4	173.9	318.9	176.0
16	323.3	168.9	323.7	175.6	323.3	176.9	322.8	175.9	315.9	168.0
15	323.2	177.8	322.6	180.0	322.2	179.7	321.3	177.9	313.2	160.8
14	322.3	185.4	321.1	184.1	320.4	181.1	319.8	178.8	310.7	154.6
13	321.7	192.0	319.9	186.7	319.1	182.2	318.3	179.5	308.3	149.5
12	320.7	197.4	318.5	188.7	317.3	183.1	316.5	180.1	305.9	145.5
11	319.4	201.7	316.6	189.5	315.6	183.8	315.0	180.8	304.0	142.3
10	317.8	204.8	314.8	190.5	313.7	184.5	313.1	181.5	301.9	139.9
9	316.1	206.5	313.0	191.0	311.7	185.1	311.2	182.3	300.3	138.2
8	313.9	205.4	311.2	190.6	310.0	185.3	309.5	182.8	298.8	137.0
7	311.6	202.9	308.8	188.9	308.1	183.9	307.6	182.7	297.1	135.7
6	309.1	197.3	306.3	185.2	305.9	181.9	305.6	180.7	295.3	133.9
5	305.6	188.4	303.9	178.2	303.4	177.2	303.2	177.0	293.6	130.6
4	302.1	173.2	300.5	166.5	300.8	168.0	300.7	169.3	291.8	124.6
3	297.4	151.4	296.7	147.6	297.0	151.9	297.6	154.7	289.4	113.8
2	291.9	120.2	291.7	119.7	292.4	125.3	292.7	128.5	286.0	94.9
1	288.3	81.4	288.3	82.8	289.1	88.1	289.6	91.4	283.6	67.5

Table 39

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 116										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	49.1	311.9	65.9	312.7	77.2	313.0	87.5	309.8	125.7
24	315.1	67.4	316.9	88.5	319.0	102.0	319.8	113.0	319.4	159.8
23	317.0	84.3	318.8	107.8	321.4	121.5	321.9	131.9	322.2	182.6
22	318.3	98.0	320.3	121.5	322.6	134.8	322.8	143.0	322.8	192.2
21	319.5	110.3	320.9	132.9	322.9	143.3	322.8	149.5	321.8	191.9
20	320.2	122.5	321.6	142.3	322.5	150.7	322.2	153.5	319.6	186.3
19	321.0	137.3	321.8	152.9	321.8	157.5	321.2	158.4	316.9	176.6
18	322.1	153.5	322.1	164.6	321.3	166.1	320.0	163.8	313.5	165.8
17	323.1	167.8	322.2	174.1	320.3	172.4	318.8	167.3	310.1	154.3
16	323.6	179.7	321.8	180.4	318.9	176.1	317.4	168.4	307.2	145.3
15	323.1	188.7	320.8	185.1	317.6	177.4	315.8	168.9	304.8	137.4
14	322.6	195.4	319.6	187.3	316.2	178.4	314.1	168.9	302.2	131.2
13	321.8	201.1	318.3	189.2	314.6	178.8	312.5	168.8	300.3	126.3
12	320.6	205.3	316.8	190.5	312.8	179.2	310.7	168.9	298.2	122.7
11	319.2	208.2	314.9	191.3	311.2	179.5	309.2	169.1	296.8	119.7
10	317.4	209.8	313.3	191.6	309.7	179.9	307.7	169.7	295.2	118.3
9	315.3	209.9	311.2	191.6	307.8	180.2	306.1	170.5	293.9	117.2
8	313.2	208.1	309.3	190.8	306.2	180.4	304.9	171.4	293.0	117.4
7	310.6	204.3	307.1	189.1	304.5	180.2	303.3	172.2	291.8	117.4
6	307.9	198.5	305.0	186.4	302.8	178.9	301.7	172.5	290.4	117.5
5	304.7	189.4	302.3	180.3	300.8	175.5	299.9	171.4	289.6	116.7
4	300.8	175.6	299.4	171.0	298.4	169.3	297.9	167.3	287.9	113.9
3	296.7	155.9	296.0	155.3	295.6	156.6	295.5	158.2	286.5	107.3
2	291.5	127.3	291.5	129.7	291.7	132.9	292.0	137.7	283.7	93.9
1	288.1	88.3	288.3	92.0	288.8	96.6	289.4	102.4	282.0	70.1

Table 40

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 16										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	42.7	311.9	56.7	312.7	66.5	313.0	75.4	309.8	105.6
24	315.1	58.5	316.9	76.5	319.0	88.3	319.8	98.3	319.4	136.7
23	317.0	73.5	318.8	93.7	321.4	106.1	321.9	115.9	322.2	157.6
22	318.3	85.9	320.3	106.6	322.6	117.8	322.8	126.4	322.8	166.7
21	319.5	97.1	320.9	116.6	322.9	126.4	322.8	132.8	321.8	167.9
20	320.2	108.5	321.6	125.0	322.5	133.1	322.2	137.1	319.6	163.8
19	321.0	120.7	321.8	134.6	321.8	139.4	321.2	141.1	316.9	156.0
18	322.1	134.8	322.1	144.7	321.3	146.8	320.0	146.3	313.5	147.3
17	323.1	147.2	322.2	153.0	320.3	152.5	318.8	149.5	310.1	138.4
16	323.6	157.6	321.8	158.5	318.9	155.8	317.4	151.0	307.2	130.4
15	323.1	165.3	320.8	162.6	317.6	156.8	315.8	151.5	304.8	123.9
14	322.6	171.9	319.6	165.2	316.2	157.6	314.1	151.6	302.2	118.3
13	321.8	176.1	318.3	166.9	314.6	158.1	312.5	151.5	300.3	113.9
12	320.6	179.8	316.8	168.1	312.8	158.3	310.7	151.5	298.2	110.6
11	319.2	182.3	314.9	168.8	311.2	159.4	309.2	151.7	296.8	108.4
10	317.4	183.7	313.3	169.1	309.7	159.7	307.7	152.2	295.2	106.6
9	315.3	184.6	311.2	169.0	307.8	160.0	306.1	152.9	293.9	106.1
8	313.2	183.1	309.3	168.4	306.2	160.2	304.9	153.8	293.0	105.7
7	310.6	179.7	307.1	166.8	304.5	160.0	303.3	154.5	291.8	105.7
6	307.9	174.8	305.0	163.8	302.8	158.1	301.7	154.8	290.4	105.8
5	304.7	166.0	302.3	158.4	300.8	155.1	299.9	153.1	289.6	104.6
4	300.8	153.3	299.4	149.7	298.4	148.3	297.9	148.7	287.9	101.6
3	296.7	135.6	296.0	134.7	295.6	136.0	295.5	138.7	286.5	94.9
2	291.5	109.3	291.5	111.0	291.7	114.9	292.0	119.6	283.7	81.5
1	288.1	75.6	288.3	78.4	288.8	82.0	289.4	87.3	282.0	59.6

Table 41

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 32										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	42.9	311.9	56.9	312.7	66.8	313.0	75.8	309.8	107.2
24	315.1	59.1	316.9	76.9	319.0	88.7	319.8	98.8	319.4	138.0
23	317.0	73.9	318.8	94.2	321.4	106.6	321.9	117.0	322.2	159.9
22	318.3	86.3	320.3	107.1	322.6	119.0	322.8	127.0	322.8	169.0
21	319.5	97.6	320.9	117.2	322.9	127.1	322.8	133.4	321.8	169.5
20	320.2	108.5	321.6	126.3	322.5	133.8	322.2	137.8	319.6	165.4
19	321.0	121.3	321.8	135.2	321.8	140.1	321.2	142.4	316.9	158.2
18	322.1	135.5	322.1	146.1	321.3	148.2	320.0	147.6	313.5	148.7
17	323.1	148.6	322.2	154.5	320.3	153.9	318.8	150.9	310.1	139.7
16	323.6	158.3	321.8	160.0	318.9	157.2	317.4	152.4	307.2	131.6
15	323.1	166.1	320.8	164.2	317.6	158.2	315.8	152.9	304.8	125.0
14	322.6	172.8	319.6	166.0	316.2	159.1	314.1	152.9	302.2	119.3
13	321.8	177.8	318.3	167.7	314.6	159.5	312.5	152.9	300.3	114.9
12	320.6	181.5	316.8	168.9	312.8	159.8	310.7	152.9	298.2	111.6
11	319.2	184.1	314.9	169.6	311.2	160.1	309.2	153.1	296.8	109.4
10	317.4	185.5	313.3	169.9	309.7	160.5	307.7	153.6	295.2	108.1
9	315.3	185.5	311.2	169.8	307.8	160.8	306.1	154.3	293.9	107.1
8	313.2	184.0	309.3	169.2	306.2	161.0	304.9	155.2	293.0	106.7
7	310.6	180.6	307.1	168.4	304.5	160.8	303.3	155.9	291.8	107.1
6	307.9	175.6	305.0	165.3	302.8	159.6	301.7	156.2	290.4	106.8
5	304.7	166.8	302.3	159.9	300.8	156.6	299.9	154.5	289.6	105.5
4	300.8	154.8	299.4	151.1	298.4	149.7	297.9	150.1	287.9	102.6
3	296.7	136.3	296.0	135.9	295.6	137.3	295.5	140.7	286.5	95.7
2	291.5	110.4	291.5	112.1	291.7	116.0	292.0	120.7	283.7	82.3
1	288.1	76.3	288.3	79.1	288.8	83.2	289.4	88.1	282.0	60.5

Table 42

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 54										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	44.0	311.9	58.7	312.7	68.8	313.0	78.1	309.8	110.8
24	315.1	60.5	316.9	79.3	319.0	91.4	319.8	101.8	319.4	142.7
23	317.0	75.7	318.8	97.0	321.4	109.3	321.9	119.9	322.2	164.5
22	318.3	88.0	320.3	109.8	322.6	121.9	322.8	130.1	322.8	173.8
21	319.5	99.5	320.9	120.1	322.9	130.2	322.8	136.6	321.8	175.1
20	320.2	111.2	321.6	128.7	322.5	137.0	322.2	141.0	319.6	170.8
19	321.0	124.2	321.8	138.5	321.8	143.4	321.2	145.7	316.9	162.6
18	322.1	139.3	322.1	149.5	321.3	151.6	320.0	151.0	313.5	152.8
17	323.1	152.2	322.2	158.1	320.3	157.4	318.8	154.3	310.1	143.5
16	323.6	162.2	321.8	163.8	318.9	160.8	317.4	155.9	307.2	135.2
15	323.1	171.0	320.8	168.0	317.6	162.7	315.8	156.4	304.8	127.8
14	322.6	176.9	319.6	170.7	316.2	163.5	314.1	157.1	302.2	122.0
13	321.8	182.1	318.3	172.5	314.6	164.0	312.5	157.0	300.3	117.5
12	320.6	185.9	316.8	173.7	312.8	164.3	310.7	157.1	298.2	114.2
11	319.2	188.6	314.9	174.4	311.2	164.6	309.2	157.3	296.8	111.8
10	317.4	190.0	313.3	174.7	309.7	164.9	307.7	157.8	295.2	110.5
9	315.3	190.1	311.2	174.7	307.8	165.3	306.1	158.5	293.9	109.5
8	313.2	188.5	309.3	174.0	306.2	165.5	304.9	158.7	293.0	109.6
7	310.6	185.0	307.1	172.4	304.5	165.2	303.3	159.5	291.8	109.6
6	307.9	179.9	305.0	169.2	302.8	164.0	301.7	159.7	290.4	109.2
5	304.7	170.9	302.3	163.7	300.8	160.2	299.9	158.7	289.6	108.4
4	300.8	158.5	299.4	154.7	298.4	153.9	297.9	154.3	287.9	105.4
3	296.7	140.2	296.0	139.8	295.6	141.1	295.5	143.9	286.5	98.4
2	291.5	113.6	291.5	115.8	291.7	119.2	292.0	124.1	283.7	85.0
1	288.1	78.5	288.3	81.4	288.8	85.5	289.4	91.0	282.0	62.2

Table 43

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 6										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	43.3	311.9	57.8	312.7	67.8	313.0	76.9	309.8	107.2
24	315.1	59.7	316.9	78.1	319.0	90.0	319.8	100.3	319.4	138.0
23	317.0	75.0	318.8	95.6	321.4	108.2	321.9	118.2	322.2	159.2
22	318.3	87.6	320.3	108.7	322.6	120.2	322.8	128.8	322.8	168.2
21	319.5	99.0	320.9	119.0	322.9	128.9	322.8	134.7	321.8	169.5
20	320.2	110.6	321.6	127.5	322.5	135.7	322.2	139.1	319.6	165.4
19	321.0	123.1	321.8	137.2	321.8	142.1	321.2	143.1	316.9	157.5
18	322.1	137.4	322.1	147.5	321.3	148.9	320.0	148.3	313.5	148.7
17	323.1	150.0	322.2	155.2	320.3	154.6	318.8	150.9	310.1	139.7
16	323.6	159.9	321.8	160.7	318.9	157.2	317.4	152.4	307.2	131.6
15	323.1	167.7	320.8	164.9	317.6	159.0	315.8	152.9	304.8	125.0
14	322.6	174.4	319.6	167.6	316.2	159.8	314.1	152.9	302.2	119.3
13	321.8	179.5	318.3	169.3	314.6	160.3	312.5	152.9	300.3	114.9
12	320.6	183.3	316.8	170.5	312.8	160.6	310.7	152.9	298.2	111.6
11	319.2	185.9	314.9	171.2	311.2	160.9	309.2	153.1	296.8	109.4
10	317.4	187.3	313.3	171.5	309.7	161.2	307.7	153.6	295.2	108.1
9	315.3	187.3	311.2	171.4	307.8	161.5	306.1	155.0	293.9	107.1
8	313.2	185.8	309.3	170.8	306.2	161.7	304.9	155.9	293.0	106.7
7	310.6	183.2	307.1	169.2	304.5	161.5	303.3	156.6	291.8	106.7
6	307.9	177.3	305.0	166.1	302.8	160.3	301.7	156.2	290.4	106.8
5	304.7	169.3	302.3	160.7	300.8	157.3	299.9	155.2	289.6	105.5
4	300.8	156.3	299.4	151.8	298.4	151.1	297.9	150.8	287.9	102.6
3	296.7	137.6	296.0	137.2	295.6	138.6	295.5	140.7	286.5	95.7
2	291.5	111.4	291.5	113.1	291.7	116.5	292.0	121.3	283.7	82.7
1	288.1	76.7	288.3	79.5	288.8	83.6	289.4	88.9	282.0	60.8

Table 44

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 16 FA 24 fuel rod 82										
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =343.08 days		Teff =390.00 days	
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm
25	311.5	46.1	311.9	61.6	312.7	72.2	313.0	81.8	309.8	117.0
24	315.1	63.2	316.9	82.7	319.0	95.4	319.8	106.2	319.4	149.9
23	317.0	79.1	318.8	101.2	321.4	114.6	321.9	125.0	322.2	172.8
22	318.3	91.9	320.3	114.6	322.6	127.2	322.8	135.6	322.8	181.8
21	319.5	103.9	320.9	124.8	322.9	135.8	322.8	141.8	321.8	182.3
20	320.2	115.5	321.6	134.3	322.5	142.2	322.2	146.3	319.6	177.8
19	321.0	129.0	321.8	144.4	321.8	149.4	321.2	151.1	316.9	169.2
18	322.1	145.1	322.1	155.7	321.3	157.8	320.0	156.4	313.5	158.3
17	323.1	158.6	322.2	164.6	320.3	163.9	318.8	160.5	310.1	148.6
16	323.6	169.0	321.8	171.3	318.9	167.4	317.4	162.1	307.2	139.4
15	323.1	178.2	320.8	175.0	317.6	169.3	315.8	162.0	304.8	132.3
14	322.6	184.5	319.6	177.8	316.2	170.2	314.1	162.0	302.2	126.3
13	321.8	189.9	318.3	179.6	314.6	170.7	312.5	161.9	300.3	121.6
12	320.6	193.9	316.8	180.9	312.8	170.2	310.7	161.9	298.2	118.2
11	319.2	196.6	314.9	181.6	311.2	170.6	309.2	162.2	296.8	115.8
10	317.4	198.1	313.3	181.2	309.7	170.9	307.7	162.7	295.2	113.9
9	315.3	198.2	311.2	181.1	307.8	171.2	306.1	163.4	293.9	113.3
8	313.2	196.5	309.3	181.2	306.2	171.5	304.9	164.3	293.0	113.0
7	310.6	192.9	307.1	179.5	304.5	171.2	303.3	165.1	291.8	113.5
6	307.9	187.5	305.0	176.2	302.8	169.9	301.7	165.4	290.4	113.1
5	304.7	178.1	302.3	170.5	300.8	166.8	299.9	164.3	289.6	112.3
4	300.8	165.2	299.4	161.1	298.4	160.2	297.9	160.5	287.9	109.2
3	296.7	146.1	296.0	146.3	295.6	147.6	295.5	150.4	286.5	102.4
2	291.5	118.8	291.5	121.1	291.7	124.7	292.0	129.8	283.7	88.9
1	288.1	82.1	288.3	85.9	288.8	89.9	289.4	95.7	282.0	65.7

Table 45

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 116							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	69.2	311.7	83.8	312.1	87.4	15.3
24	317.1	89.7	318.4	107.6	318.6	112.3	20.3
23	318.7	106.0	320.4	124.5	320.6	130.3	24.4
22	319.5	116.0	320.9	134.6	321.7	141.5	27.2
21	319.9	122.9	321.1	140.2	321.5	149.4	29.3
20	319.9	129.4	320.4	144.9	321.3	156.4	30.9
19	319.2	137.1	319.4	149.3	320.3	163.8	32.4
18	319.0	145.9	318.8	156.0	319.5	167.3	33.9
17	318.2	152.9	317.7	159.7	317.9	167.6	35.2
16	317.4	158.2	316.4	162.2	316.6	167.1	36.0
15	316.5	162.9	315.1	164.0	314.8	166.2	36.5
14	315.6	166.9	313.8	165.1	313.2	165.2	36.8
13	314.7	170.6	312.4	166.0	311.7	164.5	37.0
12	313.6	174.1	310.8	166.8	310.0	164.0	37.2
11	312.5	177.6	309.5	167.8	308.3	163.8	37.4
10	311.3	181.1	308.0	168.9	306.6	164.6	37.6
9	309.7	185.1	306.5	170.8	305.2	165.0	37.7
8	308.4	188.0	305.0	172.0	303.4	165.6	37.7
7	306.9	190.2	303.4	173.0	301.9	166.0	37.6
6	305.1	191.9	301.7	173.3	300.5	166.0	37.1
5	303.6	190.6	300.0	172.9	298.6	165.3	36.2
4	301.2	186.2	298.0	169.1	296.9	161.5	34.5
3	298.1	174.5	295.5	160.4	294.6	153.1	31.5
2	294.3	151.8	292.1	140.9	291.2	134.5	26.4
1	291.1	113.2	289.5	107.0	288.6	101.9	19.0

Table 46

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 16							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	59.7	311.7	72.4	312.1	75.2	12.9
24	317.1	78.7	318.4	94.0	318.6	98.2	17.2
23	318.7	93.4	320.4	110.9	320.6	115.6	20.9
22	319.5	103.8	320.9	120.6	321.7	126.8	23.5
21	319.9	110.5	321.1	126.8	321.5	134.7	25.2
20	319.9	117.0	320.4	131.2	321.3	141.3	26.6
19	319.2	123.6	319.4	136.0	320.3	147.7	27.9
18	319.0	131.2	318.8	141.2	319.5	151.0	29.3
17	318.2	137.8	317.7	145.3	317.9	151.8	30.2
16	317.4	142.6	316.4	147.7	316.6	151.4	30.9
15	316.5	146.8	315.1	149.3	314.8	151.3	31.5
14	315.6	150.4	313.8	150.3	313.2	150.4	31.7
13	314.7	153.7	312.4	151.1	311.7	149.7	31.9
12	313.6	156.9	310.8	151.8	310.0	149.3	32.1
11	312.5	160.1	309.5	152.7	308.3	149.1	32.3
10	311.3	163.2	308.0	153.7	306.6	149.2	32.4
9	309.7	166.1	306.5	154.8	305.2	149.6	32.5
8	308.4	168.7	305.0	155.9	303.4	150.1	32.4
7	306.9	170.7	303.4	156.9	301.9	150.5	32.3
6	305.1	170.8	301.7	157.1	300.5	150.5	31.9
5	303.6	169.6	300.0	155.4	298.6	148.6	31
4	301.2	164.3	298.0	151.3	296.9	144.5	29.4
3	298.1	152.5	295.5	141.6	294.6	135.2	26.7
2	294.3	130.3	292.1	122.2	291.2	116.6	22.2
1	291.1	94.9	289.5	90.2	288.6	86.3	15.7

Table 47

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 32							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	60.0	311.7	72.8	312.1	75.6	13.1
24	317.1	79.1	318.4	94.5	318.6	98.7	17.4
23	318.7	93.9	320.4	110.9	320.6	116.2	21.1
22	319.5	103.8	320.9	121.2	321.7	127.5	23.7
21	319.9	111.0	321.1	127.4	321.5	135.3	25.5
20	319.9	117.0	320.4	131.8	321.3	141.9	27.0
19	319.2	124.2	319.4	136.7	320.3	149.0	28.2
18	319.0	131.8	318.8	142.4	319.5	152.4	29.6
17	318.2	138.4	317.7	146.6	317.9	153.2	30.7
16	317.4	143.3	316.4	149.0	316.6	152.8	31.4
15	316.5	147.5	315.1	150.6	314.8	152.6	31.8
14	315.6	151.1	313.8	151.6	313.2	151.8	32.2
13	314.7	154.4	312.4	152.4	311.7	151.0	32.4
12	313.6	157.6	310.8	153.2	310.0	150.6	32.6
11	312.5	160.8	309.5	154.1	308.3	150.4	32.7
10	311.3	164.7	308.0	155.1	306.6	150.6	32.7
9	309.7	167.6	306.5	156.2	305.2	150.9	32.8
8	308.4	170.3	305.0	157.3	303.4	151.5	32.8
7	306.9	172.3	303.4	158.3	301.9	151.9	32.7
6	305.1	172.3	301.7	158.5	300.5	151.8	32.2
5	303.6	171.1	300.0	156.8	298.6	150.6	31.4
4	301.2	165.8	298.0	152.6	296.9	145.8	29.8
3	298.1	153.9	295.5	142.9	294.6	136.4	27.1
2	294.3	131.5	292.1	123.9	291.2	118.3	22.5
1	291.1	95.8	289.5	91.1	288.6	87.1	16.0

Table 48

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 54							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	61.5	311.7	74.6	312.1	77.9	13.4
24	317.1	80.6	318.4	96.8	318.6	101.1	18.0
23	318.7	95.7	320.4	113.6	320.6	119.0	21.8
22	319.5	105.8	320.9	123.6	321.7	129.9	24.4
21	319.9	113.2	321.1	129.8	321.5	137.9	26.2
20	319.9	119.3	320.4	134.3	321.3	145.2	27.7
19	319.2	126.5	319.4	139.2	320.3	151.7	29.2
18	319.0	134.9	318.8	145.0	319.5	155.8	30.4
17	318.2	141.6	317.7	149.2	317.9	156.6	31.5
16	317.4	146.5	316.4	152.3	316.6	156.2	32.2
15	316.5	150.8	315.1	153.3	314.8	155.3	32.8
14	315.6	154.5	313.8	155.0	313.2	155.1	33.1
13	314.7	157.9	312.4	155.8	311.7	154.4	33.3
12	313.6	161.2	310.8	156.6	310.0	153.9	33.5
11	312.5	165.2	309.5	157.5	308.3	153.8	33.6
10	311.3	168.4	308.0	158.5	306.6	153.9	33.8
9	309.7	171.4	306.5	159.7	305.2	154.3	33.9
8	308.4	174.1	305.0	160.8	303.4	154.8	33.9
7	306.9	176.2	303.4	161.8	301.9	155.2	33.6
6	305.1	177.0	301.7	162.1	300.5	155.2	33.2
5	303.6	175.0	300.0	161.0	298.6	153.9	32.4
4	301.2	170.3	298.0	156.8	296.9	149.7	30.8
3	298.1	158.1	295.5	146.8	294.6	140.1	28.0
2	294.3	135.8	292.1	127.3	291.2	121.5	23.2
1	291.1	99.0	289.5	94.1	288.6	90.0	16.5

Table 49

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 6							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	61.2	311.7	74.3	312.1	77.1	13.1
24	317.1	80.6	318.4	96.4	318.6	100.2	17.5
23	318.7	95.7	320.4	113.1	320.6	117.9	21.2
22	319.5	105.8	320.9	123.0	321.7	129.3	23.8
21	319.9	113.2	321.1	129.2	321.5	137.2	25.6
20	319.9	119.3	320.4	133.7	321.3	143.2	27.0
19	319.2	125.9	319.4	137.9	320.3	149.7	28.4
18	319.0	133.0	318.8	143.1	319.5	152.4	29.6
17	318.2	139.7	317.7	146.6	317.9	153.2	30.7
16	317.4	144.6	316.4	149.0	316.6	153.5	31.4
15	316.5	148.2	315.1	150.6	314.8	152.6	31.8
14	315.6	151.8	313.8	151.6	313.2	151.8	32.0
13	314.7	155.1	312.4	152.4	311.7	151.0	32.2
12	313.6	159.1	310.8	153.2	310.0	150.6	32.4
11	312.5	162.3	309.5	154.1	308.3	151.1	32.6
10	311.3	165.4	308.0	155.1	306.6	151.2	32.7
9	309.7	168.4	306.5	156.2	305.2	151.6	32.8
8	308.4	171.1	305.0	157.3	303.4	152.1	32.8
7	306.9	172.3	303.4	158.3	301.9	152.5	32.7
6	305.1	173.1	301.7	158.5	300.5	151.8	32.2
5	303.6	171.9	300.0	157.5	298.6	150.6	31.4
4	301.2	166.5	298.0	152.6	296.9	146.4	29.8
3	298.1	154.6	295.5	143.5	294.6	137.1	27.0
2	294.3	132.1	292.1	123.9	291.2	118.3	22.4
1	291.1	96.7	289.5	91.5	288.6	87.5	15.9

Table 50

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 17 FA 24 fuel rod 82							
Node	Teff =0.0 days		Teff =94.86 days		Teff =98.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	311.6	64.6	311.7	78.3	312.1	81.7	14.2
24	317.1	84.6	318.4	101.5	318.6	105.5	18.9
23	318.7	99.9	320.4	118.0	320.6	123.5	22.9
22	319.5	109.9	320.9	128.2	321.7	134.8	25.5
21	319.9	117.5	321.1	134.1	321.5	143.0	27.5
20	319.9	123.8	320.4	138.7	321.3	149.8	29.1
19	319.2	130.6	319.4	143.6	320.3	157.1	30.5
18	319.0	139.8	318.8	150.2	319.5	161.2	32.0
17	318.2	146.6	317.7	154.4	317.9	162.1	33.1
16	317.4	151.7	316.4	156.9	316.6	161.7	33.8
15	316.5	156.2	315.1	158.6	314.8	160.8	34.4
14	315.6	160.0	313.8	159.7	313.2	159.9	34.7
13	314.7	163.5	312.4	160.5	311.7	159.1	34.9
12	313.6	166.9	310.8	161.4	310.0	158.6	35.1
11	312.5	170.3	309.5	162.3	308.3	158.5	35.3
10	311.3	174.3	308.0	163.4	306.6	158.6	35.4
9	309.7	177.5	306.5	164.5	305.2	159.7	35.4
8	308.4	180.3	305.0	166.4	303.4	160.2	35.4
7	306.9	182.4	303.4	167.4	301.9	160.6	35.3
6	305.1	183.3	301.7	167.7	300.5	160.6	34.9
5	303.6	182.0	300.0	166.6	298.6	159.3	33.9
4	301.2	177.1	298.0	162.2	296.9	154.9	32.3
3	298.1	165.2	295.5	152.6	294.6	145.7	29.4
2	294.3	142.6	292.1	133.0	291.2	126.9	24.5
1	291.1	104.9	289.5	99.3	288.6	94.9	17.5

Table 51

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 116											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	64.1	308.0	78.8	308.2	87.7	308.5	93.1	309.8	119.5	22.2
24	310.9	84.1	314.3	102.1	314.9	111.2	315.3	116.3	318.5	149.7	29.1
23	312.5	100.3	316.0	118.8	316.5	127.5	316.7	131.8	320.4	168.9	34.6
22	313.7	111.2	317.0	129.3	317.0	136.3	317.0	139.2	321.0	177.1	38.3
21	313.9	118.9	316.9	135.7	317.0	140.9	316.6	142.4	320.3	178.4	40.7
20	313.9	124.6	316.3	139.5	316.0	143.3	315.9	143.1	318.7	175.5	42.6
19	313.3	129.3	315.5	141.3	314.7	143.4	314.4	142.9	316.1	168.6	44.2
18	312.5	132.9	314.0	143.0	313.4	143.1	312.9	142.1	313.7	160.4	45.8
17	312.0	135.2	313.0	143.5	312.0	142.3	311.4	140.7	311.0	151.9	47.0
16	310.8	137.7	311.6	144.0	310.6	142.3	309.9	140.1	308.4	144.3	47.9
15	309.9	139.7	310.2	144.3	309.3	141.9	308.6	139.7	306.2	137.8	48.2
14	308.8	141.2	308.9	144.5	307.9	141.0	307.0	139.4	303.8	132.4	48.6
13	307.4	142.2	307.5	144.6	306.3	140.9	305.8	139.2	302.0	128.0	48.8
12	306.0	142.1	306.1	144.4	304.7	140.8	304.2	139.2	299.9	124.5	49.0
11	304.4	142.6	304.5	144.4	303.5	140.9	303.0	139.5	298.5	122.0	49.2
10	303.1	142.1	302.9	144.4	301.9	141.3	301.4	140.0	297.0	120.2	49.3
9	301.3	141.1	301.4	145.0	300.8	141.8	300.3	140.8	295.7	119.7	49.6
8	299.5	140.0	299.9	144.8	299.4	142.4	299.0	141.8	294.1	119.3	49.6
7	297.7	138.2	298.4	144.3	298.2	142.9	297.7	142.8	293.1	119.2	49.4
6	295.8	134.6	296.9	142.7	296.5	143.2	296.6	143.3	292.0	119.0	48.9
5	293.9	130.2	295.0	139.8	295.2	141.8	295.0	142.8	290.5	118.8	47.8
4	291.9	123.3	293.4	135.0	293.4	138.4	293.3	139.9	289.6	116.6	45.8
3	289.1	112.8	290.8	126.2	291.5	130.7	291.6	133.6	287.7	111.2	42.1
2	286.4	96.8	287.9	109.9	288.4	116.0	289.2	120.1	285.8	99.7	35.7
1	283.7	71.5	285.8	82.9	286.5	89.0	286.9	93.6	283.6	78.2	26.0

Table 52

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 16											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	53.8	308.0	66.9	308.2	74.5	308.5	79.6	309.8	102.7	18.7
24	310.9	72.3	314.3	87.9	314.9	96.8	315.3	101.8	318.5	131.2	24.8
23	312.5	87.3	316.0	104.2	316.5	112.5	316.7	117.1	320.4	150.8	29.8
22	313.7	97.8	317.0	114.5	317.0	122.1	317.0	125.4	321.0	161.0	33.3
21	313.9	105.5	316.9	121.4	317.0	127.3	316.6	129.5	320.3	163.8	35.6
20	313.9	111.6	316.3	125.9	316.0	129.6	315.9	131.2	318.7	161.1	37.3
19	313.3	116.9	315.5	128.8	314.7	130.8	314.4	131.8	316.1	156.2	38.7
18	312.5	120.8	314.0	130.3	313.4	131.8	312.9	131.6	313.7	148.6	40.1
17	312.0	124.0	313.0	132.0	312.0	131.7	311.4	130.9	311.0	141.3	41.2
16	310.8	126.3	311.6	132.4	310.6	131.8	309.9	130.3	308.4	134.3	41.9
15	309.9	128.7	310.2	133.3	309.3	131.3	308.6	130.0	306.2	128.2	42.2
14	308.8	130.1	308.9	133.5	307.9	131.1	307.0	129.6	303.8	123.7	42.5
13	307.4	131.0	307.5	133.6	306.3	130.9	305.8	129.5	302.0	119.6	42.8
12	306.0	131.5	306.1	133.4	304.7	130.9	304.2	129.5	299.9	116.4	43.1
11	304.4	131.4	304.5	134.0	303.5	131.0	303.0	129.8	298.5	114.0	43.3
10	303.1	131.6	302.9	134.0	301.9	131.3	301.4	130.3	297.0	112.3	43.4
9	301.3	130.6	301.4	134.0	300.8	131.8	300.3	131.0	295.7	111.4	43.4
8	299.5	129.7	299.9	133.8	299.4	132.3	299.0	131.9	294.1	111.0	43.4
7	297.7	127.5	298.4	133.4	298.2	133.4	297.7	132.9	293.1	110.9	43.3
6	295.8	124.1	296.9	132.0	296.5	132.6	296.6	133.3	292.0	110.8	42.7
5	293.9	119.5	295.0	129.2	295.2	131.3	295.0	132.9	290.5	110.1	41.7
4	291.9	112.2	293.4	123.7	293.4	126.9	293.3	129.6	289.6	107.6	39.7
3	289.1	101.7	290.8	113.5	291.5	118.8	291.6	122.6	287.7	101.7	36.2
2	286.4	85.0	287.9	97.1	288.4	102.6	289.2	107.3	285.8	89.1	30.3
1	283.7	61.1	285.8	70.6	286.5	76.3	286.9	80.9	283.6	67.1	21.8

Table 53

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 32											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	54.6	308.0	67.5	308.2	75.6	308.5	80.7	309.8	103.7	18.9
24	310.9	73.0	314.3	89.1	314.9	97.7	315.3	103.3	318.5	132.5	25.1
23	312.5	88.2	316.0	105.7	316.5	114.1	316.7	118.7	320.4	152.9	30.1
22	313.7	98.7	317.0	116.2	317.0	123.2	317.0	127.1	321.0	162.5	33.6
21	313.9	106.5	316.9	122.5	317.0	128.5	316.6	131.2	320.3	165.2	35.9
20	313.9	112.7	316.3	127.1	316.0	131.3	315.9	132.4	318.7	162.6	37.6
19	313.3	117.5	315.5	130.0	314.7	132.6	314.4	132.9	316.1	157.5	39.0
18	312.5	121.4	314.0	131.5	313.4	133.0	312.9	132.8	313.7	149.9	40.5
17	312.0	124.6	313.0	132.6	312.0	132.9	311.4	132.1	311.0	142.5	41.5
16	310.8	127.5	311.6	133.6	310.6	132.3	309.9	131.5	308.4	135.5	42.3
15	309.9	129.3	310.2	133.9	309.3	132.5	308.6	131.1	306.2	129.3	42.8
14	308.8	130.7	308.9	134.7	307.9	132.3	307.0	130.8	303.8	124.8	43.1
13	307.4	131.6	307.5	134.8	306.3	132.1	305.8	130.6	302.0	120.6	43.3
12	306.0	132.1	306.1	134.7	304.7	132.0	304.2	130.7	299.9	117.4	43.5
11	304.4	132.1	304.5	134.6	303.5	132.2	303.0	130.9	298.5	115.0	43.7
10	303.1	132.2	302.9	134.6	301.9	132.5	301.4	131.4	297.0	113.3	43.8
9	301.3	131.2	301.4	135.2	300.8	133.0	300.3	132.2	295.7	112.3	43.8
8	299.5	130.3	299.9	135.1	299.4	133.5	299.0	133.1	294.1	111.9	43.8
7	297.7	128.1	298.4	134.6	298.2	134.0	297.7	134.0	293.1	111.9	43.7
6	295.8	125.3	296.9	133.2	296.5	133.8	296.6	134.5	292.0	112.2	43.3
5	293.9	120.1	295.0	129.8	295.2	132.5	295.0	134.1	290.5	111.0	42.1
4	291.9	113.2	293.4	124.2	293.4	128.1	293.3	130.7	289.6	108.6	40.1
3	289.1	102.2	290.8	114.6	291.5	119.9	291.6	123.7	287.7	102.6	36.7
2	286.4	85.8	287.9	98.0	288.4	104.0	289.2	108.3	285.8	89.9	30.7
1	283.7	61.7	285.8	71.7	286.5	77.4	286.9	81.7	283.6	68.1	22.1

Table 54

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 54											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	56.5	308.0	69.9	308.2	77.8	308.5	83.4	309.8	107.1	19.6
24	310.9	75.5	314.3	91.7	314.9	101.0	315.3	106.2	318.5	136.8	25.9
23	312.5	90.8	316.0	108.2	316.5	117.3	316.7	122.0	320.4	156.4	31.1
22	313.7	101.6	317.0	118.9	317.0	126.6	317.0	130.0	321.0	166.1	34.5
21	313.9	109.6	316.9	126.0	317.0	131.5	316.6	134.2	320.3	168.9	36.9
20	313.9	115.4	316.3	130.1	316.0	134.3	315.9	135.4	318.7	166.2	38.7
19	313.3	120.3	315.5	133.0	314.7	135.0	314.4	135.9	316.1	160.3	40.1
18	312.5	124.2	314.0	134.5	313.4	135.4	312.9	135.1	313.7	153.2	41.6
17	312.0	126.9	313.0	135.7	312.0	135.3	311.4	134.4	311.0	145.0	42.7
16	310.8	129.9	311.6	136.1	310.6	135.3	309.9	133.8	308.4	137.8	43.5
15	309.9	131.8	310.2	136.4	309.3	134.8	308.6	133.4	306.2	132.2	44.0
14	308.8	133.2	308.9	137.2	307.9	134.6	307.0	133.1	303.8	126.9	44.3
13	307.4	134.1	307.5	137.2	306.3	134.4	305.8	132.9	302.0	122.7	44.5
12	306.0	134.6	306.1	137.1	304.7	134.4	304.2	132.9	299.9	119.4	44.7
11	304.4	134.6	304.5	137.1	303.5	134.5	303.0	133.2	298.5	117.0	44.8
10	303.1	134.1	302.9	137.7	301.9	134.8	301.4	133.7	297.0	115.3	45.0
9	301.3	133.7	301.4	137.7	300.8	135.3	300.3	134.5	295.7	114.3	45.0
8	299.5	132.1	299.9	137.5	299.4	135.9	299.0	135.4	294.1	113.9	45.0
7	297.7	130.4	298.4	137.0	298.2	136.9	297.7	136.4	293.1	114.3	44.9
6	295.8	127.1	296.9	135.5	296.5	136.1	296.6	136.9	292.0	114.2	44.4
5	293.9	122.3	295.0	132.7	295.2	134.8	295.0	136.4	290.5	113.5	43.4
4	291.9	115.4	293.4	127.1	293.4	130.9	293.3	133.6	289.6	110.9	41.4
3	289.1	104.6	290.8	117.2	291.5	122.6	291.6	126.5	287.7	104.9	37.9
2	286.4	88.3	287.9	100.3	288.4	106.4	289.2	111.2	285.8	92.4	31.7
1	283.7	63.5	285.8	73.7	286.5	79.6	286.9	84.4	283.6	70.3	22.8

Table 55

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 6											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	54.6	308.0	67.5	308.2	75.6	308.5	80.7	309.8	103.7	19.0
24	310.9	73.0	314.3	89.1	314.9	97.7	315.3	102.8	318.5	132.5	25.2
23	312.5	88.2	316.0	105.2	316.5	113.6	316.7	118.2	320.4	152.2	30.3
22	313.7	98.7	317.0	115.6	317.0	123.2	317.0	126.5	321.0	161.8	33.6
21	313.9	107.0	316.9	122.5	317.0	127.9	316.6	130.0	320.3	164.5	35.9
20	313.9	113.2	316.3	127.1	316.0	130.7	315.9	131.8	318.7	162.6	37.6
19	313.3	118.0	315.5	130.0	314.7	132.0	314.4	132.4	316.1	156.9	39.2
18	312.5	121.9	314.0	131.5	313.4	132.4	312.9	132.2	313.7	149.3	40.5
17	312.0	125.2	313.0	132.6	312.0	132.3	311.4	131.5	311.0	141.9	41.5
16	310.8	128.1	311.6	133.6	310.6	132.3	309.9	130.9	308.4	134.9	42.3
15	309.9	129.9	310.2	134.5	309.3	131.9	308.6	130.5	306.2	129.3	42.8
14	308.8	131.3	308.9	134.7	307.9	131.7	307.0	130.2	303.8	124.2	43.1
13	307.4	132.9	307.5	134.8	306.3	131.5	305.8	130.1	302.0	120.1	43.3
12	306.0	133.3	306.1	134.7	304.7	131.5	304.2	130.1	299.9	116.9	43.5
11	304.4	133.3	304.5	135.2	303.5	131.6	303.0	130.3	298.5	114.5	43.7
10	303.1	132.8	302.9	135.3	301.9	132.5	301.4	130.8	297.0	112.8	43.8
9	301.3	131.8	301.4	135.2	300.8	133.0	300.3	131.6	295.7	111.9	43.8
8	299.5	130.9	299.9	135.1	299.4	133.5	299.0	132.5	294.1	111.5	43.8
7	297.7	129.2	298.4	134.6	298.2	134.0	297.7	134.0	293.1	111.4	43.7
6	295.8	125.9	296.9	133.2	296.5	133.8	296.6	133.9	292.0	111.3	43.3
5	293.9	120.6	295.0	130.4	295.2	131.9	295.0	133.5	290.5	110.6	42.1
4	291.9	113.8	293.4	124.8	293.4	128.1	293.3	130.1	289.6	108.1	40.1
3	289.1	103.1	290.8	115.1	291.5	119.9	291.6	123.2	287.7	102.1	36.7
2	286.4	86.2	287.9	98.0	288.4	104.0	289.2	108.3	285.8	89.9	30.7
1	283.7	62.0	285.8	72.0	286.5	77.4	286.9	82.1	283.6	68.1	22.0

Table 56

History of the cladding temperature and linear power (Ql) during the fuel cycle (FC)

FC 18 FA 28 fuel rod 82											
Node	Teff =0.0 days		Teff =100.0 days		Teff =200.0 days		Teff =306.73 days		Teff =325.0 days		
	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Cladding tempera-ture, °C	Ql, W/cm	Bur
25	305.4	59.5	308.0	73.5	308.2	81.8	308.5	87.7	309.8	112.6	20.6
24	310.9	79.1	314.3	96.0	314.9	105.1	315.3	111.0	318.5	142.3	27.2
23	312.5	94.7	316.0	113.3	316.5	121.6	316.7	126.4	320.4	161.9	32.5
22	313.7	105.5	317.0	123.3	317.0	131.2	317.0	134.6	321.0	171.2	36.1
21	313.9	113.7	316.9	130.0	317.0	136.2	316.6	138.3	320.3	173.3	38.4
20	313.9	119.7	316.3	134.2	316.0	138.5	315.9	139.5	318.7	170.5	40.2
19	313.3	124.2	315.5	137.2	314.7	139.2	314.4	139.4	316.1	164.5	41.9
18	312.5	127.7	314.0	138.1	313.4	139.5	312.9	138.6	313.7	156.5	43.5
17	312.0	131.1	313.0	139.3	312.0	138.8	311.4	137.8	311.0	148.8	44.6
16	310.8	133.5	311.6	139.7	310.6	138.8	309.9	137.2	308.4	141.4	45.4
15	309.9	135.4	310.2	140.0	309.3	138.3	308.6	136.8	306.2	135.0	45.9
14	308.8	136.9	308.9	140.8	307.9	138.1	307.0	135.9	303.8	129.7	46.2
13	307.4	137.9	307.5	140.9	306.3	137.9	305.8	135.8	302.0	125.4	46.5
12	306.0	138.3	306.1	140.7	304.7	137.9	304.2	135.8	299.9	122.0	46.7
11	304.4	138.3	304.5	140.7	303.5	138.0	303.0	136.1	298.5	119.5	46.8
10	303.1	137.8	302.9	140.7	301.9	138.3	301.4	136.6	297.0	117.8	46.9
9	301.3	137.4	301.4	141.3	300.8	138.8	300.3	137.9	295.7	116.7	47.0
8	299.5	135.8	299.9	141.1	299.4	139.4	299.0	138.9	294.1	116.8	47.0
7	297.7	134.0	298.4	140.6	298.2	139.9	297.7	139.9	293.1	116.8	46.8
6	295.8	130.6	296.9	139.1	296.5	139.7	296.6	140.4	292.0	116.6	46.4
5	293.9	126.2	295.0	136.2	295.2	138.3	295.0	139.9	290.5	115.9	45.2
4	291.9	119.1	293.4	131.0	293.4	134.4	293.3	137.1	289.6	113.8	43.2
3	289.1	108.4	290.8	121.4	291.5	126.4	291.6	129.8	287.7	108.0	39.6
2	286.4	91.9	287.9	104.4	288.4	110.7	289.2	115.2	285.8	95.6	33.4
1	283.7	66.7	285.8	77.5	286.5	83.6	286.9	88.6	283.6	73.8	24.2

Table 57

Fast neutron fluence in fuel rod cladding in the energy range of 10.5MeV-0.8MeV(n/cm^2)

FC 15, FA 26						
fuel rod №	6	16	32	54	82	116
	Teff=0.0 days					
25	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
24	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
23	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
22	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
21	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
20	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
19	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
18	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
17	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
16	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
15	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
14	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
11	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
10	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
9	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
8	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
	Teff=100 days					
25	2.47039E+20	2.50327E+20	2.52019E+20	2.52257E+20	2.50851E+20	2.47492E+20
24	3.47071E+20	3.51222E+20	3.53163E+20	3.53029E+20	3.50619E+20	3.45531E+20
23	4.46430E+20	4.51125E+20	4.52933E+20	4.52115E+20	4.48282E+20	4.41133E+20
22	5.27751E+20	5.32739E+20	5.34266E+20	5.32586E+20	5.26834E+20	5.17672E+20
21	5.94503E+20	5.99721E+20	6.01040E+20	5.98747E+20	5.91865E+20	5.81027E+20
20	6.52888E+20	6.58620E+20	6.60006E+20	6.57423E+20	6.50495E+20	6.37835E+20
19	7.10524E+20	7.17165E+20	7.19082E+20	7.16138E+20	7.09223E+20	6.96626E+20
18	7.58788E+20	7.66173E+20	7.68659E+20	7.66758E+20	7.59885E+20	7.46577E+20
17	8.03626E+20	8.12370E+20	8.15775E+20	8.14072E+20	8.07495E+20	7.95036E+20
16	8.41639E+20	8.50876E+20	8.54846E+20	8.54036E+20	8.47635E+20	8.34508E+20
15	8.72458E+20	8.82281E+20	8.86395E+20	8.85640E+20	8.79175E+20	8.65657E+20
14	8.96745E+20	9.06926E+20	9.11068E+20	9.10205E+20	9.03388E+20	8.89756E+20
13	9.15452E+20	9.25846E+20	9.30074E+20	9.29105E+20	9.22059E+20	9.08053E+20
12	9.29450E+20	9.39912E+20	9.44115E+20	9.43131E+20	9.36067E+20	9.21581E+20
11	9.39071E+20	9.49550E+20	9.53796E+20	9.52712E+20	9.45485E+20	9.30760E+20
10	9.43780E+20	9.54404E+20	9.58671E+20	9.57854E+20	9.50227E+20	9.35517E+20
9	9.43428E+20	9.54047E+20	9.58948E+20	9.57859E+20	9.50144E+20	9.35260E+20
8	9.36049E+20	9.46765E+20	9.51267E+20	9.50997E+20	9.43523E+20	9.28755E+20
7	9.19416E+20	9.30205E+20	9.34892E+20	9.34803E+20	9.27994E+20	9.13580E+20
6	8.90086E+20	9.00954E+20	9.05747E+20	9.05404E+20	8.99842E+20	8.86406E+20
5	8.42115E+20	8.53041E+20	8.58302E+20	8.58707E+20	8.53122E+20	8.41953E+20
4	7.69039E+20	7.79829E+20	7.85372E+20	7.87367E+20	7.83302E+20	7.72882E+20
3	6.62878E+20	6.73130E+20	6.78988E+20	6.81726E+20	6.79243E+20	6.72175E+20
2	5.15025E+20	5.24026E+20	5.30257E+20	5.32878E+20	5.31988E+20	5.27685E+20
1	3.40823E+20	3.47329E+20	3.51742E+20	3.54161E+20	3.54324E+20	3.51676E+20

Table 57 (continue)

	Teff=200 days					
25	5.65983E+20	5.72976E+20	5.76364E+20	5.76746E+20	5.72703E+20	5.64180E+20
24	7.85990E+20	7.94716E+20	7.98509E+20	7.97144E+20	7.91149E+20	7.78554E+20
23	9.96866E+20	1.00765E+21	1.01044E+21	1.00765E+21	9.98311E+20	9.80977E+20
22	1.16171E+21	1.17169E+21	1.17450E+21	1.17012E+21	1.15756E+21	1.13624E+21
21	1.29071E+21	1.30080E+21	1.30329E+21	1.29744E+21	1.28248E+21	1.25781E+21
20	1.39709E+21	1.40816E+21	1.41085E+21	1.40411E+21	1.38859E+21	1.36134E+21
19	1.49758E+21	1.51044E+21	1.51347E+21	1.50697E+21	1.49151E+21	1.46421E+21
18	1.58026E+21	1.59413E+21	1.59855E+21	1.59367E+21	1.57828E+21	1.54977E+21
17	1.65302E+21	1.66959E+21	1.67533E+21	1.67135E+21	1.65685E+21	1.62992E+21
16	1.71230E+21	1.72947E+21	1.73673E+21	1.73392E+21	1.72006E+21	1.69234E+21
15	1.75801E+21	1.77631E+21	1.78359E+21	1.78105E+21	1.76699E+21	1.73888E+21
14	1.79234E+21	1.81133E+21	1.81875E+21	1.81564E+21	1.80149E+21	1.77300E+21
13	1.81807E+21	1.83698E+21	1.84451E+21	1.84136E+21	1.82665E+21	1.79758E+21
12	1.83627E+21	1.85537E+21	1.86298E+21	1.85962E+21	1.84494E+21	1.81523E+21
11	1.84864E+21	1.86769E+21	1.87517E+21	1.87197E+21	1.85666E+21	1.82675E+21
10	1.85439E+21	1.87350E+21	1.88118E+21	1.87796E+21	1.86243E+21	1.83225E+21
9	1.85276E+21	1.87185E+21	1.88006E+21	1.87685E+21	1.86097E+21	1.83064E+21
8	1.84046E+21	1.85978E+21	1.86775E+21	1.86545E+21	1.84985E+21	1.81972E+21
7	1.81337E+21	1.83292E+21	1.84095E+21	1.83920E+21	1.82437E+21	1.79504E+21
6	1.76435E+21	1.78421E+21	1.79219E+21	1.79066E+21	1.77759E+21	1.74991E+21
5	1.68100E+21	1.70122E+21	1.71027E+21	1.70963E+21	1.69750E+21	1.67291E+21
4	1.54957E+21	1.56984E+21	1.57953E+21	1.58132E+21	1.57163E+21	1.54942E+21
3	1.35043E+21	1.37004E+21	1.38056E+21	1.38380E+21	1.37744E+21	1.36082E+21
2	1.06215E+21	1.07950E+21	1.09032E+21	1.09461E+21	1.09165E+21	1.08083E+21
1	7.07193E+20	7.19691E+20	7.27909E+20	7.32732E+20	7.32664E+20	7.26755E+20
	Teff=260.77 days					
25	7.84121E+20	7.93361E+20	7.97981E+20	7.98132E+20	7.92149E+20	7.80258E+20
24	1.08444E+21	1.09586E+21	1.10088E+21	1.09858E+21	1.08999E+21	1.07229E+21
23	1.36668E+21	1.38068E+21	1.38451E+21	1.37989E+21	1.36694E+21	1.34250E+21
22	1.58096E+21	1.59379E+21	1.59746E+21	1.59074E+21	1.57347E+21	1.54399E+21
21	1.74357E+21	1.75671E+21	1.75957E+21	1.75149E+21	1.73094E+21	1.69708E+21
20	1.87370E+21	1.88818E+21	1.89107E+21	1.88202E+21	1.86048E+21	1.82355E+21
19	1.99396E+21	2.00994E+21	2.01398E+21	2.00532E+21	1.98396E+21	1.94720E+21
18	2.09173E+21	2.10950E+21	2.11475E+21	2.10789E+21	2.08669E+21	2.04893E+21
17	2.17590E+21	2.19647E+21	2.20402E+21	2.19857E+21	2.17863E+21	2.14274E+21
16	2.24301E+21	2.26486E+21	2.27373E+21	2.26962E+21	2.25058E+21	2.21425E+21
15	2.29347E+21	2.31624E+21	2.32553E+21	2.32199E+21	2.30253E+21	2.26584E+21
14	2.33042E+21	2.35400E+21	2.36343E+21	2.35939E+21	2.33985E+21	2.30256E+21
13	2.35774E+21	2.38115E+21	2.39069E+21	2.38660E+21	2.36638E+21	2.32843E+21
12	2.37679E+21	2.40038E+21	2.41000E+21	2.40565E+21	2.38526E+21	2.34678E+21
11	2.38981E+21	2.41329E+21	2.42274E+21	2.41859E+21	2.39764E+21	2.35872E+21
10	2.39597E+21	2.41975E+21	2.42921E+21	2.42483E+21	2.40382E+21	2.36457E+21
9	2.39420E+21	2.41773E+21	2.42811E+21	2.42350E+21	2.40205E+21	2.36283E+21
8	2.38053E+21	2.40462E+21	2.41448E+21	2.41058E+21	2.38994E+21	2.35095E+21
7	2.34972E+21	2.37371E+21	2.38412E+21	2.38073E+21	2.36126E+21	2.32278E+21
6	2.29247E+21	2.31697E+21	2.32734E+21	2.32403E+21	2.30682E+21	2.26995E+21
5	2.19245E+21	2.21757E+21	2.22897E+21	2.22728E+21	2.21081E+21	2.17789E+21
4	2.03103E+21	2.05644E+21	2.06797E+21	2.06954E+21	2.05624E+21	2.02634E+21
3	1.78070E+21	1.80554E+21	1.81839E+21	1.82164E+21	1.81222E+21	1.78944E+21
2	1.41019E+21	1.43243E+21	1.44545E+21	1.45033E+21	1.44572E+21	1.43013E+21
1	9.44581E+20	9.60742E+20	9.71001E+20	9.76721E+20	9.75904E+20	9.67188E+20

Table 57 (continue)

	Teff=296.0 days					
25	9.41028E+20	9.52299E+20	9.57934E+20	9.58389E+20	9.51572E+20	9.37483E+20
24	1.29823E+21	1.31215E+21	1.31867E+21	1.31629E+21	1.30638E+21	1.28557E+21
23	1.62955E+21	1.64640E+21	1.65129E+21	1.64688E+21	1.63207E+21	1.60388E+21
22	1.87538E+21	1.89169E+21	1.89659E+21	1.88988E+21	1.87031E+21	1.83696E+21
21	2.05706E+21	2.07356E+21	2.07813E+21	2.06978E+21	2.04693E+21	2.00837E+21
20	2.19666E+21	2.21449E+21	2.21895E+21	2.20961E+21	2.18563E+21	2.14403E+21
19	2.31954E+21	2.33925E+21	2.34463E+21	2.33544E+21	2.31171E+21	2.27028E+21
18	2.41619E+21	2.43671E+21	2.44371E+21	2.43648E+21	2.41269E+21	2.37001E+21
17	2.49555E+21	2.51914E+21	2.52757E+21	2.52155E+21	2.49965E+21	2.45848E+21
16	2.55613E+21	2.58078E+21	2.59088E+21	2.58620E+21	2.56451E+21	2.52310E+21
15	2.59947E+21	2.62503E+21	2.63531E+21	2.63105E+21	2.60899E+21	2.56739E+21
14	2.62955E+21	2.65592E+21	2.66631E+21	2.66175E+21	2.63944E+21	2.59710E+21
13	2.65100E+21	2.67707E+21	2.68755E+21	2.68269E+21	2.65995E+21	2.61702E+21
12	2.66508E+21	2.69128E+21	2.70182E+21	2.69668E+21	2.67382E+21	2.63040E+21
11	2.67413E+21	2.70016E+21	2.71047E+21	2.70583E+21	2.68186E+21	2.63830E+21
10	2.67716E+21	2.70348E+21	2.71381E+21	2.70890E+21	2.68516E+21	2.64104E+21
9	2.67282E+21	2.69884E+21	2.71017E+21	2.70502E+21	2.68107E+21	2.63702E+21
8	2.65675E+21	2.68338E+21	2.69414E+21	2.68978E+21	2.66674E+21	2.62295E+21
7	2.62322E+21	2.64976E+21	2.66113E+21	2.65709E+21	2.63535E+21	2.59238E+21
6	2.56103E+21	2.58817E+21	2.59976E+21	2.59606E+21	2.57682E+21	2.53513E+21
5	2.45280E+21	2.48067E+21	2.49343E+21	2.49154E+21	2.47288E+21	2.43532E+21
4	2.27689E+21	2.30517E+21	2.31810E+21	2.31942E+21	2.30407E+21	2.27053E+21
3	2.00174E+21	2.02929E+21	2.04354E+21	2.04643E+21	2.03584E+21	2.01002E+21
2	1.59029E+21	1.61492E+21	1.62915E+21	1.63450E+21	1.62915E+21	1.61110E+21
1	1.06847E+21	1.08635E+21	1.09775E+21	1.10402E+21	1.10278E+21	1.09272E+21

Table 58

Fast neutron fluence in fuel rod cladding in the energy range of 10.5MeV-0.8MeV(n/cm^2)

FC 16, FA 24						
fuel rod №	**6**	**16**	**32**	**54**	**82**	**116**
	Teff=0.0 days					
25	9.41028E+20	9.52299E+20	9.57934E+20	9.58389E+20	9.51572E+20	9.37483E+20
24	1.29823E+21	1.31215E+21	1.31867E+21	1.31629E+21	1.30638E+21	1.28557E+21
23	1.62955E+21	1.64640E+21	1.65129E+21	1.64688E+21	1.63207E+21	1.60388E+21
22	1.87538E+21	1.89169E+21	1.89659E+21	1.88988E+21	1.87031E+21	1.83696E+21
21	2.05706E+21	2.07356E+21	2.07813E+21	2.06978E+21	2.04693E+21	2.00837E+21
20	2.19666E+21	2.21449E+21	2.21895E+21	2.20961E+21	2.18563E+21	2.14403E+21
19	2.31954E+21	2.33925E+21	2.34463E+21	2.33544E+21	2.31171E+21	2.27028E+21
18	2.41619E+21	2.43671E+21	2.44371E+21	2.43648E+21	2.41269E+21	2.37001E+21
17	2.49555E+21	2.51914E+21	2.52757E+21	2.52155E+21	2.49965E+21	2.45848E+21
16	2.55613E+21	2.58078E+21	2.59088E+21	2.58620E+21	2.56451E+21	2.52310E+21
15	2.59947E+21	2.62503E+21	2.63531E+21	2.63105E+21	2.60899E+21	2.56739E+21
14	2.62955E+21	2.65592E+21	2.66631E+21	2.66175E+21	2.63944E+21	2.59710E+21
13	2.65100E+21	2.67707E+21	2.68755E+21	2.68269E+21	2.65995E+21	2.61702E+21
12	2.66508E+21	2.69128E+21	2.70182E+21	2.69668E+21	2.67382E+21	2.63040E+21
11	2.67413E+21	2.70016E+21	2.71047E+21	2.70583E+21	2.68186E+21	2.63830E+21
10	2.67716E+21	2.70348E+21	2.71381E+21	2.70890E+21	2.68516E+21	2.64104E+21
9	2.67282E+21	2.69884E+21	2.71017E+21	2.70502E+21	2.68107E+21	2.63702E+21
8	2.65675E+21	2.68338E+21	2.69414E+21	2.68978E+21	2.66674E+21	2.62295E+21
7	2.62322E+21	2.64976E+21	2.66113E+21	2.65709E+21	2.63535E+21	2.59238E+21
6	2.56103E+21	2.58817E+21	2.59976E+21	2.59606E+21	2.57682E+21	2.53513E+21
5	2.45280E+21	2.48067E+21	2.49343E+21	2.49154E+21	2.47288E+21	2.43532E+21
4	2.27689E+21	2.30517E+21	2.31810E+21	2.31942E+21	2.30407E+21	2.27053E+21
3	2.00174E+21	2.02929E+21	2.04354E+21	2.04643E+21	2.03584E+21	2.01002E+21
2	1.59029E+21	1.61492E+21	1.62915E+21	1.63450E+21	1.62915E+21	1.61110E+21
1	1.06847E+21	1.08635E+21	1.09775E+21	1.10402E+21	1.10278E+21	1.09272E+21
	Teff=100 days					
25	1.21187E+21	1.22371E+21	1.22875E+21	1.22779E+21	1.21865E+21	1.20106E+21
24	1.67367E+21	1.68822E+21	1.69374E+21	1.68917E+21	1.67574E+21	1.64982E+21
23	2.10215E+21	2.11942E+21	2.12258E+21	2.11500E+21	2.09529E+21	2.06015E+21
22	2.42495E+21	2.44132E+21	2.44382E+21	2.43299E+21	2.40723E+21	2.36531E+21
21	2.67151E+21	2.68782E+21	2.68942E+21	2.67615E+21	2.64589E+21	2.59756E+21
20	2.87222E+21	2.88985E+21	2.89097E+21	2.87610E+21	2.84397E+21	2.79136E+21
19	3.06156E+21	3.08164E+21	3.08401E+21	3.06911E+21	3.03688E+21	2.98373E+21
18	3.23012E+21	3.25273E+21	3.25764E+21	3.24526E+21	3.21272E+21	3.15726E+21
17	3.36992E+21	3.39662E+21	3.40358E+21	3.39281E+21	3.36211E+21	3.30774E+21
16	3.47574E+21	3.50383E+21	3.51276E+21	3.50309E+21	3.47233E+21	3.41694E+21
15	3.55184E+21	3.58088E+21	3.59013E+21	3.58051E+21	3.54906E+21	3.49280E+21
14	3.60541E+21	3.63524E+21	3.64448E+21	3.63424E+21	3.60211E+21	3.54475E+21
13	3.64329E+21	3.67278E+21	3.68189E+21	3.67116E+21	3.63824E+21	3.57994E+21
12	3.66815E+21	3.69772E+21	3.70667E+21	3.69549E+21	3.66214E+21	3.60299E+21
11	3.68352E+21	3.71274E+21	3.72126E+21	3.71044E+21	3.67562E+21	3.61602E+21
10	3.68826E+21	3.71757E+21	3.72589E+21	3.71471E+21	3.67989E+21	3.61950E+21
9	3.68072E+21	3.70962E+21	3.71897E+21	3.70735E+21	3.67205E+21	3.61159E+21
8	3.65560E+21	3.68499E+21	3.69357E+21	3.68271E+21	3.64833E+21	3.58818E+21
7	3.60473E+21	3.63389E+21	3.64313E+21	3.63260E+21	3.59972E+21	3.54047E+21
6	3.51362E+21	3.54348E+21	3.55301E+21	3.54320E+21	3.51314E+21	3.45575E+21
5	3.35999E+21	3.39072E+21	3.40178E+21	3.39425E+21	3.36565E+21	3.31341E+21
4	3.11544E+21	3.14686E+21	3.15872E+21	3.15516E+21	3.13113E+21	3.08419E+21
3	2.73879E+21	2.76975E+21	2.78342E+21	2.78275E+21	2.76504E+21	2.72804E+21
2	2.18023E+21	2.20817E+21	2.22251E+21	2.22572E+21	2.21525E+21	2.18895E+21
1	1.46832E+21	1.48883E+21	1.50071E+21	1.50595E+21	1.50176E+21	1.48654E+21

Table 58 (continue)

	Teff=200 days					
25	1.54633E+21	1.55850E+21	1.56258E+21	1.55933E+21	1.54695E+21	1.52468E+21
24	2.13051E+21	2.14542E+21	2.14931E+21	2.14125E+21	2.12313E+21	2.09047E+21
23	2.66548E+21	2.68295E+21	2.68333E+21	2.67124E+21	2.64528E+21	2.60092E+21
22	3.06440E+21	3.08059E+21	3.07926E+21	3.06315E+21	3.02936E+21	2.97686E+21
21	3.36761E+21	3.38320E+21	3.38065E+21	3.36129E+21	3.32185E+21	3.26166E+21
20	3.61601E+21	3.63271E+21	3.62960E+21	3.60806E+21	3.56612E+21	3.50082E+21
19	3.85517E+21	3.87457E+21	3.87328E+21	3.85181E+21	3.80957E+21	3.74327E+21
18	4.07573E+21	4.09920E+21	4.10161E+21	4.08324E+21	4.04077E+21	3.97138E+21
17	4.25603E+21	4.28466E+21	4.28979E+21	4.27369E+21	4.23337E+21	4.16493E+21
16	4.38811E+21	4.41854E+21	4.42576E+21	4.41059E+21	4.37046E+21	4.30068E+21
15	4.47963E+21	4.51131E+21	4.51862E+21	4.50342E+21	4.46245E+21	4.39154E+21
14	4.54194E+21	4.57453E+21	4.58172E+21	4.56565E+21	4.52372E+21	4.45176E+21
13	4.58455E+21	4.61691E+21	4.62395E+21	4.60708E+21	4.56411E+21	4.49104E+21
12	4.61191E+21	4.64427E+21	4.65096E+21	4.63391E+21	4.58991E+21	4.51557E+21
11	4.62826E+21	4.66008E+21	4.66653E+21	4.64955E+21	4.60437E+21	4.52938E+21
10	4.63305E+21	4.66497E+21	4.67104E+21	4.65359E+21	4.60823E+21	4.53226E+21
9	4.62436E+21	4.65558E+21	4.66267E+21	4.64481E+21	4.59870E+21	4.52268E+21
8	4.59560E+21	4.62721E+21	4.63337E+21	4.61619E+21	4.57114E+21	4.49521E+21
7	4.53620E+21	4.56765E+21	4.57431E+21	4.55761E+21	4.51397E+21	4.43908E+21
6	4.42852E+21	4.46064E+21	4.46781E+21	4.45157E+21	4.41113E+21	4.33828E+21
5	4.24456E+21	4.27756E+21	4.28643E+21	4.27287E+21	4.23405E+21	4.16732E+21
4	3.94755E+21	3.98127E+21	3.99140E+21	3.98266E+21	3.94968E+21	3.88911E+21
3	3.48438E+21	3.51777E+21	3.53057E+21	3.52571E+21	3.50020E+21	3.45114E+21
2	2.78811E+21	2.81923E+21	2.83299E+21	2.83350E+21	2.81728E+21	2.78188E+21
1	1.88669E+21	1.90972E+21	1.92161E+21	1.92554E+21	1.91777E+21	1.89682E+21
	Teff=343.08 days					
25	2.09943E+21	2.11208E+21	2.11324E+21	2.10614E+21	2.08742E+21	2.05672E+21
24	2.87557E+21	2.89027E+21	2.89040E+21	2.87617E+21	2.84943E+21	2.80460E+21
23	3.56875E+21	3.58426E+21	3.58014E+21	3.56021E+21	3.52260E+21	3.46355E+21
22	4.06963E+21	4.08291E+21	4.07609E+21	4.05117E+21	4.00449E+21	3.93427E+21
21	4.43957E+21	4.45300E+21	4.44345E+21	4.41414E+21	4.36067E+21	4.28184E+21
20	4.73791E+21	4.75323E+21	4.74312E+21	4.71017E+21	4.65379E+21	4.56900E+21
19	5.02792E+21	5.04683E+21	5.03910E+21	5.00691E+21	4.95001E+21	4.86418E+21
18	5.30091E+21	5.32628E+21	5.32388E+21	5.29557E+21	5.23874E+21	5.14962E+21
17	5.51987E+21	5.55212E+21	5.55308E+21	5.52766E+21	5.47381E+21	5.38579E+21
16	5.67289E+21	5.70738E+21	5.71134E+21	5.68728E+21	5.63299E+21	5.54300E+21
15	5.77333E+21	5.80922E+21	5.81355E+21	5.78988E+21	5.73432E+21	5.64294E+21
14	5.83828E+21	5.87509E+21	5.87979E+21	5.85528E+21	5.79816E+21	5.70612E+21
13	5.88076E+21	5.91735E+21	5.92209E+21	5.89684E+21	5.83904E+21	5.74513E+21
12	5.90752E+21	5.94397E+21	5.94810E+21	5.92313E+21	5.86475E+21	5.76983E+21
11	5.92391E+21	5.95956E+21	5.96346E+21	5.93829E+21	5.87873E+21	5.78322E+21
10	5.92977E+21	5.96539E+21	5.96865E+21	5.94289E+21	5.88320E+21	5.78611E+21
9	5.92287E+21	5.95755E+21	5.96183E+21	5.93551E+21	5.87466E+21	5.77736E+21
8	5.89522E+21	5.93016E+21	5.93324E+21	5.90747E+21	5.84767E+21	5.75018E+21
7	5.83327E+21	5.86805E+21	5.87150E+21	5.84622E+21	5.78773E+21	5.69120E+21
6	5.71468E+21	5.75022E+21	5.75434E+21	5.72947E+21	5.67443E+21	5.58013E+21
5	5.50316E+21	5.53977E+21	5.54590E+21	5.52415E+21	5.47087E+21	5.38304E+21
4	5.14886E+21	5.18648E+21	5.19347E+21	5.17637E+21	5.12986E+21	5.04985E+21
3	4.57874E+21	4.61543E+21	4.62511E+21	4.61403E+21	4.57752E+21	4.51105E+21
2	3.69599E+21	3.72934E+21	3.74274E+21	3.73896E+21	3.71347E+21	3.66386E+21
1	2.52067E+21	2.54657E+21	2.55854E+21	2.55937E+21	2.54596E+21	2.51570E+21

Table 58 (continue)

	Teff=390 days					
25	2.35191E+21	2.36527E+21	2.36644E+21	2.35811E+21	2.33735E+21	2.30347E+21
24	3.21327E+21	3.22927E+21	3.22842E+21	3.21279E+21	3.18302E+21	3.13325E+21
23	3.97463E+21	3.99148E+21	3.98663E+21	3.96438E+21	3.92317E+21	3.85814E+21
22	4.51643E+21	4.53117E+21	4.52354E+21	4.49648E+21	4.44508E+21	4.36842E+21
21	4.90754E+21	4.92263E+21	4.91227E+21	4.88055E+21	4.82221E+21	4.73691E+21
20	5.21196E+21	5.22919E+21	5.21846E+21	5.18350E+21	5.12198E+21	5.03063E+21
19	5.49735E+21	5.51862E+21	5.51082E+21	5.47621E+21	5.41419E+21	5.32192E+21
18	5.75885E+21	5.78730E+21	5.78340E+21	5.75241E+21	5.69165E+21	5.59583E+21
17	5.96268E+21	5.99619E+21	5.99641E+21	5.96951E+21	5.91134E+21	5.81679E+21
16	6.09974E+21	6.13558E+21	6.13869E+21	6.11198E+21	6.05323E+21	5.95658E+21
15	6.18584E+21	6.22307E+21	6.22663E+21	6.20043E+21	6.14052E+21	6.04267E+21
14	6.23777E+21	6.27588E+21	6.27987E+21	6.25288E+21	6.19142E+21	6.09319E+21
13	6.26960E+21	6.30744E+21	6.31149E+21	6.28379E+21	6.22178E+21	6.12173E+21
12	6.28797E+21	6.32561E+21	6.32899E+21	6.30169E+21	6.23915E+21	6.13818E+21
11	6.29822E+21	6.33498E+21	6.33814E+21	6.31061E+21	6.24695E+21	6.14545E+21
10	6.29998E+21	6.33667E+21	6.33913E+21	6.31099E+21	6.24720E+21	6.14409E+21
9	6.29083E+21	6.32649E+21	6.32996E+21	6.30124E+21	6.23622E+21	6.13290E+21
8	6.26207E+21	6.29795E+21	6.30016E+21	6.27196E+21	6.20800E+21	6.10442E+21
7	6.19910E+21	6.23482E+21	6.23737E+21	6.20968E+21	6.14699E+21	6.04436E+21
6	6.07799E+21	6.11450E+21	6.11777E+21	6.09046E+21	6.03130E+21	5.93128E+21
5	5.86039E+21	5.89802E+21	5.90338E+21	5.87930E+21	5.82196E+21	5.72859E+21
4	5.49222E+21	5.53096E+21	5.53724E+21	5.51793E+21	5.46770E+21	5.38246E+21
3	4.89419E+21	4.93200E+21	4.94112E+21	4.92833E+21	4.88864E+21	4.81691E+21
2	3.96018E+21	3.99463E+21	4.00792E+21	4.00276E+21	3.97451E+21	3.92095E+21
1	2.70690E+21	2.73382E+21	2.74571E+21	2.74568E+21	2.73071E+21	2.69786E+21

Table 59

Fast neutron fluence in fuel rod cladding in the energy range of 10.5MeV-0.8MeV(n/cm^2)

FC 17, FA 24						
fuel rod №	**6**	**16**	**32**	**54**	**82**	**116**
	Teff=0.0 days					
25	2.35191E+21	2.36527E+21	2.36644E+21	2.35811E+21	2.33735E+21	2.30347E+21
24	3.21327E+21	3.22927E+21	3.22842E+21	3.21279E+21	3.18302E+21	3.13325E+21
23	3.97463E+21	3.99148E+21	3.98663E+21	3.96438E+21	3.92317E+21	3.85814E+21
22	4.51643E+21	4.53117E+21	4.52354E+21	4.49648E+21	4.44508E+21	4.36842E+21
21	4.90754E+21	4.92263E+21	4.91227E+21	4.88055E+21	4.82221E+21	4.73691E+21
20	5.21196E+21	5.22919E+21	5.21846E+21	5.18350E+21	5.12198E+21	5.03063E+21
19	5.49735E+21	5.51862E+21	5.51082E+21	5.47621E+21	5.41419E+21	5.32192E+21
18	5.75885E+21	5.78730E+21	5.78340E+21	5.75241E+21	5.69165E+21	5.59583E+21
17	5.96268E+21	5.99619E+21	5.99641E+21	5.96951E+21	5.91134E+21	5.81679E+21
16	6.09974E+21	6.13558E+21	6.13869E+21	6.11198E+21	6.05323E+21	5.95658E+21
15	6.18584E+21	6.22307E+21	6.22663E+21	6.20043E+21	6.14052E+21	6.04267E+21
14	6.23777E+21	6.27588E+21	6.27987E+21	6.25288E+21	6.19142E+21	6.09319E+21
13	6.26960E+21	6.30744E+21	6.31149E+21	6.28379E+21	6.22178E+21	6.12173E+21
12	6.28797E+21	6.32561E+21	6.32899E+21	6.30169E+21	6.23915E+21	6.13818E+21
11	6.29822E+21	6.33498E+21	6.33814E+21	6.31061E+21	6.24695E+21	6.14545E+21
10	6.29998E+21	6.33667E+21	6.33913E+21	6.31099E+21	6.24720E+21	6.14409E+21
9	6.29083E+21	6.32649E+21	6.32996E+21	6.30124E+21	6.23622E+21	6.13290E+21
8	6.26207E+21	6.29795E+21	6.30016E+21	6.27196E+21	6.20800E+21	6.10442E+21
7	6.19910E+21	6.23482E+21	6.23737E+21	6.20968E+21	6.14699E+21	6.04436E+21
6	6.07799E+21	6.11450E+21	6.11777E+21	6.09046E+21	6.03130E+21	5.93128E+21
5	5.86039E+21	5.89802E+21	5.90338E+21	5.87930E+21	5.82196E+21	5.72859E+21
4	5.49222E+21	5.53096E+21	5.53724E+21	5.51793E+21	5.46770E+21	5.38246E+21
3	4.89419E+21	4.93200E+21	4.94112E+21	4.92833E+21	4.88864E+21	4.81691E+21
2	3.96018E+21	3.99463E+21	4.00792E+21	4.00276E+21	3.97451E+21	3.92095E+21
1	2.70690E+21	2.73382E+21	2.74571E+21	2.74568E+21	2.73071E+21	2.69786E+21
	Teff=94.86 days					
25	2.70336E+21	2.71501E+21	2.71341E+21	2.70160E+21	2.67639E+21	2.63674E+21
24	3.68652E+21	3.69992E+21	3.69519E+21	3.67474E+21	3.63887E+21	3.58135E+21
23	4.54758E+21	4.56094E+21	4.55116E+21	4.52273E+21	4.47401E+21	4.39970E+21
22	5.15508E+21	5.16568E+21	5.15229E+21	5.11821E+21	5.05831E+21	4.97117E+21
21	5.59131E+21	5.60188E+21	5.58524E+21	5.54592E+21	5.47855E+21	5.38202E+21
20	5.93175E+21	5.94437E+21	5.92722E+21	5.88456E+21	5.81368E+21	5.71089E+21
19	6.25440E+21	6.27166E+21	6.25810E+21	6.21616E+21	6.14506E+21	6.04181E+21
18	6.55372E+21	6.58010E+21	6.57200E+21	6.53505E+21	6.46619E+21	6.35966E+21
17	6.78909E+21	6.82169E+21	6.81861E+21	6.78677E+21	6.72125E+21	6.61656E+21
16	6.94801E+21	6.98343E+21	6.98366E+21	6.95230E+21	6.88661E+21	6.78006E+21
15	7.04939E+21	7.08637E+21	7.08717E+21	7.05650E+21	6.98961E+21	6.88193E+21
14	7.11306E+21	7.15091E+21	7.15228E+21	7.12075E+21	7.05239E+21	6.94422E+21
13	7.15490E+21	7.19257E+21	7.19388E+21	7.16159E+21	7.09269E+21	6.98266E+21
12	7.18255E+21	7.22011E+21	7.22072E+21	7.18887E+21	7.11937E+21	7.00832E+21
11	7.20201E+21	7.23859E+21	7.23913E+21	7.20701E+21	7.13640E+21	7.02481E+21
10	7.21287E+21	7.24947E+21	7.24929E+21	7.21659E+21	7.14580E+21	7.03267E+21
9	7.21229E+21	7.24805E+21	7.24895E+21	7.21573E+21	7.14363E+21	7.03038E+21
8	7.19051E+21	7.22667E+21	7.22648E+21	7.19384E+21	7.12292E+21	7.00935E+21
7	7.13057E+21	7.16675E+21	7.16698E+21	7.13501E+21	7.06555E+21	6.95298E+21
6	7.00543E+21	7.04259E+21	7.04373E+21	7.01235E+21	6.94662E+21	6.83690E+21
5	6.77082E+21	6.80936E+21	6.81290E+21	6.78501E+21	6.72132E+21	6.61841E+21
4	6.36351E+21	6.40339E+21	6.40819E+21	6.38541E+21	6.32919E+21	6.23491E+21
3	5.68976E+21	5.72892E+21	5.73693E+21	5.72129E+21	5.67629E+21	5.59624E+21
2	4.62212E+21	4.65808E+21	4.67078E+21	4.66351E+21	4.63111E+21	4.57043E+21
1	3.17083E+21	3.19909E+21	3.21079E+21	3.20947E+21	3.19159E+21	3.15358E+21

Table 59 (continue)

	Teff=98.0 days					
25	2.71600E+21	2.72758E+21	2.72588E+21	2.71395E+21	2.68861E+21	2.64876E+21
24	3.70343E+21	3.71674E+21	3.71187E+21	3.69125E+21	3.65521E+21	3.59741E+21
23	4.56792E+21	4.58115E+21	4.57120E+21	4.54261E+21	4.49362E+21	4.41898E+21
22	5.17758E+21	5.18802E+21	5.17450E+21	5.14017E+21	5.07997E+21	4.99247E+21
21	5.61519E+21	5.62561E+21	5.60881E+21	5.56923E+21	5.50154E+21	5.40462E+21
20	5.95666E+21	5.96912E+21	5.95183E+21	5.90890E+21	5.83770E+21	5.73450E+21
19	6.28036E+21	6.29749E+21	6.28373E+21	6.24162E+21	6.17020E+21	6.06658E+21
18	6.58073E+21	6.60705E+21	6.59880E+21	6.56173E+21	6.49260E+21	6.38569E+21
17	6.81693E+21	6.84951E+21	6.84631E+21	6.81430E+21	6.74862E+21	6.64359E+21
16	6.97637E+21	7.01177E+21	7.01191E+21	6.98039E+21	6.91456E+21	6.80768E+21
15	7.07805E+21	7.11502E+21	7.11573E+21	7.08490E+21	7.01787E+21	6.90987E+21
14	7.14191E+21	7.17975E+21	7.18103E+21	7.14936E+21	7.08077E+21	6.97236E+21
13	7.18389E+21	7.22155E+21	7.22278E+21	7.19033E+21	7.12121E+21	7.01094E+21
12	7.21167E+21	7.24922E+21	7.24975E+21	7.21775E+21	7.14802E+21	7.03673E+21
11	7.23127E+21	7.26785E+21	7.26830E+21	7.23603E+21	7.16520E+21	7.05338E+21
10	7.24230E+21	7.27889E+21	7.27862E+21	7.24578E+21	7.17476E+21	7.06131E+21
9	7.24188E+21	7.27764E+21	7.27846E+21	7.24509E+21	7.17277E+21	7.05920E+21
8	7.22025E+21	7.25641E+21	7.25614E+21	7.22336E+21	7.15222E+21	7.03833E+21
7	7.16036E+21	7.19656E+21	7.19672E+21	7.16461E+21	7.09493E+21	6.98204E+21
6	7.03510E+21	7.07228E+21	7.07334E+21	7.04184E+21	6.97590E+21	6.86586E+21
5	6.79999E+21	6.83855E+21	6.84204E+21	6.81402E+21	6.75013E+21	6.64692E+21
4	6.39152E+21	6.43143E+21	6.43618E+21	6.41329E+21	6.35687E+21	6.26231E+21
3	5.71544E+21	5.75465E+21	5.76263E+21	5.74689E+21	5.70172E+21	5.62140E+21
2	4.64361E+21	4.67962E+21	4.69230E+21	4.68496E+21	4.65243E+21	4.59152E+21
1	3.18597E+21	3.21428E+21	3.22597E+21	3.22460E+21	3.20664E+21	3.16845E+21

Table 60

Fast neutron fluence in fuel rod cladding in the energy range of 10.5MeV-0.8MeV(n/cm^2)

FC 18, FA 28						
fuel rod №	**6**	**16**	**32**	**54**	**82**	**116**
	Teff=0.0 days					
25	2.71600E+21	2.72758E+21	2.72588E+21	2.71395E+21	2.68861E+21	2.64876E+21
24	3.70343E+21	3.71674E+21	3.71187E+21	3.69125E+21	3.65521E+21	3.59741E+21
23	4.56792E+21	4.58115E+21	4.57120E+21	4.54261E+21	4.49362E+21	4.41898E+21
22	5.17758E+21	5.18802E+21	5.17450E+21	5.14017E+21	5.07997E+21	4.99247E+21
21	5.61519E+21	5.62561E+21	5.60881E+21	5.56923E+21	5.50154E+21	5.40462E+21
20	5.95666E+21	5.96912E+21	5.95183E+21	5.90890E+21	5.83770E+21	5.73450E+21
19	6.28036E+21	6.29749E+21	6.28373E+21	6.24162E+21	6.17020E+21	6.06658E+21
18	6.58073E+21	6.60705E+21	6.59880E+21	6.56173E+21	6.49260E+21	6.38569E+21
17	6.81693E+21	6.84951E+21	6.84631E+21	6.81430E+21	6.74862E+21	6.64359E+21
16	6.97637E+21	7.01177E+21	7.01191E+21	6.98039E+21	6.91456E+21	6.80768E+21
15	7.07805E+21	7.11502E+21	7.11573E+21	7.08490E+21	7.01787E+21	6.90987E+21
14	7.14191E+21	7.17975E+21	7.18103E+21	7.14936E+21	7.08077E+21	6.97236E+21
13	7.18389E+21	7.22155E+21	7.22278E+21	7.19033E+21	7.12121E+21	7.01094E+21
12	7.21167E+21	7.24922E+21	7.24975E+21	7.21775E+21	7.14802E+21	7.03673E+21
11	7.23127E+21	7.26785E+21	7.26830E+21	7.23603E+21	7.16520E+21	7.05338E+21
10	7.24230E+21	7.27889E+21	7.27862E+21	7.24578E+21	7.17476E+21	7.06131E+21
9	7.24188E+21	7.27764E+21	7.27846E+21	7.24509E+21	7.17277E+21	7.05920E+21
8	7.22025E+21	7.25641E+21	7.25614E+21	7.22336E+21	7.15222E+21	7.03833E+21
7	7.16036E+21	7.19656E+21	7.19672E+21	7.16461E+21	7.09493E+21	6.98204E+21
6	7.03510E+21	7.07228E+21	7.07334E+21	7.04184E+21	6.97590E+21	6.86586E+21
5	6.79999E+21	6.83855E+21	6.84204E+21	6.81402E+21	6.75013E+21	6.64692E+21
4	6.39152E+21	6.43143E+21	6.43618E+21	6.41329E+21	6.35687E+21	6.26231E+21
3	5.71544E+21	5.75465E+21	5.76263E+21	5.74689E+21	5.70172E+21	5.62140E+21
2	4.64361E+21	4.67962E+21	4.69230E+21	4.68496E+21	4.65243E+21	4.59152E+21
1	3.18597E+21	3.21428E+21	3.22597E+21	3.22460E+21	3.20664E+21	3.16845E+21
	Teff=100 days					
25	3.04611E+21	3.05924E+21	3.05816E+21	3.04624E+21	3.01998E+21	2.97793E+21
24	4.15324E+21	4.16852E+21	4.16445E+21	4.14383E+21	4.10658E+21	4.04601E+21
23	5.11881E+21	5.13413E+21	5.12495E+21	5.09614E+21	5.04572E+21	4.96784E+21
22	5.79941E+21	5.81197E+21	5.79907E+21	5.76430E+21	5.70224E+21	5.61107E+21
21	6.28800E+21	6.30043E+21	6.28404E+21	6.24385E+21	6.17401E+21	6.07312E+21
20	6.66826E+21	6.68244E+21	6.66515E+21	6.62122E+21	6.54774E+21	6.44027E+21
19	7.02350E+21	7.04190E+21	7.02792E+21	6.98468E+21	6.91073E+21	6.80271E+21
18	7.34691E+21	7.37445E+21	7.36598E+21	7.32752E+21	7.25577E+21	7.14441E+21
17	7.60279E+21	7.63639E+21	7.63248E+21	7.59898E+21	7.53053E+21	7.42107E+21
16	7.77690E+21	7.81318E+21	7.81236E+21	7.77923E+21	7.71041E+21	7.59902E+21
15	7.88866E+21	7.92637E+21	7.92610E+21	7.89356E+21	7.82343E+21	7.71086E+21
14	7.95922E+21	7.99764E+21	7.99793E+21	7.96436E+21	7.89265E+21	7.77962E+21
13	8.00525E+21	8.04341E+21	8.04365E+21	8.00921E+21	7.93694E+21	7.82196E+21
12	8.03518E+21	8.07322E+21	8.07276E+21	8.03868E+21	7.96572E+21	7.84970E+21
11	8.05537E+21	8.09244E+21	8.09190E+21	8.05747E+21	7.98340E+21	7.86676E+21
10	8.06585E+21	8.10295E+21	8.10160E+21	8.06660E+21	7.99226E+21	7.87399E+21
9	8.06364E+21	8.09997E+21	8.09972E+21	8.06420E+21	7.98848E+21	7.86994E+21
8	8.03819E+21	8.07502E+21	8.07359E+21	8.03866E+21	7.96407E+21	7.84506E+21
7	7.97017E+21	8.00710E+21	8.00603E+21	7.97172E+21	7.89853E+21	7.78034E+21
6	7.82823E+21	7.86620E+21	7.86615E+21	7.83265E+21	7.76327E+21	7.64804E+21
5	7.56351E+21	7.60308E+21	7.60572E+21	7.57578E+21	7.50866E+21	7.40053E+21
4	7.10784E+21	7.14869E+21	7.15308E+21	7.12846E+21	7.06909E+21	6.96977E+21
3	6.35742E+21	6.39773E+21	6.40538E+21	6.38848E+21	6.34073E+21	6.25609E+21
2	5.16972E+21	5.20715E+21	5.21983E+21	5.21154E+21	5.17695E+21	5.11224E+21
1	3.54973E+21	3.57909E+21	3.59093E+21	3.58898E+21	3.56952E+21	3.52842E+21

Table 60 (continue)

	Teff=200 days					
25	3.42846E+21	3.44323E+21	3.44273E+21	3.43052E+21	3.40305E+21	3.35846E+21
24	4.66891E+21	4.68645E+21	4.68330E+21	4.66230E+21	4.62337E+21	4.55933E+21
23	5.74186E+21	5.75954E+21	5.75123E+21	5.72217E+21	5.67014E+21	5.58812E+21
22	6.49210E+21	6.50701E+21	6.49480E+21	6.45942E+21	6.39502E+21	6.29976E+21
21	7.02543E+21	7.04036E+21	7.02455E+21	6.98356E+21	6.91122E+21	6.80570E+21
20	7.43531E+21	7.45206E+21	7.43477E+21	7.38977E+21	7.31383E+21	7.20176E+21
19	7.81186E+21	7.83160E+21	7.81754E+21	7.77327E+21	7.69648E+21	7.58381E+21
18	8.14829E+21	8.17712E+21	8.16887E+21	8.12960E+21	8.05528E+21	7.93941E+21
17	8.41348E+21	8.44830E+21	8.44479E+21	8.41005E+21	8.33876E+21	8.22491E+21
16	8.59343E+21	8.63111E+21	8.63043E+21	8.59566E+21	8.52430E+21	8.40832E+21
15	8.70795E+21	8.74721E+21	8.74677E+21	8.71283E+21	8.63990E+21	8.52288E+21
14	8.77960E+21	8.81991E+21	8.81954E+21	8.78457E+21	8.71022E+21	8.59258E+21
13	8.82585E+21	8.86599E+21	8.86556E+21	8.82965E+21	8.75474E+21	8.63522E+21
12	8.85594E+21	8.89597E+21	8.89468E+21	8.85937E+21	8.78352E+21	8.66296E+21
11	8.87657E+21	8.91563E+21	8.91443E+21	8.87851E+21	8.80155E+21	8.68045E+21
10	8.88814E+21	8.92722E+21	8.92512E+21	8.88864E+21	8.81132E+21	8.68843E+21
9	8.88739E+21	8.92563E+21	8.92463E+21	8.88762E+21	8.80883E+21	8.68549E+21
8	8.86306E+21	8.90171E+21	8.89962E+21	8.86303E+21	8.78544E+21	8.66130E+21
7	8.79343E+21	8.83193E+21	8.83044E+21	8.79438E+21	8.71779E+21	8.59438E+21
6	8.64256E+21	8.68201E+21	8.68178E+21	8.64623E+21	8.57365E+21	8.45326E+21
5	8.35674E+21	8.39750E+21	8.40020E+21	8.36874E+21	8.29827E+21	8.18503E+21
4	7.86159E+21	7.90342E+21	7.90772E+21	7.88188E+21	7.81955E+21	7.71539E+21
3	7.04104E+21	7.08290E+21	7.09022E+21	7.07208E+21	7.02159E+21	6.93249E+21
2	5.73631E+21	5.77538E+21	5.78839E+21	5.77919E+21	5.74228E+21	5.67348E+21
1	3.94533E+21	3.97591E+21	3.98791E+21	3.98548E+21	3.96425E+21	3.91990E+21
	Teff=306.73 days					
25	3.87444E+21	3.89120E+21	3.89146E+21	3.87861E+21	3.84924E+21	3.80144E+21
24	5.26468E+21	5.28483E+21	5.28276E+21	5.26105E+21	5.21987E+21	5.15150E+21
23	6.45583E+21	6.47623E+21	6.46891E+21	6.43957E+21	6.38568E+21	6.29842E+21
22	7.27834E+21	7.29613E+21	7.28450E+21	7.24828E+21	7.18137E+21	7.08148E+21
21	7.85417E+21	7.87197E+21	7.85674E+21	7.81447E+21	7.73940E+21	7.62838E+21
20	8.28862E+21	8.30831E+21	8.29172E+21	8.24553E+21	8.16616E+21	8.04850E+21
19	8.67993E+21	8.70234E+21	8.68835E+21	8.64287E+21	8.56280E+21	8.44476E+21
18	9.02417E+21	9.05464E+21	9.04640E+21	9.00590E+21	8.92869E+21	8.80758E+21
17	9.29321E+21	9.32951E+21	9.32582E+21	9.29008E+21	9.21571E+21	9.09676E+21
16	9.47496E+21	9.51387E+21	9.51300E+21	9.47722E+21	9.40286E+21	9.28168E+21
15	9.58899E+21	9.62949E+21	9.62919E+21	9.59407E+21	9.51796E+21	9.39609E+21
14	9.65952E+21	9.70116E+21	9.70118E+21	9.66494E+21	9.58725E+21	9.46467E+21
13	9.70480E+21	9.74626E+21	9.74622E+21	9.70896E+21	9.63097E+21	9.50626E+21
12	9.73482E+21	9.77618E+21	9.77544E+21	9.73862E+21	9.65951E+21	9.53401E+21
11	9.75661E+21	9.79699E+21	9.79618E+21	9.75883E+21	9.67886E+21	9.55256E+21
10	9.77088E+21	9.81129E+21	9.80950E+21	9.77157E+21	9.69115E+21	9.56294E+21
9	9.77411E+21	9.81369E+21	9.81298E+21	9.77452E+21	9.69227E+21	9.56342E+21
8	9.75444E+21	9.79443E+21	9.79263E+21	9.75450E+21	9.67342E+21	9.54347E+21
7	9.68773E+21	9.72748E+21	9.72611E+21	9.68816E+21	9.60780E+21	9.47864E+21
6	9.53318E+21	9.57388E+21	9.57319E+21	9.53616E+21	9.45967E+21	9.33356E+21
5	9.23138E+21	9.27361E+21	9.27588E+21	9.24273E+21	9.16882E+21	9.04972E+21
4	8.70044E+21	8.74383E+21	8.74788E+21	8.72036E+21	8.65466E+21	8.54480E+21
3	7.80919E+21	7.85344E+21	7.86037E+21	7.84084E+21	7.78727E+21	7.69309E+21
2	6.37801E+21	6.41905E+21	6.43226E+21	6.42196E+21	6.38195E+21	6.30835E+21
1	4.39665E+21	4.42883E+21	4.44101E+21	4.43782E+21	4.41477E+21	4.36652E+21

Table 60 (continue)

	Teff=325 days					
25	3.95918E+21	3.97632E+21	3.97673E+21	3.96381E+21	3.93414E+21	3.88564E+21
24	5.37794E+21	5.39858E+21	5.39671E+21	5.37493E+21	5.33338E+21	5.26408E+21
23	6.59168E+21	6.61258E+21	6.60546E+21	6.57606E+21	6.52162E+21	6.43346E+21
22	7.42807E+21	7.44638E+21	7.43489E+21	7.39853E+21	7.33091E+21	7.23014E+21
21	8.01169E+21	8.03001E+21	8.01489E+21	7.97219E+21	7.89660E+21	7.78459E+21
20	8.44982E+21	8.47001E+21	8.45347E+21	8.40680E+21	8.32687E+21	8.20796E+21
19	8.84169E+21	8.86446E+21	8.85045E+21	8.80474E+21	8.72409E+21	8.60482E+21
18	9.18495E+21	9.21570E+21	9.20745E+21	9.16673E+21	9.08899E+21	8.96694E+21
17	9.45131E+21	9.48811E+21	9.48439E+21	9.44815E+21	9.37322E+21	9.25338E+21
16	9.63007E+21	9.66974E+21	9.66881E+21	9.63276E+21	9.55760E+21	9.43553E+21
15	9.74150E+21	9.78248E+21	9.78239E+21	9.74701E+21	9.67035E+21	9.54737E+21
14	9.80946E+21	9.85159E+21	9.85181E+21	9.81530E+21	9.73706E+21	9.61364E+21
13	9.85240E+21	9.89489E+21	9.89504E+21	9.85750E+21	9.77899E+21	9.65316E+21
12	9.88083E+21	9.92321E+21	9.92266E+21	9.88556E+21	9.80591E+21	9.67933E+21
11	9.90179E+21	9.94293E+21	9.94205E+21	9.90467E+21	9.82391E+21	9.69678E+21
10	9.91552E+21	9.95642E+21	9.95480E+21	9.91659E+21	9.83562E+21	9.70658E+21
9	9.91869E+21	9.95875E+21	9.95823E+21	9.91948E+21	9.83666E+21	9.70694E+21
8	9.89932E+21	9.93980E+21	9.93818E+21	9.89974E+21	9.81810E+21	9.68723E+21
7	9.83262E+21	9.87311E+21	9.87192E+21	9.83364E+21	9.75266E+21	9.62258E+21
6	9.67757E+21	9.71900E+21	9.71847E+21	9.68112E+21	9.60402E+21	9.47698E+21
5	9.37353E+21	9.41649E+21	9.41894E+21	9.38550E+21	9.31100E+21	9.19072E+21
4	8.83739E+21	8.88147E+21	8.88573E+21	8.85793E+21	8.79169E+21	8.68067E+21
3	7.93524E+21	7.97979E+21	7.98710E+21	7.96758E+21	7.91328E+21	7.81826E+21
2	6.48398E+21	6.52534E+21	6.53875E+21	6.52828E+21	6.48781E+21	6.41344E+21
1	4.47152E+21	4.50395E+21	4.51616E+21	4.51286E+21	4.48949E+21	4.44075E+21

The Project Manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2003

Nondestructive post-irradiation examinations of fuel rods of VVER-440 fuel assembly No 13626135 operated up to the average burnup of 38.5 MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP

Interim progress report, Task No 4

VVER Burnup Credit Project (2670p)

Part 4

Dimitrovgrad, 2003

Abstract

The present report includes 24 pages, 19 figures, 6 Tables and 10 references.

Key words: VVER Burnup Credit Project, spent VVER-440 fuel assemblies, nondestructive examination of fuel rods.

Presented here are the main results of post irradiation examinations for four fuel rods of VVER-440 fuel assembly No.13626135. Their conditions were compared with the parameters of other fuel rods in fuel assembly (FA). The appropriateness of their selection for destructive examination in spent fuel isotopic composition was evaluated.

Table of contents

Introduction 4

1. Schematic arrangement of fuel rods over FA cross-section 5

2. Nondestructive examination results of fuel rods 6

2.1. Visual inspection 6

2.2. Length measurement 6

2.3. Outer diameter of claddings 11

2.4.Eddy current testing 11

2.5. Gamma spectrometry 16

2.6. Gas quantity and composition under the cladding 21

2.7. Fuel-to-cladding gap 23

2.8. X-ray radiography 23

Conclusion 24

References: 24

Introduction

The main result of Task 1 performance in the framework of VVER Burnup Credit Project [1] was the development of selection methodology for VVER-440 fuel assemblies and fuel rods to determine fuel burnup and nuclide composition.

Fuel assembly No. 13626135 was selected using its basic provisions as the result of process [2] and operating characteristic analysis [3]. It was also recommended to use four radial fuel rods for destructive and nondestructive examinations. The selected fuel assembly having the source enrichment of 3.6% ^{235}U was operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in Novovoronezh NPP during four fuel cycles.

The present report aims at presenting the nondestructive examination results for four fuel rods No.No.65, 67, 68 and 69, comparison of their parameters with characteristics of other FA fuel rods to evaluate the appropriateness of the selection and define more exactly the place of specimen cutting for quantitative analysis of fuel isotopic composition.

1. Schematic arrangement of fuel rods over FA cross-section

Fig. 1 demonstrates the location of fuel rods with the assigned conventional numbers 1-126 in fuel assembly No.13626135. The gray circles are used for marking fuel rods No.No.65, 67, 68 and 69, which are selected to determine nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction with the help of radiochemical and mass-spectrum analysis techniques.

Schematic arrangement of fuel rods in fuel assembly

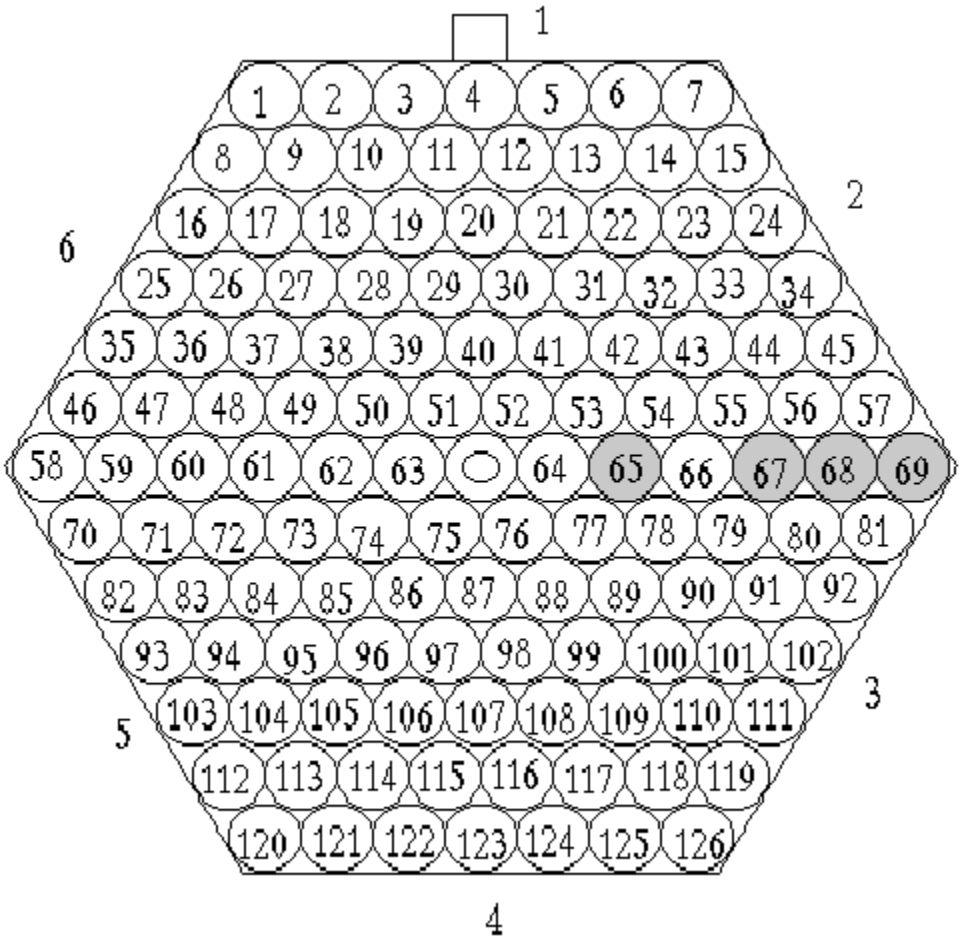


Fig. 1

2. Nondestructive examination results of fuel rods

2.1. Visual inspection

Visual inspection was performed using the viewing windows of the hot cell and in-cell periscope with a magnification of x 0.8-5 in accordance with a technique described in paper [4].

Visual inspection revealed a satisfactory condition of fuel rods (Fig.2). Claddings of fuel rods were predominantly dark in color. Contrasting whitish stains (Fig.3) were noticed on the claddings between the 6th and 10th spacer grids on the side of the 2nd, 3rd and 4th FA edges.

Fuel rods were extracted from the bundle after undercutting the lower tail part. The average force of fuel rod extraction from the spacer grids made up 10 kg. Whitish stains were also noticed on the surface of the inner circle fuel rods close to spacer grids 7-10 on the side of the 3rd and 4th edges. Vividness of contour stains was less vigorous in fuel rods located in the center of the bundle.

The traces of cladding interaction with the spacer grid indents were noticed during visual inspection of FA 13626135 fuel rods. For the most part damages of fuel rod claddings under the spacer grids were of cosmetic character and small in size (Fig. 4).

Fig. 5 shows the external view of four fuel rods No. No. 65, 67, 68 and 69. The cladding surfaces are dark-gray in color and demonstrate a good reflection power in the lower part of fuel rods (0–850 mm). The surface becomes dull in the centre of the fuel rod (850–1800 mm) and the color varies from light-gray to dark-gray. Whitish spots and oxide outlines are noticed at a distance higher than 1800 mm. The color of fuel rod claddings becomes white-gray with numerous oxide outlines and whitish spots in the area of gas plenums. The traces of interaction between four fuel rods and spacer grids are white-gray spots of width 1-2mm and length ~10 mm elongated in a longitudinal direction. Defects of the upper and lower joint welds (cracks, mechanical damages and increased oxidation) weren't revealed during visual inspection of fuel rods.

So the surface of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 is specific to fuel assembly No. 13626135 and similar in condition to fuel rods of examined VVER-440 fuel assemblies having close fuel burnup values.

2.2. Length measurement

Elongation of fuel rods was measured in accordance with the technique described in paper [5]. A measurement error was no more than ±0.5 mm. Elongation data for all fuel rods are shown in Fig.6 and 7. The average elongation of fuel rods made up 6.06 mm ($\Delta L/L$ = 0.24%) in fuel assembly N.13626135. A minimum elongation was equal to 4.05 mm (0.16%), maximum one - 7.64 mm (0.30%).

External view of fuel rods in FA No.13626135 on the side of edges 6-1-2 (a) and 3-4-5 (b)

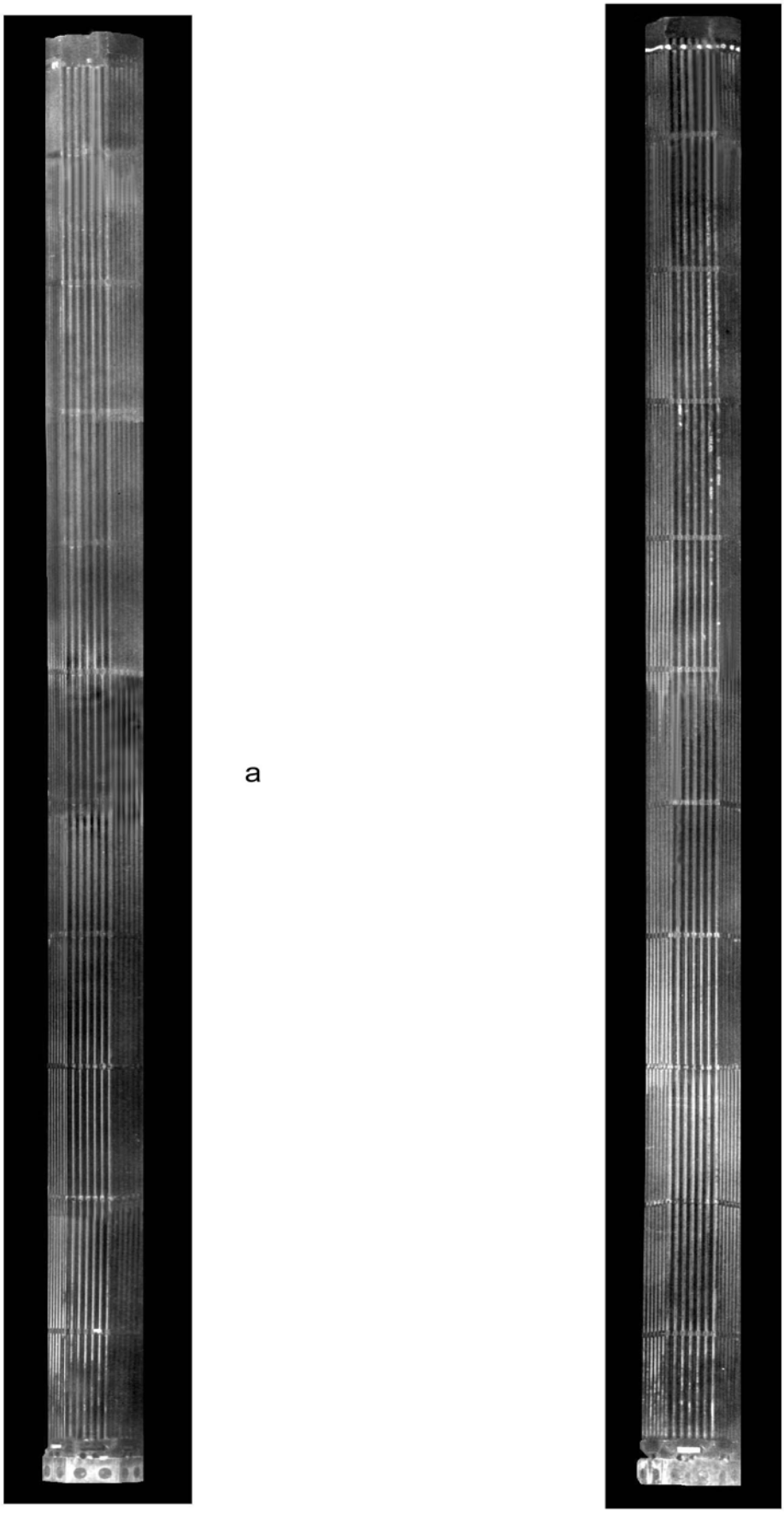


Fig.2

Contour stains on fuel rod surfaces on the side of the 4th edge in the area of the 8th spacer grid

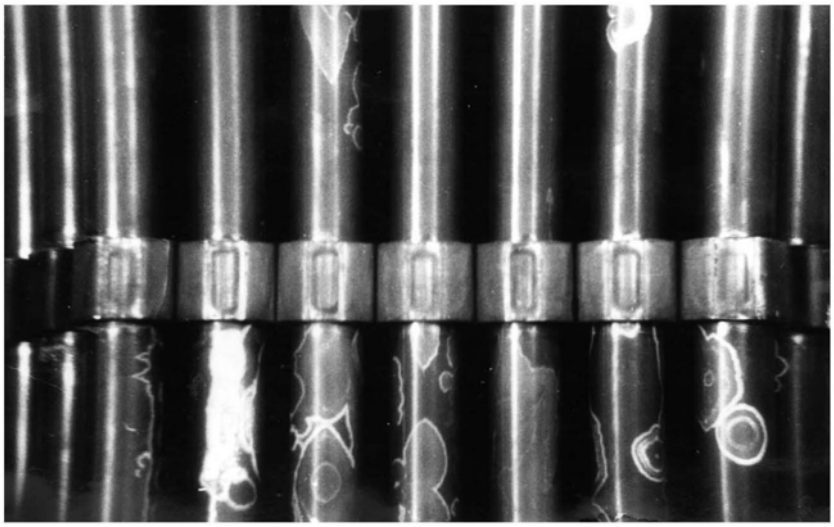


Fig.3

Traces of fuel rod cladding-to-spacer grid interaction

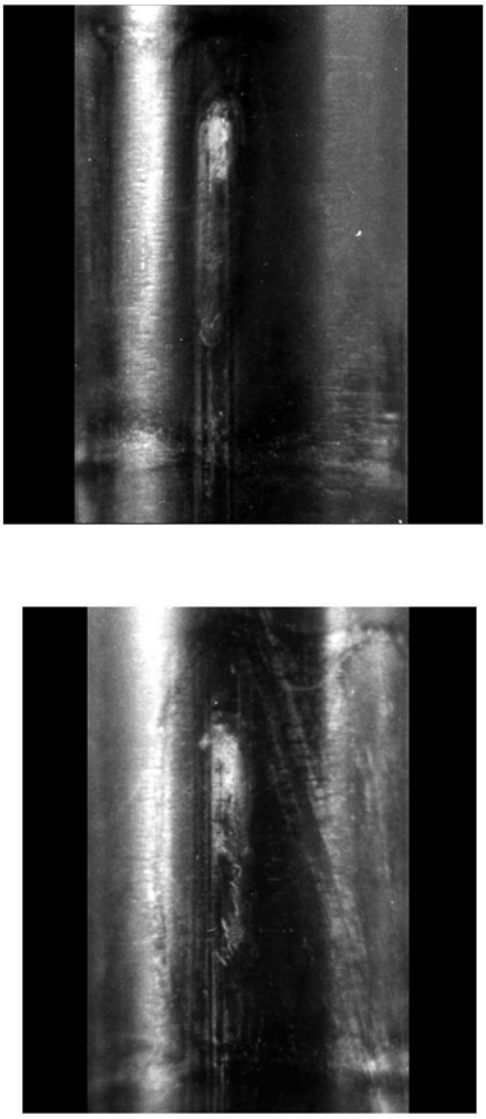


Fig.4

External view of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 in FA No.13626135

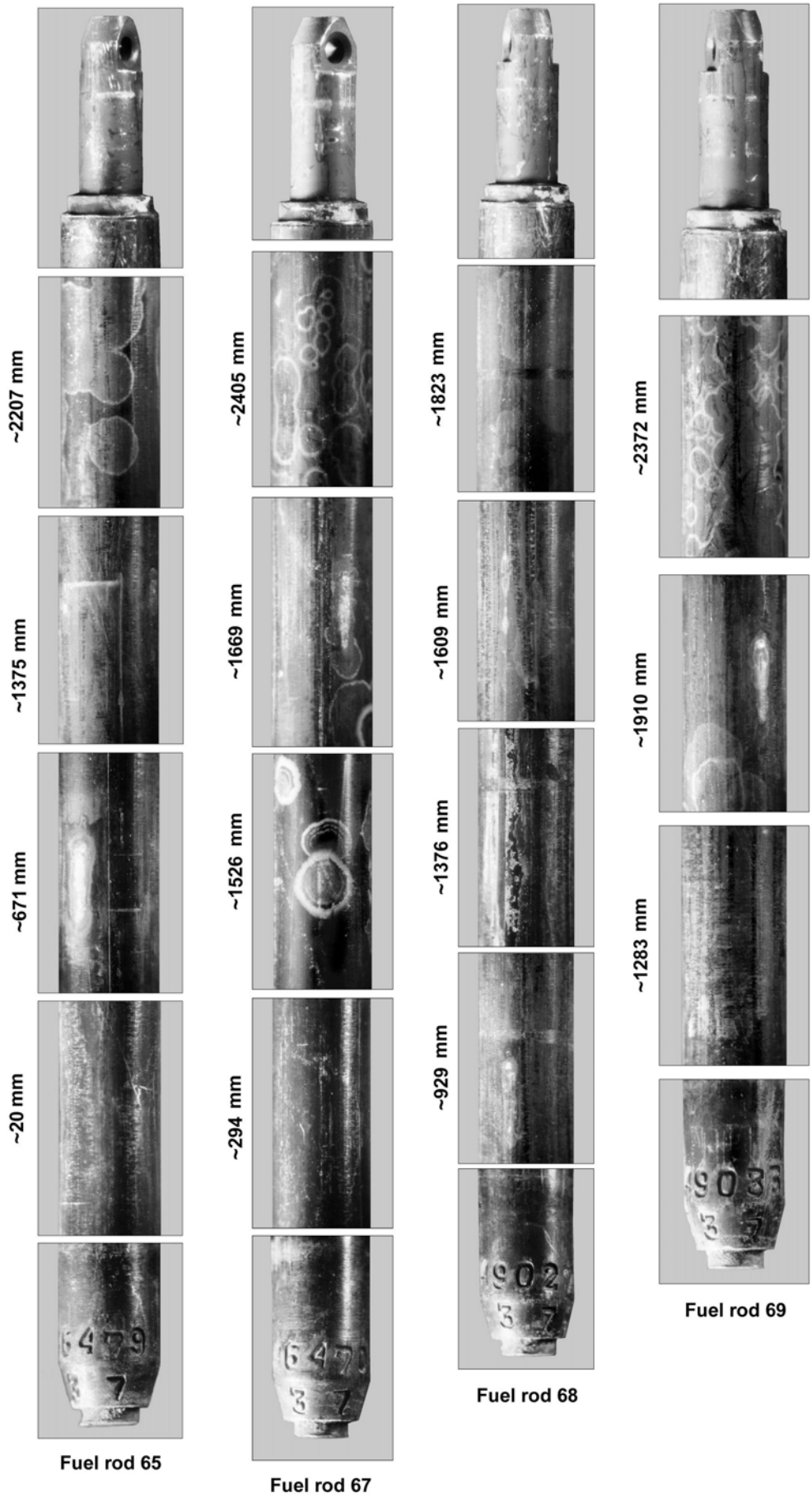


Fig. 5

Schematic diagram of fuel rod elongation in FA No.13626135

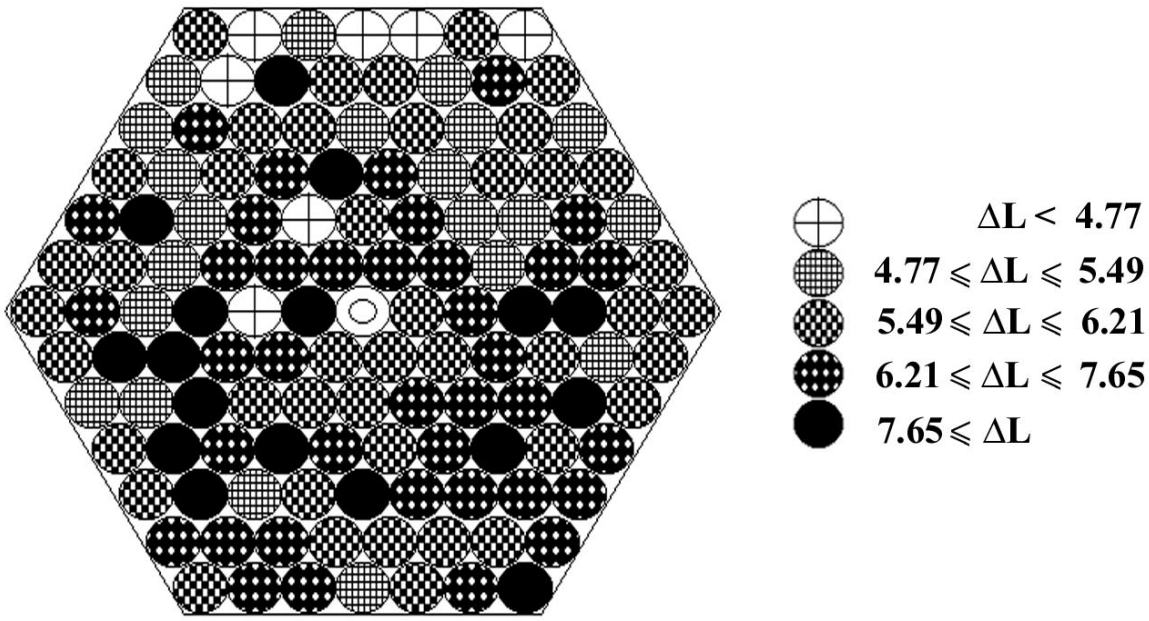


Fig.6

Chart of fuel rod elongation in FA No.13626135

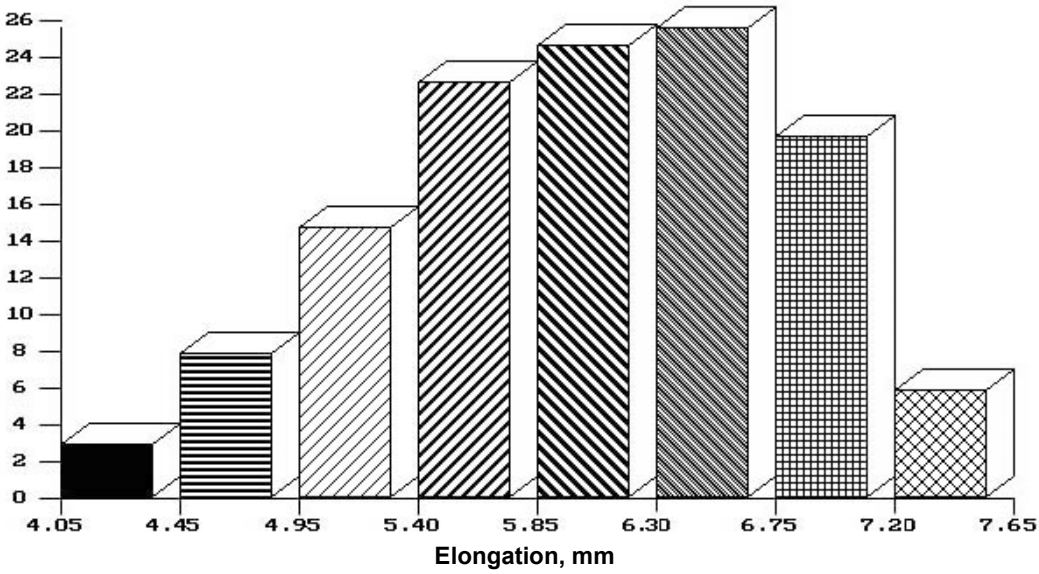


Fig. 7

Table 1 includes elongation data for fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69.

Table 1

Elongation of four fuel rods in FA No.13626135

Fuel rod No.	Absolute length, mm	Elongation, mm	Percent elongation, %
65	2549.80	6.30	0.25
67	2551.14	7.64	0.30
68	2549.48	5.98	0.24
69	2549.66	6.16	0.24

The analysis of presented data reveals that the elongation of selected fuel rods (5.98-7.64 mm) doesn't go beyond the limit of length increase of fuel rod cladding tubes in FA No.13626135 (4.05-7.64 mm).

2.3. Outer diameter of claddings

Profilometer of contact type provided with the "magnetic rule" [6] was used to measure the outer diameter of fuel rods. Measurements were made in two perpendicular-reciprocal directions with a pitch of 2mm. The diameter measurement error was no more than ±0.02 mm. The diameter change was calculated as a difference between the average diameter values in the gas plenum (48-70 mm from the upper part of fuel rod) and fuel rod centre area (800-2000 mm).

Changes of diameter were noticed in 40 fuel rods of fuel assembly. The obtained results are shown in Table 2.

Fig. 8 demonstrates the diameter distribution along the length of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69. The analysis of presented data reveals that the change in diameter of four selected fuel rods (0.03-0.04 mm) is in the range of maximum shrinkage values for FA No.13626135 fuel rod claddings (0.03-0.06 mm).

2.4. Eddy current testing

Pulse-type and harmonic-type eddy current defectoscopes were used for diagnostics of fuel rod cladding conditions with the help of techniques described in paper [7].

The pulse-type flow meter was used for measurements in the continuous mode during extraction of fuel rods from the bundle by way of passing the portable eddy current go-transducer. Fuel rods were selected for precision examination of claddings using harmonic eddy current defectoscope based on the primary pulse eddy current control data of 100%. The selected fuel rods were subjected to examination under start-stop conditions with a pitch of 2 mm.

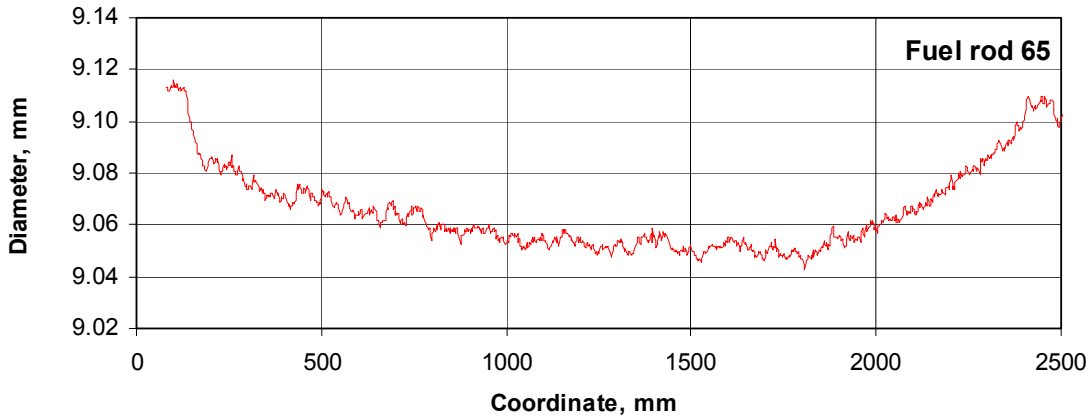
Eddy current testing of fuel rods revealed that there were no significant defects on the cladding. Eddy current signals were insignificant in amplitude and they were found in the regions, which agree with the spacer grid coordinates. The amplitude and phase analysis demonstrated that the main differences in eddy current diagrams of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 (Fig. 9-12) as well as other fuel rods in FA No.13626135 are related to fabrication process. It is the specific feature of the outer diameter (or thickness) change in plant made cladding tubes.

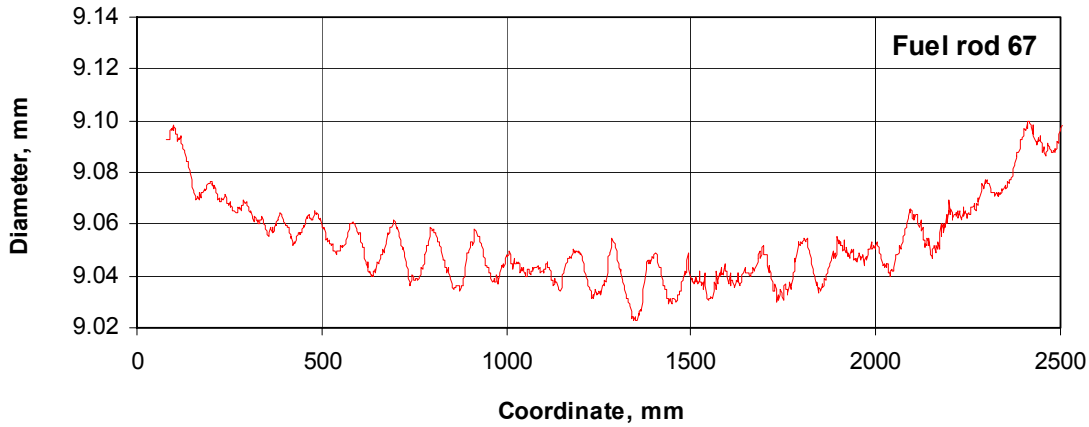
Table 2

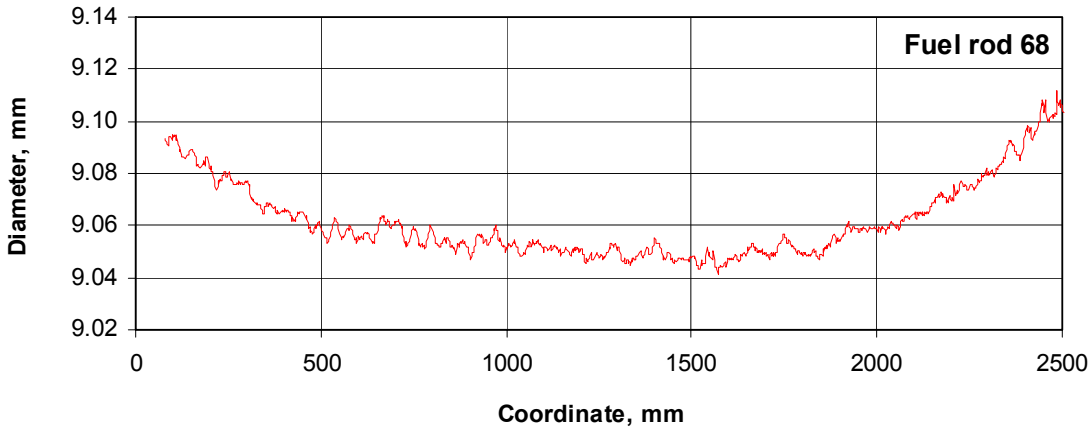
Diameters of fuel rod claddings in FA No.13626135

Fuel rod No.	Average diameter in the gas plenum region, mm	Average diameter in the centre area, mm	Difference between diameters in the centre area and gas plenum regions, mm
001	9.10	9.06	-0.04
004	9.11	9.07	-0.04
007	9.11	9.06	-0.05
009	9.11	9.07	-0.04
014	9.11	9.06	-0.05
018	9.10	9.05	-0.04
022	9.11	9.07	-0.03
026	9.10	9.06	-0.05
028	9.09	9.05	-0.04
031	9.11	9.06	-0.04
039	9.10	9.07	-0.03
041	9.11	9.07	-0.04
051	9.11	9.07	-0.05
052	9.09	9.06	-0.04
058	9.12	9.07	-0.05
059	9.09	9.05	-0.04
060	9.10	9.06	-0.04
061	9.09	9.04	-0.05
062	9.11	9.07	-0.04
063	9.10	9.05	-0.06
064	9.11	9.07	-0.04
065	**9.10**	**9.07**	**-0.04**
066	9.11	9.06	-0.04
067	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
068	**9.10**	**9.06**	**-0.04**
069	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
075	9.10	9.07	-0.03
076	9.11	9.06	-0.05
086	9.10	9.07	-0.04
088	9.13	9.08	-0.05
090	9.09	9.05	-0.04
096	9.09	9.04	-0.05
099	9.10	9.05	-0.05
105	9.09	9.05	-0.04
109	9.09	9.03	-0.05
112	9.12	9.08	-0.04
113	9.10	9.07	-0.03
118	9.10	9.06	-0.04
120	9.12	9.07	-0.05
126	9.13	9.07	-0.06
Minimum	9.09	9.03	-0.06
Maximum	9.13	9.08	-0.03
Average	9.10	9.06	-0.04
Mean-square deviation	0.011	0.011	0.006

Distribution of diameter value along four fuel rods







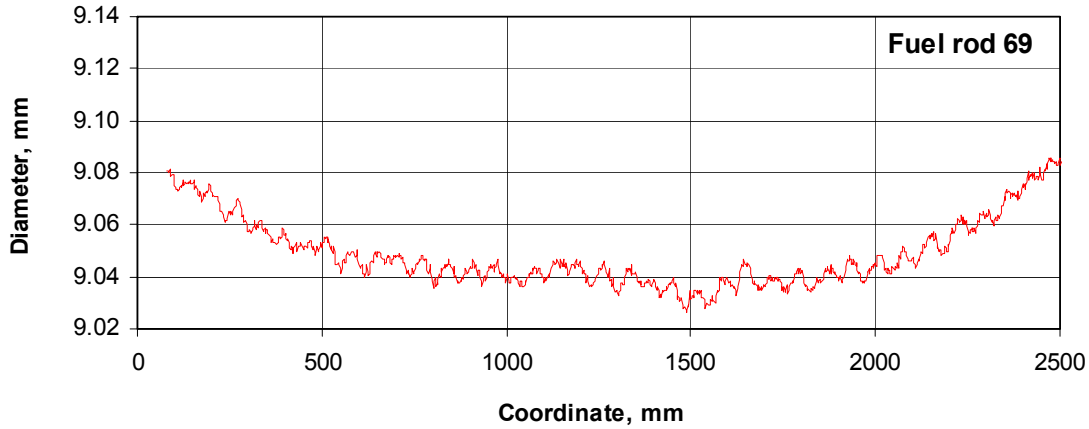


Fig. 8

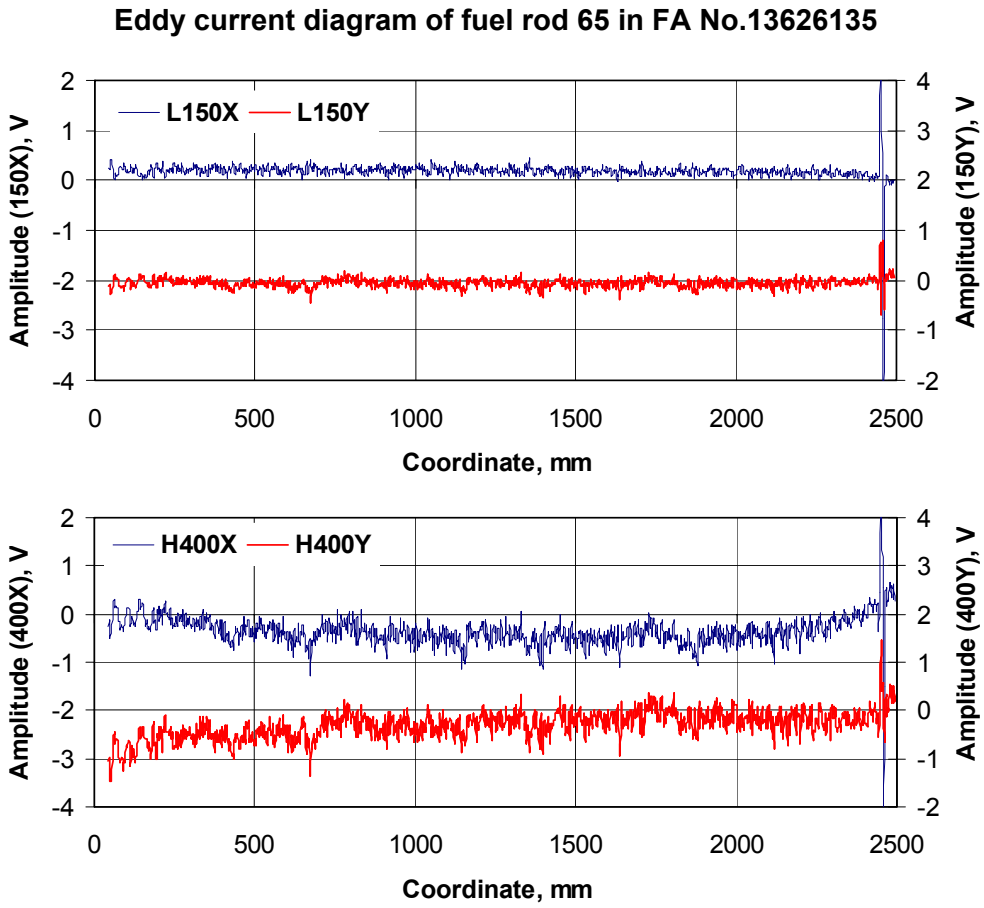

Eddy current diagram of fuel rod 65 in FA No.13626135
L150X
L150Y
Amplitude (150X), V
Amplitude (150Y), V
Coordinate, mm
H400X
H400Y
Amplitude (400X), V
Amplitude (400Y), V
Coordinate, mm

Fig. 9

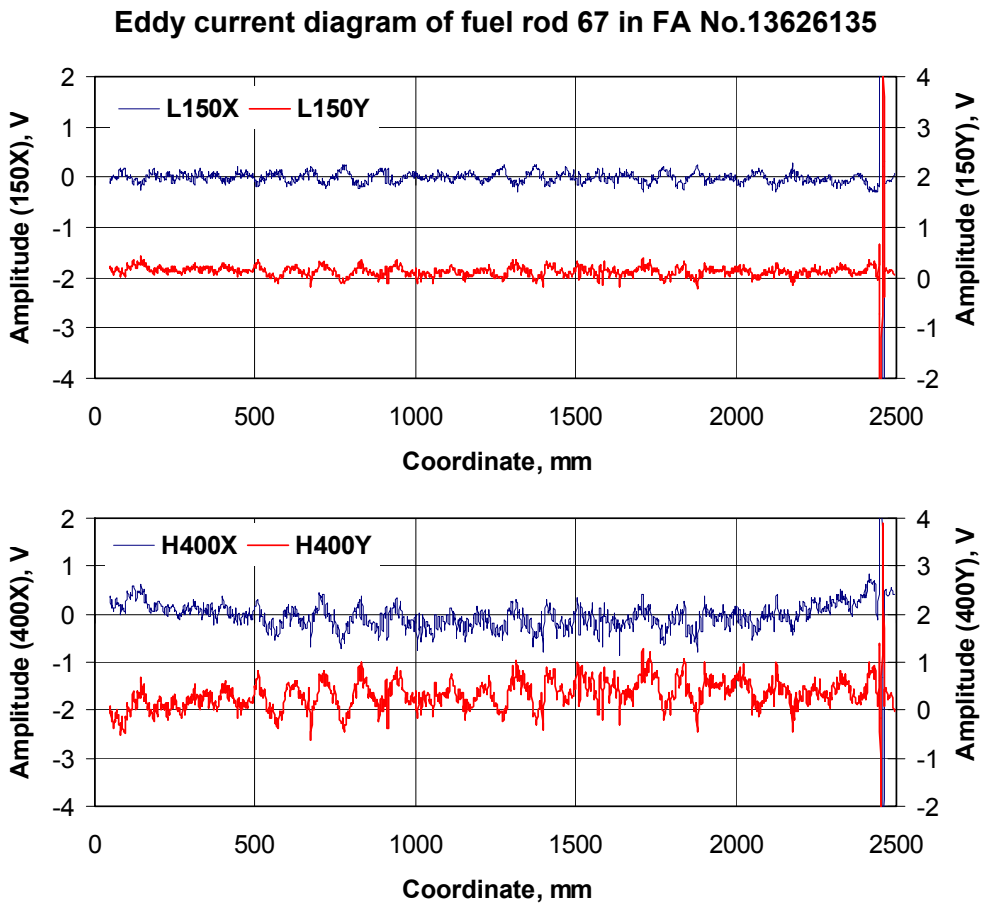

Eddy current diagram of fuel rod 67 in FA No.13626135
L150X
L150Y
Amplitude (150X), V
Amplitude (150Y), V
Coordinate, mm
H400X
H400Y
Amplitude (400X), V
Amplitude (400Y), V
Coordinate, mm

Fig. 10

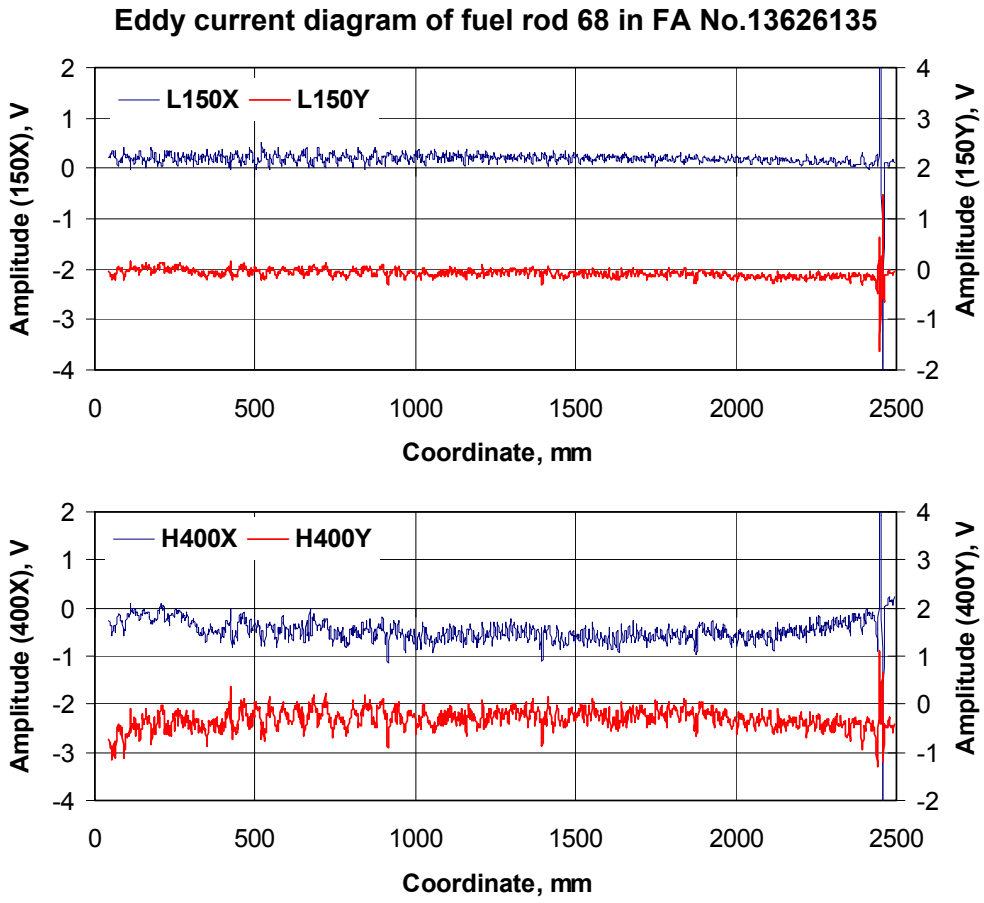

Eddy current diagram of fuel rod 68 in FA No.13626135
L150X
L150Y
Amplitude (150X), V
Amplitude (150Y), V
Coordinate, mm
H400X
H400Y
Amplitude (400X), V
Amplitude (400Y), V
Coordinate, mm

Fig. 11

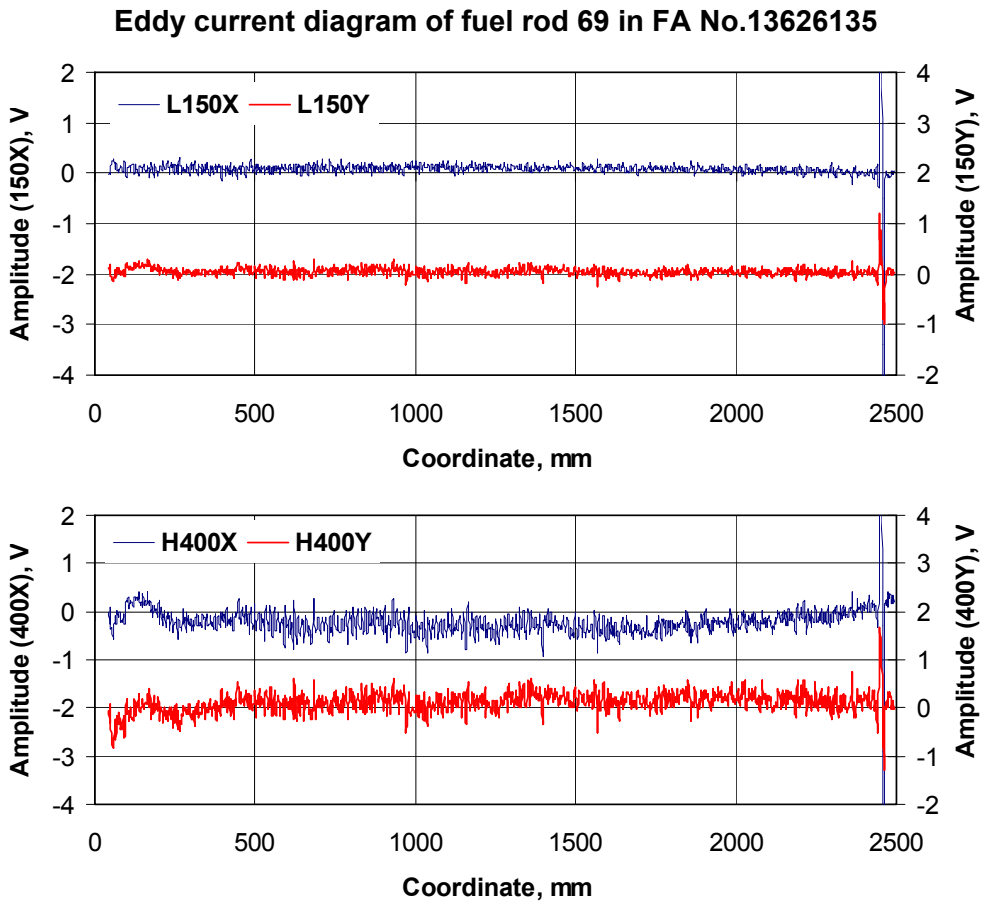

Eddy current diagram of fuel rod 69 in FA No.13626135
L150X
L150Y
Amplitude (150X), V
Amplitude (150Y), V
Coordinate, mm
H400X
H400Y
Amplitude (400X), V
Amplitude (400Y), V
Coordinate, mm

Fig. 12

2.5. Gamma spectrometry

The Ge(Li) semiconductor spectrometer was used for gamma spectrometry of fuel rods. The personal computer was used for gamma-spectra processing, arrayed data acquisition and data output in the automatic mode. They were scanned discretely with a pitch of 10 mm. A flat-field collimator was 3.0 mm in height. The gamma-spectrometer was subjected to calibration using the burnup standard before and after measurements. A fragment of standard VVER-1000 fuel rod was used as reference specimen. Its burnup was measured with the help of mass-spectrometry technique. Thirty-six diagonal fuel rods were subjected to gamma spectrometry. The pulse counting rate of Kr-85 gamma radiation was measured in fuel rod gas plenum thorough the collimator located in the shielding wall of the shipping container where the fuel rod under examination was placed.

Table 3 shows the experimental values for axial peaking factor (Kz) of ^{137}Cs long-lived fission product accumulation as well as maximum and average fuel burnup values in fuel rods.

Distributions of the maximum burnup in the diagonal fuel rods are shown in Fig. 13. The radial peaking factor (K_r) of fuel burnup in fuel assembly is 1.15. Fuel assembly No.13626135 achieved the maximum fuel burnup of 49.3 MWd/kgU. The average burnup (with due consideration for burnup non-uniformity throughout the FA height and over its cross-section) makes up 38.1 MWd/kgU and it coincides with the passport value actually (it is equal to 38.5 MWd/kgU).

Based on the presented data it is clear that the maximum fuel burnup in this particular fuel assembly is in fuel rod No.69, the minimum one is in fuel rod No.65. Fuel rods No.67 and No.68 demonstrate the intermediate fuel burnup values.

Table 4 presents the results of counting rate measurements for ^{85}Kr gamma-quanta in gas plenums of radial fuel rods. Data on counting rates of fission product radiation and cladding activation in free volumes of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 are given in Table 5.

The analysis of presented data reveals that the maximum gas release takes place in VVER-440 outermost circle fuel rods, which achieve the maximum burnup (No. 1 and No.69).

Fig. 14-17 show the profile of FP accumulation along four fuel rods selected for examination.

The analysis of presented data demonstrated that there is no significant FP migration along the fuel column length. The amount of cesium isotopes is rather small in the gas plenum region and it makes up about 1% from its content in fuel.

Table 3

Maximum and average fuel burnup and peaking factors (K_z) of fission product distribution along FA 135 fuel rods

Fuel rod No.	Maximum burnup, MWd/kgU	Kz (^{137}Cs)	Average burnup, MWd/kgU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	**42.3**	**1.16**	**36.4**
66	42.5	1.16	36.5
67	**43.8**	**1.16**	**37.6**
68	**45.7**	**1.16**	**39.3**
69	**49.3**	**1.17**	**42.2**
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Minimum	42.2	1.15	36.1
Maximum	49.3	1.17	42.8
Average	44.3	1.16	38.1
Mean-square deviation	2.18	0.005	1.97

Distribution of the average burnup in diagonal directions of FA No.13626135 fuel rods

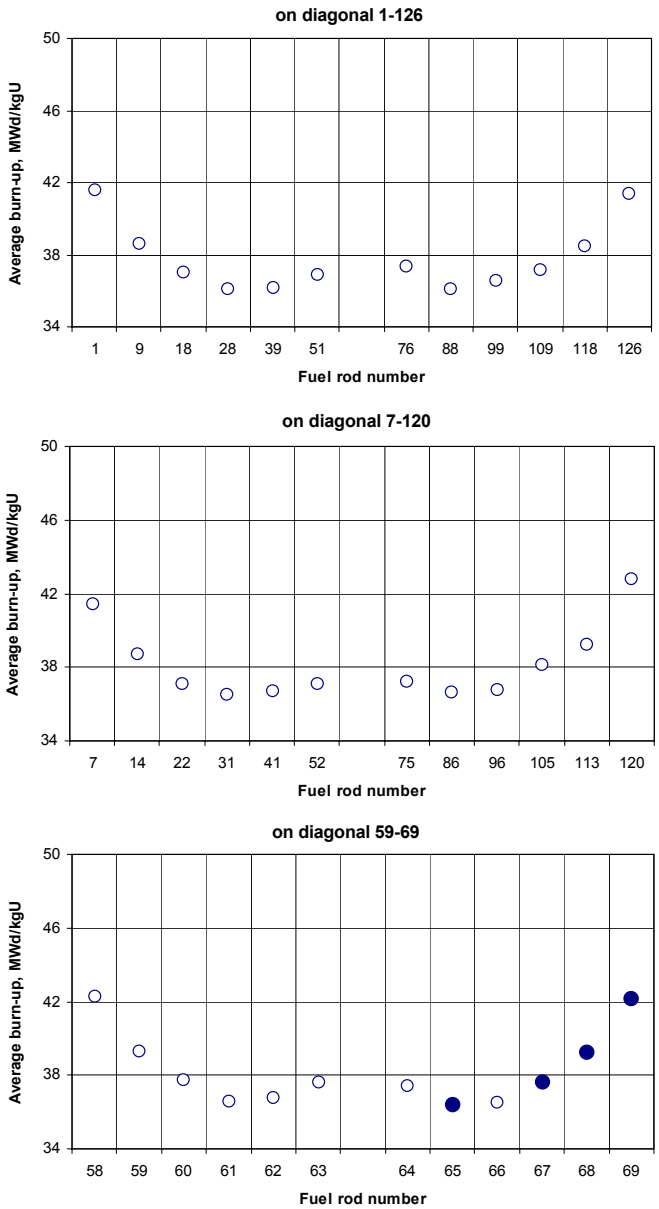


Fig. 13

Table 4

Counting rates of ^{85}Kr gamma radiation in gas plenums of FA 135 fuel rods

Fuel rod No.	1	9	18	28	39	51
Counting rate, pulse/s	85.8	30.3	22.7	18.0	18.0	19.2

Table 5

Counting rate of FP gamma radiation and cladding activation products in gas plenums of FA No.13626135 fuel rods, pulse/s

Fuel rod No.	^{85}Kr Eγ=513 keV	^{134}Cs Eγ=604 keV	^{137}Cs Eγ=661 keV	^{94}Nb Eγ=871 keV
65	17.4	6.0	64.1	16.1
67	14.8	4.4	36.2	14.6
68	14.3	5.4	60.7	12.7
69	65.9	5.4	49.6	12.6

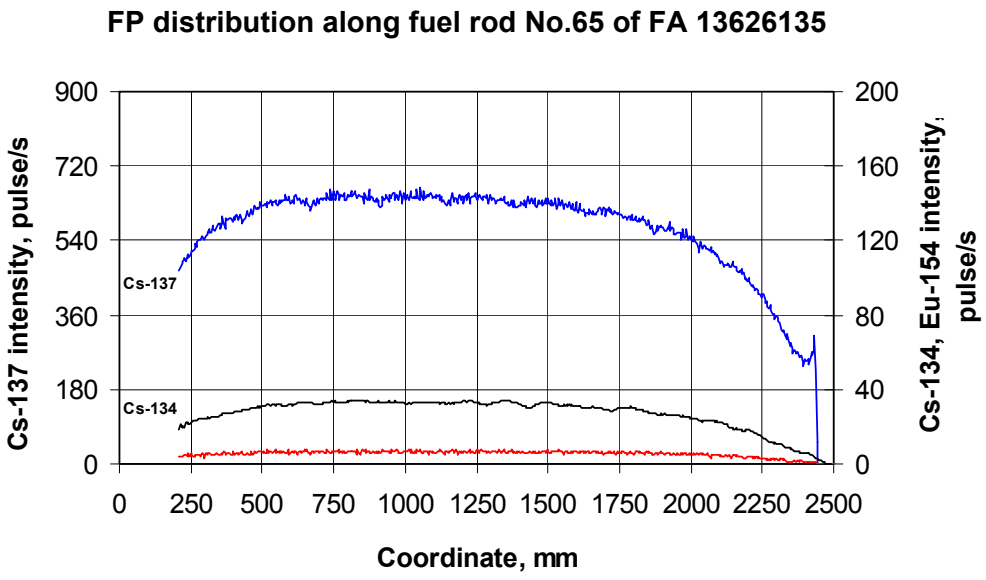


Fig. 14

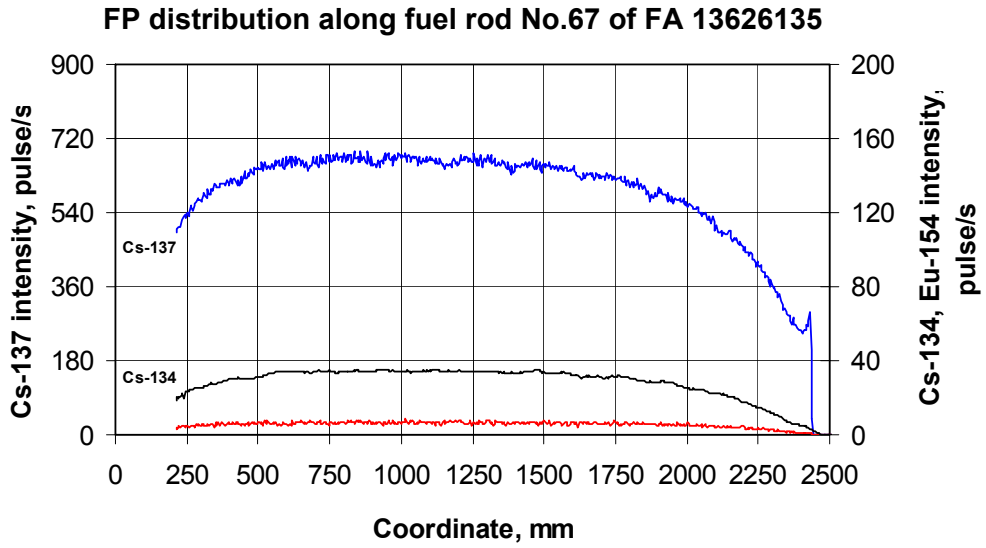


Fig. 15

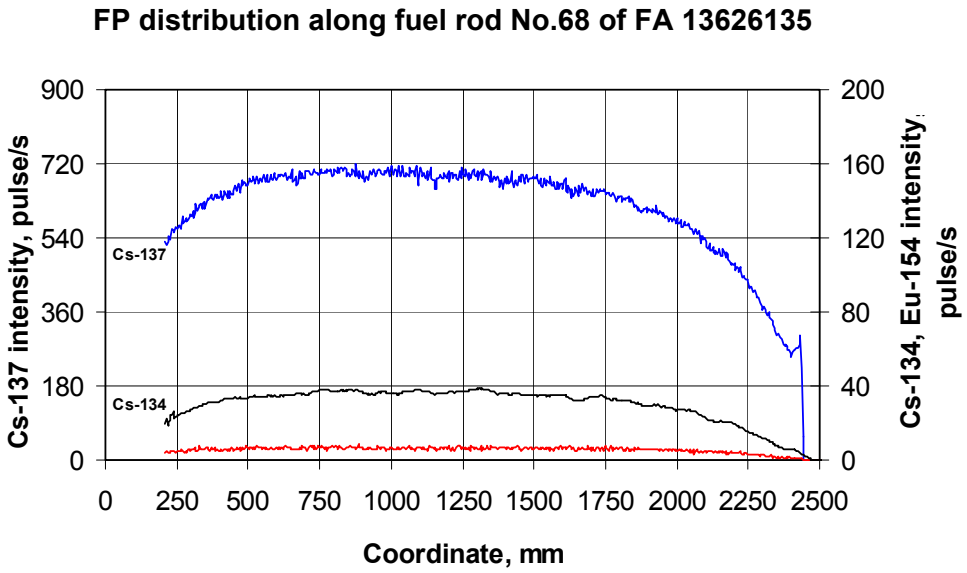


Fig. 16

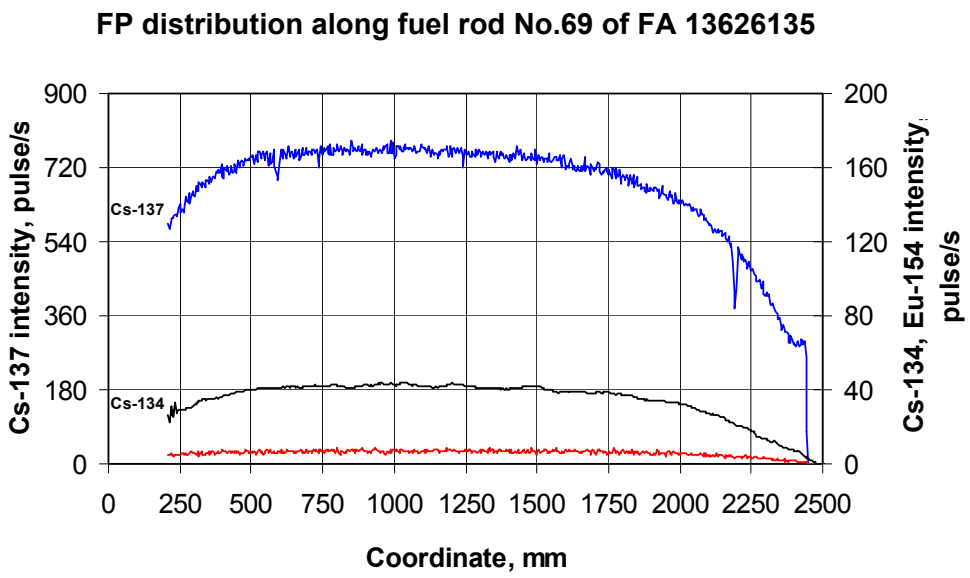


Fig. 17

The analysis of presented data demonstrated that there is no significant FP migration along the fuel column length. The amount of cesium isotopes is rather small in the gas plenum region and it makes up about 1% from its content in fuel.

2.6. Gas quantity and composition under the cladding

A laser puncture facility was used for measurement of gas parameters under the fuel rod cladding. Gas pressure was calculated by a formula [8]:

$$P_г = P_c\left[\frac{V_c}{V_г} + 1\right], \text{ where}$$

$P_г$ – Gas pressure under the fuel rod cladding, MPa;

P_c – steady-state pressure in the measuring system after fuel rod cladding puncture, MPa;

V_c – the known volume of measuring system, cm^3,

$V_г$ – free volume in fuel rod, cm^3.

A free volume of fuel rod was measured by pressure decrease in the calibration chamber with the attached fuel rod that had been subjected to preliminary evacuation. The calibration functions derived in metrological certification of the facility were used for $V_г$ calculation. Gas volume was calculated by the following formula under the normal conditions:

$$V_н = \frac{P_г}{P_н} V_н, \text{ where } P_н = 0.1 \text{ MPa}$$

The error of gas pressure calculation in fuel rod made up ±7%.

Mass spectrometry was used for analysis of gas sampled during punching. The analysis was made in accordance with RD 95.86.90. Relative sensitivity factors of the recorded elements were determined based on the analysis of a specially certified mixture of pure gases. Sensitivity of the method that was used for analysis of oxygen, argon and carbon-dioxide gas content made up 0.001%. The error of volume fraction measurement was no more than 5% for helium, nitrogen, krypton and xenon.

The obtained data are shown in Table 6.

Data on gas release, which are taken from Tables 4-6 and represented as graphs (Fig.18) demonstrate a good correlation of results obtained with the help of two independent methods. More than that they prove the presence of asymmetry related to characteristics of radial fuel rods in spent VVER-440 fuel assemblies (burnup and gas release) as well as they point to the fact that fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 selected from FA 13626135 cover the whole range of existing differences.

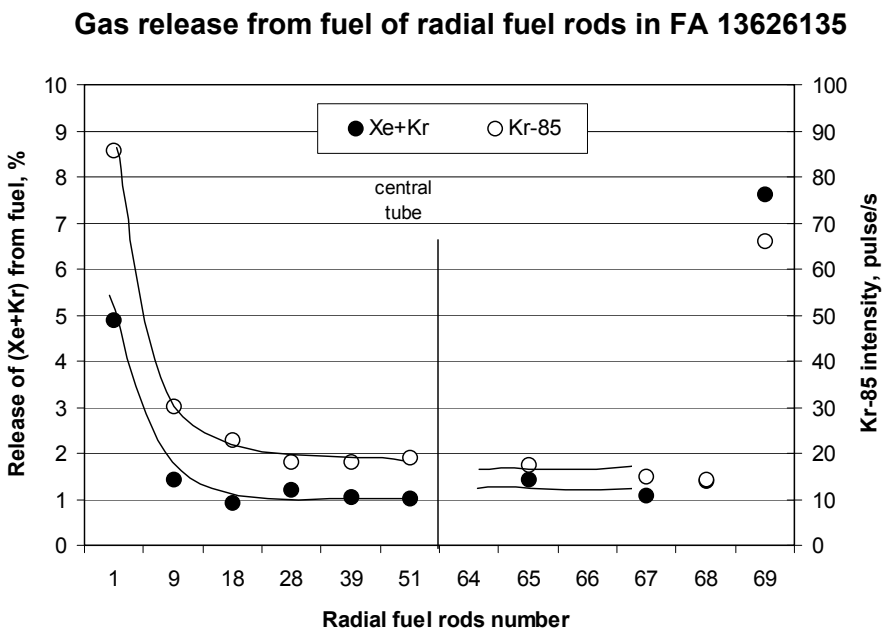


Fig.18

Table 6

Amount and composition of gases under the fuel rod claddings in FA 135

Fuel rod No.	Burnup MW*day/kgU	Free volume of fuel rod, cm^3	Gas volume under normal conditions cm^3	Gas pressure in fuel rod, MPa	Gas composition, volume %							Gas release from fuel %
					He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe	
1	41.6	15.5	164.0	1.06	68.00	<0.20	<0.06	<0.02	<0.02	3.36	28.34	4.88
9	38.6	16.1	134.4	0.83	89.20	<0.13	<0.04	<0.018	<0.014	1.07	9.52	1.43
18	37.0	16.4	128.4	0.78	92.98	<0.08	<0.007	<0.005	<0.002	0.71	6.21	0.93
28	36.1	15.2	120.8	0.79	90.30	<0.20	<0.09	<0.01	<0.0001	1.00	8.40	1.22
39	36.2	15.9	121.1	0.76	91.60	<0.18	<0.08	<0.002	<0.0001	0.85	7.30	1.06
51	36.9	16.1	131.4	0.82	92.40	<0.28	<0.10	<0.001	<0.0001	0.72	6.50	1.01
76	37.4	16.1	130.2	0.81	93.60	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	0.56	5.69	0.85
88	36.1	16.6	131.5	0.79	93.40	<0.18	<0.03	<0.02	<0.006	0.68	5.68	0.90
99	36.6	15.4	120.5	0.78	94.90	<0.22	<0.05	<0.001	<0.0001	0.50	4.33	0.62
109	37.2	16.5	134.1	0.81	94.10	<0.29	<0.09	<0.001	<0.0001	0.57	4.95	0.77
118	38.5	15.9	127.9	0.80	94.80	<0.12	<0.03	<0.002	<0.0001	0.52	4.52	0.65
120	42.8	14.9	169.0	1.13	65.20	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	4.14	30.50	5.31
126	41.4	15.5	136.8	0.88	83.40	<0.12	<0.05	<0.001	<0.0001	1.73	14.70	2.11
65	**36.40**	**15.5**	**134.2**	**0.88**	**90.13**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.95**	**8.89**	**1.44**
67	**37.60**	**15.2**	**125.7**	**0.84**	**91.75**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.80**	**7.43**	**1.09**
68	**39.3**	**15.7**	**132.7**	**0.86**	**89.49**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**1.00**	**9.49**	**1.41**
69	**42.20**	**15.4**	**174.8**	**1.15**	**53.35**	**<0.06**	**<0.01**	**<0.006**	**<0.003**	**3.79**	**42.78**	**7.62**
Max	42.8	16.6	174.8	1.2	94.9					4.1	42.8	7.6
Min	36.1	14.9	120.5	0.8	53.4					0.5	4.3	0.6
Average	38.3	15.8	136.3	0.9	86.4					1.4	12.1	2.0
Mean-square deviation	2.29	0.49	16.57	0.12	12.18					1.20	11.04	2.00

2.7. Fuel-to-cladding gap

A nondestructive method was used for fuel-to-cladding gap measurement. It is described in paper [9]. The principle of the method consists in radial loading of the cladding concurrently with measurement of its strain and applied load. Differential transformer and piezoelectric transducers were used for strain and applied load measurements. The error of fuel-to-cladding gap measurement makes up ±5% in this case.

Fig.19 shows a standard distribution of the average cladding diameter and fuel-to-cladding gap throughout the height of one fuel rod.

The analysis of the obtained results reveals that a fuel-to-cladding gap changes in the range of 50 to 90 μm in the region of the maximum diameter decrease of fuel rod 126.

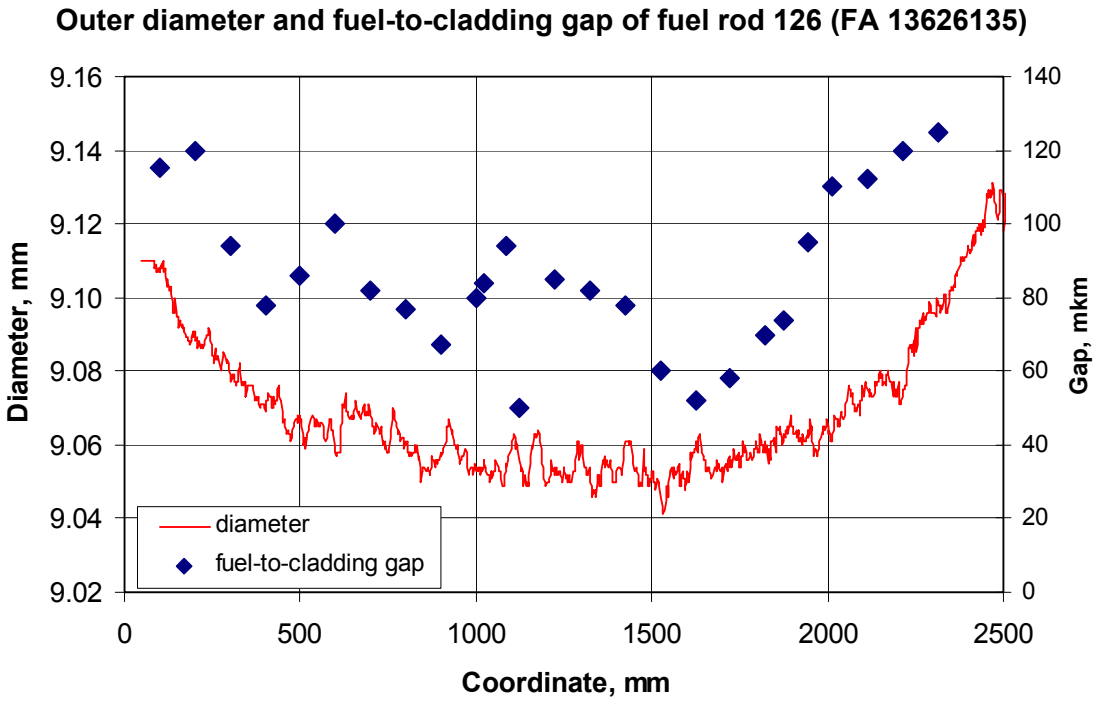


Fig.19

2.8. X-ray radiography

The “Roenten-40” machine was used for x-raying fuel rods with subsequent photographic recording of transmitted x-rays [10]. Fuel rods were examined with x-rays in the vertical position. Turnover and tapping at the reception shaft bottom with the end plug caused the displacement of fuel pellets. That means that fuel column isn’t coupled tightly with the cladding and it moves easily inside the fuel rod.

It is necessary to take all necessary steps to prevent uncontrolled losses of fuel pellets because the selected fuel rods will be subjected to cutting into specimens into a vertical position also in order to send them into a radiochemical laboratory.

Conclusion

The following nondestructive examinations of four fuel rods (FA 13626135) were carried out in the framework of Task 4 under Project 2670p:

- Visual inspection;
- Measurements of length and diameter in cladding tubes;
- Eddy current testing;
- Gamma spectrometry;
- Analysis of gas release from fuel;
- Measurement of fuel-to-cladding gap;
- X-ray radiography.

A correlation analysis of fuel rod parameters proved the proper selection of fuel rods No.No.65, 67, 68 and 69 to analyze the isotopic composition of VVER fuel in order to use it for fulfillment of Burnup Credit Tasks.

References:

1 . Selection methodology of fuel assemblies, fuel rods and specimens for nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction measurements. Interim Progress Report, Task No.1, VVER Burnup Credit Project (2670p). Dimitrovgrad, 2003.

2. Initial condition of VVER-440 operating assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles**.** Interim Progress Report, Task No.2, VVER Burnup Credit Project (2670p). Dimitrovgrad, 2003.

3. Irradiation history of VVER-440 operating assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Interim Progress Report, Task No.3, VVER Burnup Credit Project (2670p). Dimitrovgrad, 2003.

4. Visual and optical inspection of spent fuel assemblies and their component parts in hot cells. Testing technique, registration No.42-56, Dimitrovgrad, 1996.

5. Length measurement procedure of fuel rods. Registration No.74-96, Dimitrovgrad, 1996.

6. Measurement of cladding outer diameters in irradiated cylindrical fuel rods. Measurement procedure, registration No.M-17031, OMIT.

7. Eddy current testing procedure of irradiated VVER fuel rod claddings. SSC RF RIAR Register of techniques, M-17010 OIT.

8. Mass spectrometry analysis of gas composition in fuel rods. Registration No. M-17025.

9. "Measurement of “fuel-to-cladding gap” in fuel rod using compression method. Measurement procedure. Registration No. I-17174.

10. X-ray radiography procedure of irradiated fuel rods. Registration No. M-17004.

The Project Manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2003

Selection and preparation of samples for radiochemical analysis of VVER-440 fuel isotopic composition (FA No.13626135)

Interim progress report, Task No.5

VVER Burnup Credit (№ 2670p)

Part 5

Dimitrovgrad, 2003

Abstract

The present report includes 10 pages, 6 Figures and 1 Table.

Key words: VVER -440 fuel assembly (FA), spent fuel, fuel rods, burnup, radiochemical analysis, cutting of fuel rods, sampling and marking.

Described briefly here is the fuel sampling technology to perform radiochemical analysis for fission product and heavy atom continents. The cutting procedures of fuel rods selected from VVER-440 FA No.D26135 are also presented here. The report also includes brief characteristics of fuel samples and their marking.

Table of contents

Introduction……. 4

Fuel rod cutting procedures and fuel sample marking…….. 4

Conclusion……. 5

INTRODUCTION

It is necessary to take samples from spent VVER-440 FA No.135 to perform radiochemical analysis and mass-spectrometry in accordance with the statement of work.

Four fuel rods are selected for acquiring data on fuel burnup based on the following requirements:

- One fuel rod having a maximum burnup for FA No.135 under examination;
- One fuel rod having a minimum burnup value;
- Two other fuel rods have intermediate burnup values.

Based on the above-given approaches, four fuel rods were selected for examination and sampling:

- Fuel rod No.69 having a maximum fuel burnup of 49.3 MW·day/kgU;
- Fuel rod No.69 having a minimum burnup of 42.3 MW·day/kgU;
- Fuel rods No.67 and 68 having intermediate burnup values of 43.8 and 45.7 MW·day/kgU respectively.

The above-given fuel burnup values specify fuel burnup at a point that is in the region of maximum fission product accumulation in the selected fuel rods.

FUEL ROD CUTTING PROCEDURES AND FUEL SAMPLE MARKING

A jeweller's saw was used for cutting out specimens from fuel rods using a cutting machine. The coordinate of specimen taking out along the length of fuel rods was located with an error of ±1 mm. Specimens of length ~10 mm were cut out for radiochemical analysis.

Fig. 1 and 2 demonstrate the dismantling procedures of fuel rods for cutting out specimens. A location of specimens selected along fuel rods relative to the profile of fission product distribution throughout the height is shown in Fig. 3÷6. An individual equipment was used for measurement of fission product distribution throughout the height with due consideration for the increased exposition time in order to provide representative data on Eu-154 radiation intensity measurement.

The cutout fuel samples were placed in Al-containers whose covers had numbers. When a fuel sample is placed in the container, a cover is put down on it. It is screwed on to prevent the container opening. Any fall-out of fuel pellets from the

cladding or its individual fragments wasn't noticed during cutting. Table 1 shows marking of Al-containers with the corresponding fuel samples.

Table 1

Marking of fuel samples cutout from fuel rods of FA No. 13626135

Fuel rod No.	Coordinate from the lower part of fuel rod, mm	Number of Al-container with a fuel sample
65	100	182
	1000	21
	2150	69
67	1000	149
68	1000	162
69	100	135
	1000	79
	2150	57

CONCLUSION

Four fuel rods (No.No. 65, 67, 68 and 69) of FA No.135 were subjected to cutting in accordance with the earlier stated requirements. Eight fuel samples were taken for radiochemical analysis and mass-spectrometry. Specimens were cut out from fuel rods in accordance with the approved procedure and then they were placed in Al-containers with the applied numbers. After sampling all fuel samples were sent for dissolution and further radiochemical analysis and mass-spectrometry to examine fuel burnup and nuclide composition.

Cutting procedure of specimens from fuel rods No.No. 67 and 68 in FA No.135

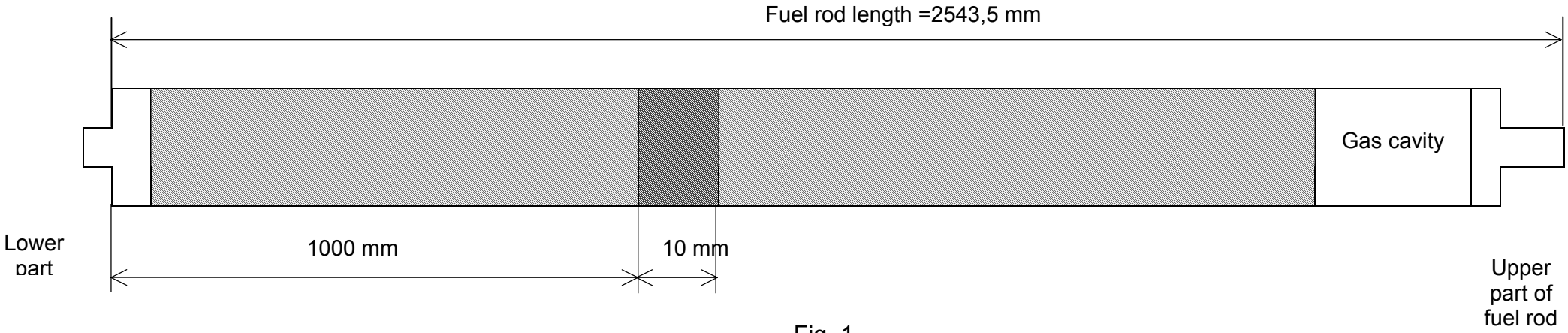


Fig. 1

Cutting procedure of specimens from fuel rods No.No. 65 and 69 in FA No.135

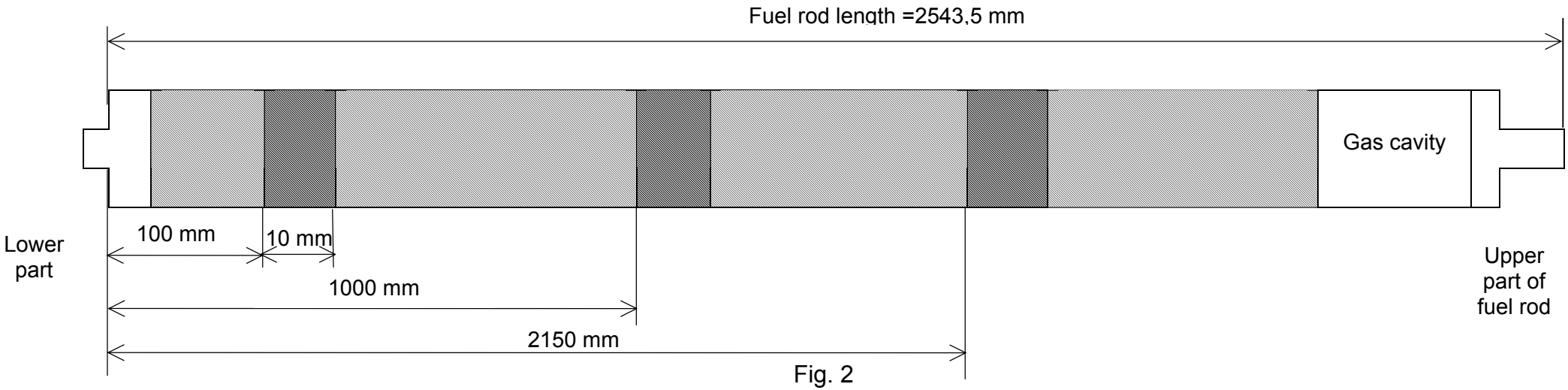


Fig. 2

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No. 65, VVER-440 FA 135

(Internal collimator– 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

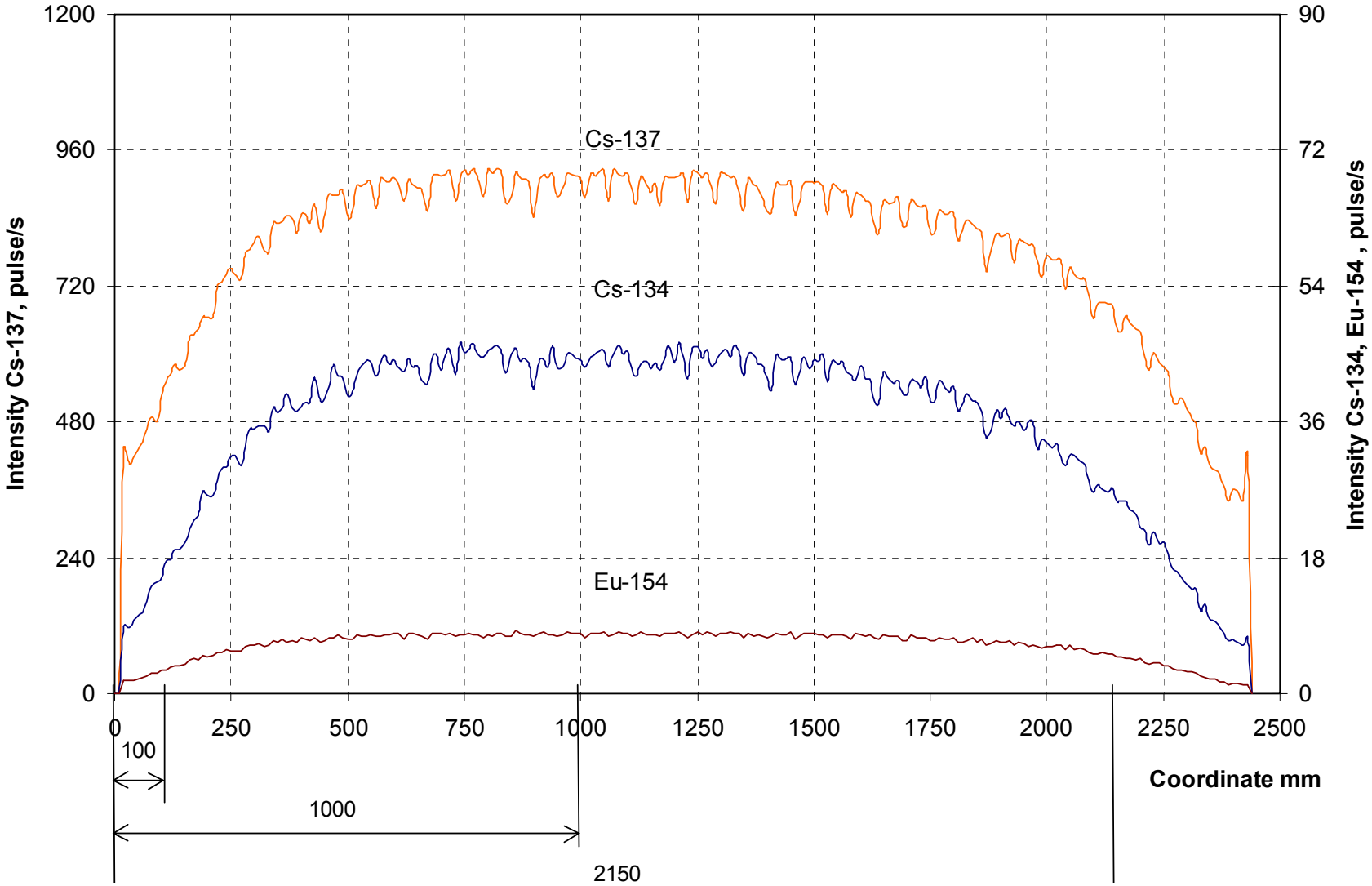


Fig. 3

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No. 67, VVER-440 FA 135

(Internal collimator – 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

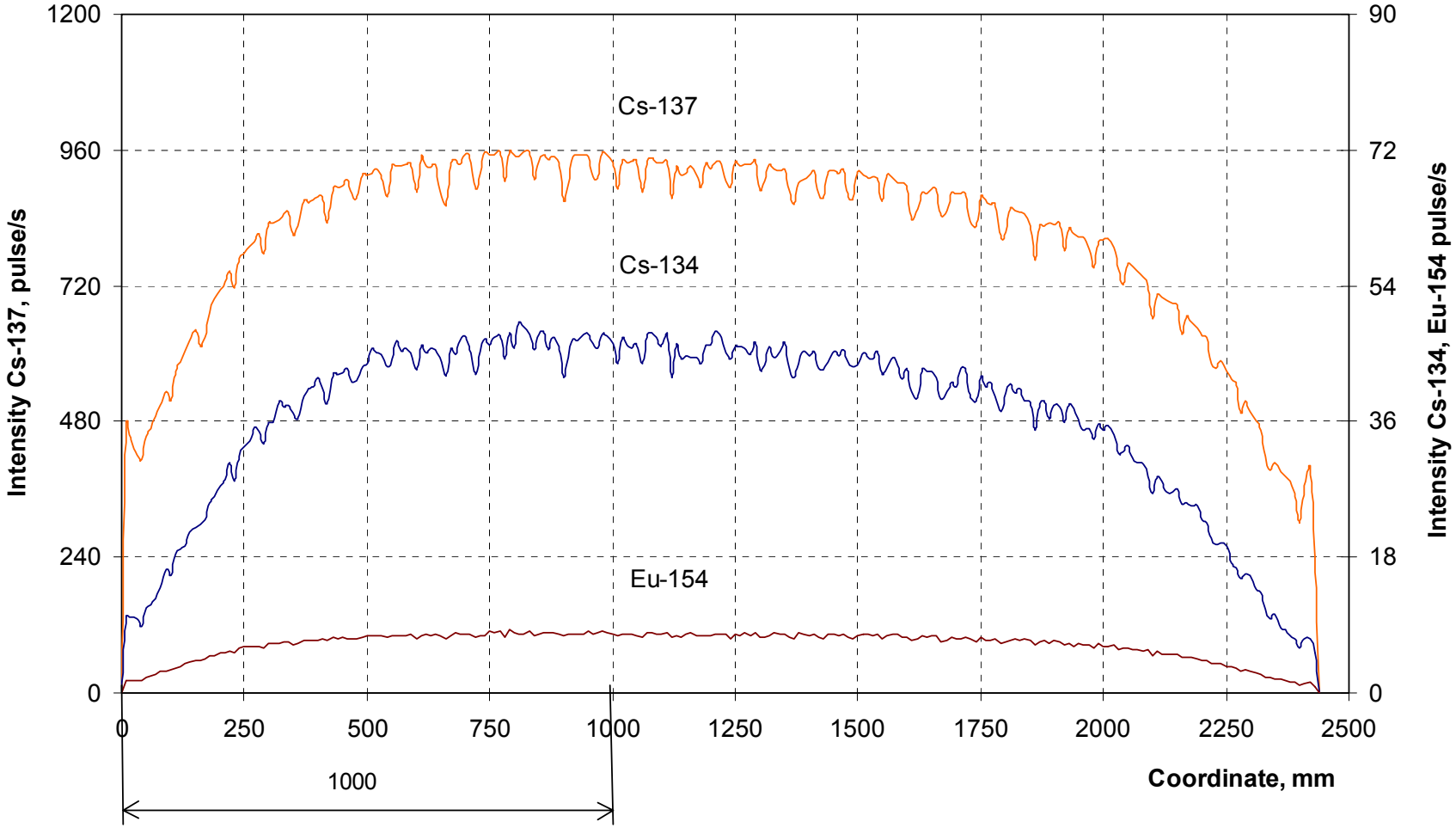


Fig. 4

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No. 68, VVER-440 FA 135

(Internal collimator – 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

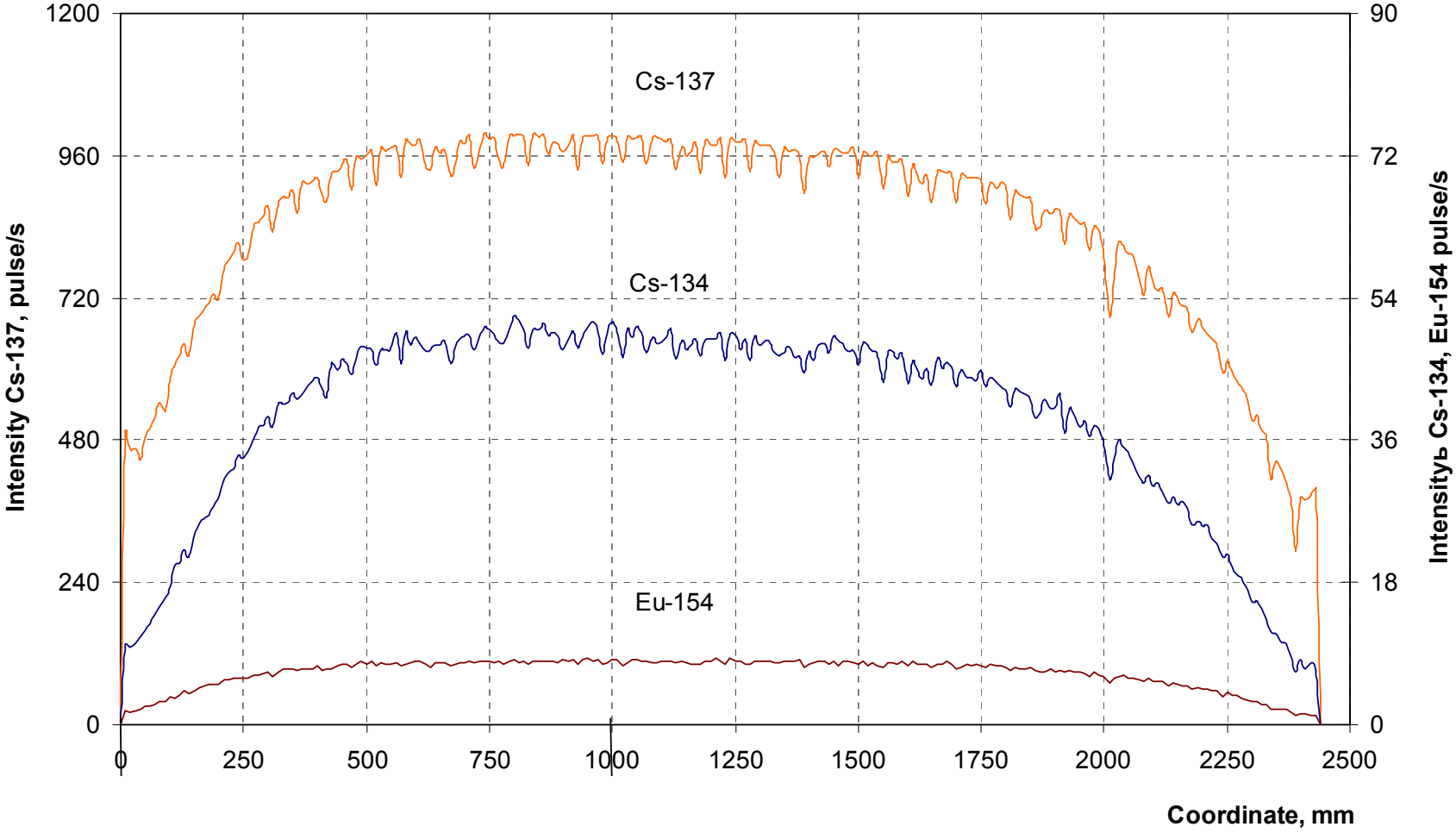


Fig. 5

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No. 69, VVER-440 FA 135

(Internal collimator – 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

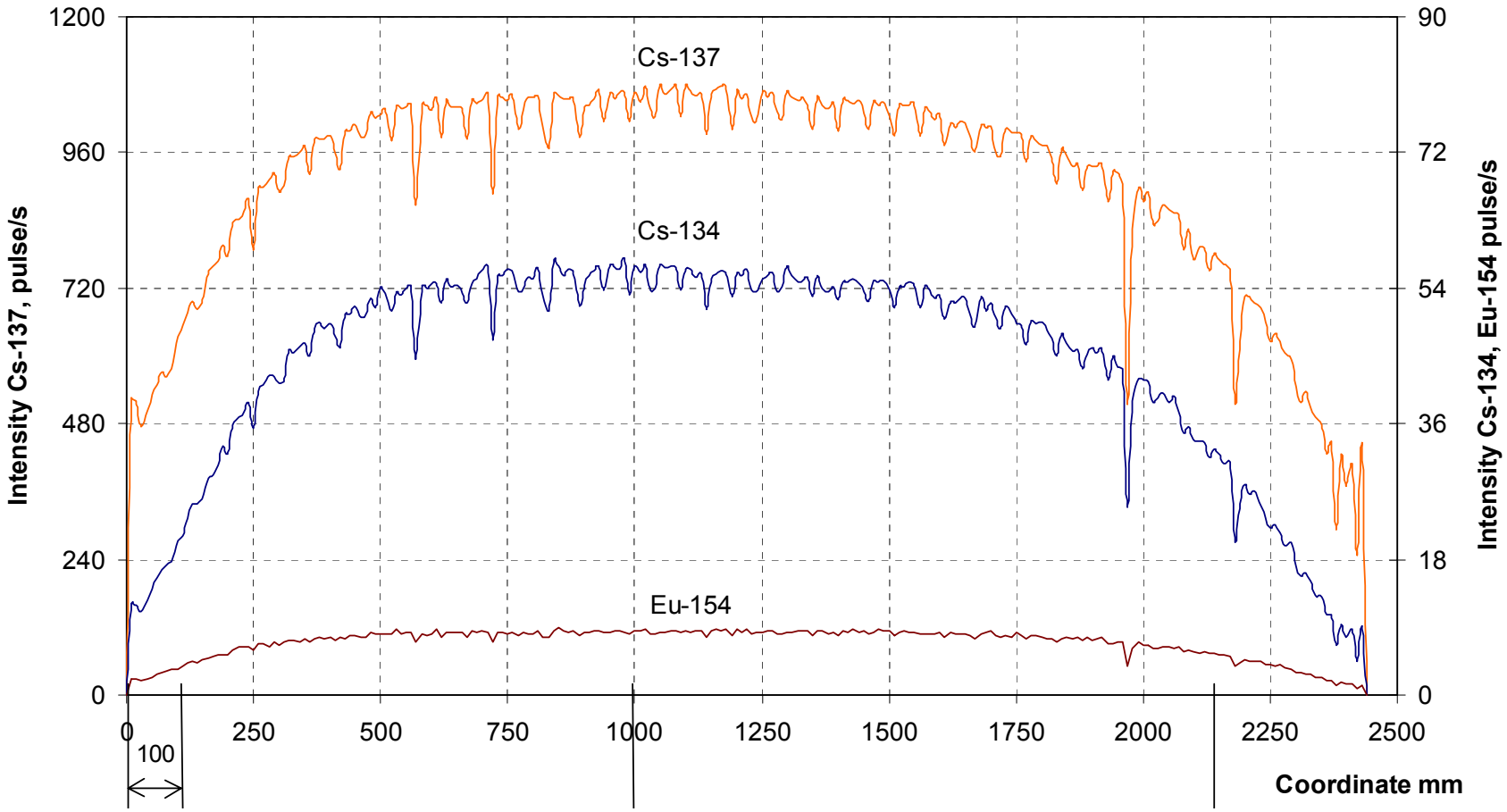


Fig. 6

Project Manager

_____A.V.Smirnov

"____"_____2004

“Radiochemical examination of nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction in specimens”

Interim Progress Report, Task No.6 (Part II)
VVER Burnup Credit Project (2670p)

Part 6

Dimitrovgrad, 2004

Abstract

The present report includes 17 pages, 13 tables and 6 references.

Key words: nuclear fuel, nuclide composition, burnup monitor, fuel burnup, chemical separation of elements, isotopic composition and mass-spectrometry.

The report presents the results of nuclide composition and fuel burnup fraction examination in 8 specimens of VVER-440 fuel assembly No. 26135 (Novovoronezh NPP, block 4).

Fuel burnup was calculated using method of heavy atoms and fission product accumulation. Fission products are used as burnup monitors in calculation of fuel burnup as to fission product accumulation: ^{137}Cs as well as total accumulation of $^{145+146}$Nd and ^{148}Nd.

TABLE OF CONTENTS

Introduction 5

1. Characteristics of spent fuel specimens 4

2. Radiochemical analysis of spent nuclear fuel specimens 5

2.1. Dissolution of cut out specimens 6

2.2. Radiochemical extraction of elements from fuel solution 6

2.3. Isotopic composition measurements of extracted elements 7

2.4. Mass fraction measurements of extracted elements 7

2.5. Data processing 9

3. Results of radiochemical analysis in spent fuel specimens **10**

Conclusion 17

References 17

INTRODUCTION

A comparison between the calculation results and experimental data is one of the stages in verification of computer codes intended for computation of neutron-physical characteristics of the reactors. As for fuel burnup calculation of the nuclear reactor, considered here is a comparison between the calculated and experimentally measured nuclide compositions of spent fuel.

A nuclide composition of the nuclear reactor fuel, its change in the course of fuel burnup and after unloading from the reactor is of great practical value. These data define physical processes in the reactor and issues related to safety, ecology, economics and strategy of the fuel cycle development.

The nuclide composition of the VVER-440 spent nuclear fuel was examined using the destructive radiochemical methods within the framework of Project 2670p, Task No.6. Uranium, plutonium, neptunium, americium, curium and some fission products (FP) isotopic compositions and contents were measured. Fuel burnup was calculated also. The nuclide composition of spent fuel was examined in 8 specimens of fuel rods No. 65, 67, 68 and 69 (VVER-440 spent fuel assembly No.26135, Novovoronezh NPP). Fuel characteristics were examined throughout the height of fuel column in fuel rods No. 65 and 69.

The present report presents the results of examinations.

1. Characteristics of spent fuel specimens

The initial characteristics of fuel are given in paper [1].

A manufacturer's data sheet for spent fuel assembly (SFA) and some other characteristics (schematic arrangement of fuel rods, SFA layout in the core of the 4th power unit of the Novovoronezh NPP and duration of fuel cycles) are included in paper [2].

The spent fuel assembly was operated from October 1987 up to July 1991 (1369 calendar days). There were 1109 effective days. A cooling period (the end of irradiation period– radiochemical analysis) made up 12.34 years (4518 days).

Spent fuel specimens with a length of ~ 10 mm each were cut out from fuel rods of SFA No.26135 in the RIAR hot cell. They were cut out in accordance with a cutting procedure that is shown in Fig. 1 and 2 [3].

Table 1.1 gives coordinates of cutting out and marking of specimens.

Table 1.1. Criteria of specimen selection

Fuel rod No.	Coordinate from the lower part of fuel rod, mm	Specimen number	^{235}U initial fuel enrichment, % mass
65	100	182	3.592
	1000	21	
	2150	69	
67	1000	149	3.585
68	1000	162	3.585
69	100	135	3.592
	1000	79	
	2151	57	

2. Radiochemical analysis of spent nuclear fuel specimens

The nuclide composition of spent nuclear fuel specimens was examined in the analytical and mass-spectrometric analysis laboratories of the RIAR. The examination includes the following stages:

2.1. Dissolution of the cut out specimens including control over fuel dissolution completeness;

2.2. Radiochemical extraction of U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs and Ce from fuel solution;

2.3. Isotopic composition measurements of the extracted elements;

2.4. Measurement of uranium, plutonium, neptunium, americium, neodymium, cerium and cesium mass fractions using isotopic dilution; measurements of Np-237, Cm and Ce-144 contents;

2.5. Data processing; calculation of fuel burnup based on fission products [5] and heavy atom method [6].

The performed examinations are described in the above-specified order.

2.1. Eight fuel specimens were dissolved. But dissolution conditions were changed as opposed to those ones described in [4]. These changes reduce to the following:

- Specimens were dissolved without hydrofluoric acid;
- Dissolution was performed by portions: 150 ml of the nitric acid solution at 8 mole/l concentration was introduced into the beaker flask with the fuel specimen under examination that was dissolved at 95-100 ^{o}C during 6 hours. Then solution was separated from the undissolved fuel residue and a new portion (150 ml) of 8 mole/l HNO_3 was introduced once again. Dissolution was performed for 6 hours under heating. When dissolution was over, the solution was separated from the undissolved fuel residue and it was combined with the solution resulted in the previous dissolution stage. The dissolution process was repeated 5-6 times up to the complete fuel dissolution with introduction of new nitric acid portions.

The combined solutions were evaporated to achieve a volume of 100-120 ml and prepared for radiochemical analysis.

To demonstrate the completeness of the dissolution process, 14-mole/l HNO_3 with an addition of 0.1-mole/l hydrofluoric acid was used for control dissolution. The dissolution took up 6 hours. The resulted solution was analyzed for uranium, plutonium, americium and some other fission products. Their residue was used for checking the completeness of the dissolution process. The above-described procedure enabled more than 99.9% dissolution of specimens.

2.2. Radiochemical extraction of U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs and Ce from fuel solution

Fractions of individual elements were extracted for subsequent α-, γ- and mass-spectrometer measurements in accordance with the scheme and procedures described in [4].

2.3. Isotopic composition of the extracted elements was measured using mass-spectrometer analysis. Mass-spectrometers MI 1201 supplied with personal computers in the ion current record channel were used for measurements. Measured values were ion current intensities resulted from isotopes of the analyzed elements. The sequence of operations for isotopic composition measurements was described in [4].

2.4. A mass fraction of element was measured using isotopic dilution that is followed with mass-spectrometer analysis of isotopic composition of an element extracted from the aliquot portion of fuel solution and complex tracer or a group of tracers [4]. Radiochemical procedures, which were used for extraction of elements from the resulted mixture, and mass-spectrometer analysis procedures are similar to those used for isotopic composition measurements of fuel elements. Characteristics of tracers are given in [4].

Curium. Plutonium. Alpha-spectrometry in combination with the mass-spectrometer measurement of Cm isotopic composition was used for measurement of ^{244}Cm and ^{238}Pu mass fractions.

Some fuel solution aliquot intended for α-radiometric measurements was spread on the substrate made of stainless steel in the geometry of reference spectrometric alpha-sources. Then it was dried out and calcined. Alpha-spectrometer provided with a semiconductor detector Si(Au) was used for α-spectrum and total $\Sigma\alpha$ measurements. A mass concentration of ^{244}Cm and plutonium isotopes in the fuel solution was calculated by a formula based on the results of measurements:

$$m_i = \frac{\gamma_i \cdot \Sigma\alpha_{счет}}{A_{уд.}}, \text{ µg/ml} \qquad (1)$$

where m_i – mass concentration of the i-isotope in fuel solution, µg/ml;

γ_i - contribution of the i-isotope activity in α-spectrum, relative units;

$\Sigma\alpha_{счет}$ – the total counting $\Sigma\alpha$ of fuel aliquot that is measured with α-spectrometer, Bq/ml;

$A_{specific}$ – specific activity of the i-isotope (tabulated value) in one ml of the analyzed fuel solution, Bq/μg.

The total mass of curium was calculated with due consideration for its isotopic composition that was measured with a mass-spectrometer.

The plutonium content was calculated based on the results of α-spectrometer measurements. It was thereafter used as assessed value to calculate volumes of fuel solution aliquots, which were taken for mass-spectrometer analysis.

Cesium. Cerium. Mass fraction of ^{137}Cs, ^{144}Ce and some other nuclides-fission products was measured using gamma-spectrometer without chemical extraction from the initial fuel solution. To take γ-measurements, 1 cm^3 of fuel solution was introduced into standard test tubes and made leak-tight. Measurements were taken with the DGDK-50 γ-spectrometer provided with the semiconductor detector Ge(Li) in the geometry of reference spectrometric alpha-sources.

The A_i nuclide activity (Bq/ml) in the initial fuel solution was calculated by a formula:

$$A_i = \frac{S_k \cdot e^{\lambda_i t}}{\eta_{\gamma k} \cdot \varepsilon_{\gamma k} \cdot V \cdot \chi} \qquad (2)$$

where S_k - the k-photopeak area of the i-isotope having energy $E_{\gamma k}$, pulse/s;

λ_i - decay constant of the i-isotope, s^{-1};

t – the time interval between a sample taking and activity measurement, s;

$\eta_{\gamma k}$ - quantum yield of the k-gamma line of isotope;

$\varepsilon_{\gamma k}$ - gamma-spectrum efficiency for the k gamma-line in the specified geometry of radiation source location;

V – volume of fuel solution sample, ml;

χ - chemical yield of the isotope.

A mass fraction of the Ce element was calculated with allowance made for its isotopic composition. The data obtained for ^{137}Cs were used as assessed ones to exclude crude errors in calculation of the Cs mass using isotopic dilution.

Neptunium. The Np mass fraction was measured using spectrophotometry in accordance with technique [4] when a wavelength was 980 μm.

2.5. The computer codes developed on the basis of computing algorithms were used in calculation of the content and isotopic composition of U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce and fuel burnup.

The software used for computation of the isotopic composition and mass fraction errors of individual elements and isotopes in uranium were based on the rules of statistical manipulation of mathematical expressions. Tables contain the mass fraction values of isotopes and indicate global error in brackets for a confidence probability of P=0.95.

One or two loads of the extracted element were made for the mass-spectrometer measurements. The statistical analysis on the basis of Dickson's criterion was made in data processing of each set of measurements with a confidence probability of P=0.95. The results of measurements for the standard uranium samples revealed that error of isotopic ratios depended on the random component only. As for the discrimination factor (systematic individual error) effect, it can be neglected.

3. Results of radiochemical analysis in spent fuel specimens

The experimental data obtained in the course of this experiment are listed in Tables 3.1 – 3.11 and provided with corresponding comments. The results of radiochemical analysis are given by the time of irradiation completion.

Table 3.12 indicates burnup values of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission portions in the total burnup. They were calculated in accordance with method of heavy atoms. This table also contains calculated and experimental values of neutron flux and fluence. The following calculated values of effective yields of burnup monitors were used in calculation of fuel burnup: $Y_{effec.137Cs}$ = 6.32 %; $Y_{effec.148Nd}$ = 1.75 %; $Y_{effec.145+146Nd}$= 6.43 %.

Table 3.1. Uranium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0.020(5)*	0.81(3)	0.55(3)	98.62(4)
149	0.020(5)	0.74(1)	0.56(1)	98.68(2)
162	0.020(5)	0.65(2)	0.57(2)	98.76(5)
79	0.010(5)	0.44(2)	0.56(2)	98.99(5)
57	0.011(5)	1.00(5)	0.51(2)	98.48(6)
135	0.025(4)	1.34(2)	0.46(1)	98.18(2)
182	0.014(4)	1.66(2)	0.420(16)	97.91(3)
69	0.018(5)	1.23(3)	0.49(1)	98.26(3)

* the numbers enclosed in brackets here and further (for all the Tables) indicate the global error range of the measurement result for a confidence probability of P=0.95 and refer to the last significant digits.

Table 3.2. Mass fraction of uranium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0.189(47)	7.65(28)	5.19(28)	932.05(37)
149	0.189(47)	6.989(94)	5.289(94)	931.99(38)
162	0.188(46)	6.12(19)	5.37(19)	930.45(35)
79	0.094(68)	4.13(19)	5.26(19)	930.36(35)
57	0.105(47)	9.52(47)	4.85(19)	937.40(40)
135	0.240(38)	12.87(19)	4.419(96)	943.05(42)
182	0.135(36)	16.06(19)	4.06(19)	945.59(42)
69	0.172(46)	11.77(28)	4.688(95)	940.86(42)

Table 3.3. Plutonium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	1.95(19)	54.11(11)	23.04(8)	14.65(12)	6.25(4)
149	1.91(19)	52.36(8)	23.95(8)	14.82(5)	6.96(8)
162	2.35(9)	50.51(11)	24.46(9)	14.89(10)	7.79(10)
79	2.82(10)	49.57(11)	25.92(9)	13.42(10)	8.27(10)
57	1.55(9)	56.84(13)	22.29(14)	14.06(11)	5.26(10)
135	1.02(9)	61.30(9)	21.72(14)	12.34(6)	3.62(5)
182	0.86(9)	67.63(11)	18.72(9)	10.59(10)	2.20(10)
69	1.35(10)	60.44(11)	21.27(9)	13.04(10)	3.90(10)

Table 3.4. Mass fraction of plutonium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	0.227(24)	6.308(14)	2.686(10)	1.708(12)	0.728(5)
149	0.228(23)	6.246(9)	2.857(9)	1.768(20)	0.830(9)
162	0.280(28)	6.019(8)	2.915(12)	1.775(20)	0.928(12)
79	0.329(33)	5.785(7)	3.025(13)	1.566(12)	0.965(14)
57	0.164(16)	6.019(8)	2.361(15)	1.489(12)	0.557(9)
135	0.0884(88)	5.315(10)	1.883(16)	1.070(5)	0.314(4)
182	0.0733(73)	5.769(9)	1.597(8)	0.903(6)	0.1876(85)
69	0.143(14)	6.408(11)	2.255(13)	1.382(12)	0.413(11)

Table 3.5. Isotopic composition of americium and curium (mass %)

Specimen No.	^{241}Am	^{242m}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm
21	30.96(10)	0.69 (1)	68.34(10)	93.3(46)	6.16(12)	0.54(7)
149	31.98(8)	0.52(1)	67.51(8)	95.4(47)	4.11(11)	0.49(8)
162	36.73(12)	0.20(5)	63.07(12)	94.0(47)	5.55(11)	0.45(8)
79	37.84(10)	0.24 (1)	61.92(10)	94.4(47)	5.28(11)	0.32(8)
57	34.84(5)	0.660(9)	64.50(8)	97.3(48)	2.7(5)	-
135	47.53(7)	1.060(9)	51.41(7)	95.82(48)	3.69(6)	0.49(7)
182	63.74(12)	1.480(7)	34.78(12)	96.16(48)	3.56(7)	0.28(4)
69	40.53(10)	0.97(2)	58.50(10)	93.7(47)	5.75(11)	0.55(6)

Table 3.6. Mass fraction of transplutonium elements isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{237}Np	^{241}Am	^{242m}Am ·10^{3}	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm ·10^{2}	^{246}Cm ·10^{4}
21	1.43 (10)	0.0650 (17)	1.45 (10)	0.1435 (87)	0.0718 (36)	0.473 (9)	4.2 (4)
149	1.46 (10)	0.0672 (14)	1.09 (10)	0.1418 (90)	0.0877 (44)	0.378 (7)	4.5 (4)
162	1.49 (10)	0.0918 (61)	0.50 (6)	0.1576 (63)	0.1222 (61)	0.722 (14)	5.8 (6)
79	1.59 (11)	0.1627 (81)	1.03 (10)	0.266 (13)	0.1888 (94)	1.056 (21)	6.4 (6)
57	1.110 (78)	0.0557 (28)	1.05 (8)	0.1032 (52)	0.0486 (24)	0.135 (3)	-
135	0.780 (56)	0.0380 (19)	0.85 (5)	0.0412 (20)	0.01348 (67)	0.052 (1)	0.68 (7)
182	0.710 (50)	0.0446 (27)	1.04 (10)	0.0243 (12)	0.00675 (33)	0.0250 (5)	0.21 (2)
69	1.030 (71)	0.0486 (24)	1.16 (10)	0.0702 (42)	0.0224 (11)	0.138 (3)	1.32 (13)

Table 3.7. Neodymium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0.66 (2)	21.65 (8)	23.40 (8)	20.15 (9)	18.42 (12)	10.61 (12)	5.12 (10)
149	0.70 (1)	21.31 (16)	23.75 (13)	20.06 (14)	18.48 (10)	10.60 (13)	5.10 (10)
162	0.72 (1)	20.85 (9)	24.18 (9)	19.93 (6)	18.59 (7)	10.61 (11)	5.12 (10)
79	0.77 (1)	19.76 (9)	25.58 (13)	19.64 (10)	18.86 (10)	10.48 (12)	4.91 (10)
57	0.54 (10)	22.66 (12)	22.80 (8)	20.38 (10)	18.22 (7)	10.49 (11)	4.91 (10)
135	0.48 (1)	24.18 (11)	21.43 (10)	20.64 (12)	17.98 (16)	10.43 (12)	4.86 (10)
182	0.32 (1)	25.53 (9)	20.26 (9)	20.90 (6)	17.78 (7)	10.41 (13)	4.80 (10)
69	0.39 (1)	23.70 (9)	21.79 (13)	20.58 (10)	18.08 (10)	10.53 (11)	4.93 (9)

Table 3.8. Mass fraction of neodymium (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0.0294 (9)	0.965 (9)	1.043 (10)	0.898 (9)	0.821 (8)	0.473 (5)	0.228 (2)
149	0.0318 (9)	0.969 (9)	1.080 (11)	0.912 (9)	0.840 (8)	0.482 (5)	0.232 (2)
162	0.0339 (9)	0.981 (9)	1.137 (11)	0.937 (9)	0.874 (8)	0.499 (5)	0.241 (2)
79	0.0386 (9)	0.992 (10)	1.284 (13)	0.986 (9)	0.947 (9)	0.526 (5)	0.246 (2)
57	0.0206 (6)	0.864 (8)	0.869 (8)	0.777 (8)	0.695 (7)	0.400 (4)	0.187 (2)
135	0.0155 (5)	0.779 (8)	0.690 (7)	0.665 (6)	0.579 (6)	0.336 (3)	0.1570 (15)
182	0.00775 (23)	0.618 (6)	0.490 (5)	0.506 (5)	0.430 (4)	0.252 (2)	0.116 (1)
69	0.0131 (5)	0.797 (8)	0.733 (7)	0.692 (7)	0.608 (6)	0.354 (3)	0.166 (2)

Table 3.9. Isotopic composition of cesium and cerium (mass %)

Specimen No.	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	38.93 (14)	3.43 (10)	13.96 (11)	43.68 (18)	43,00 (16)	39,28 (16)	17,71 (10)
149	38.74 (19)	4.25 (10)	13.36 (12)	43.66 (14)	43,01 (45)	39,28 (45)	17,71 (5)
162	39.19 (9)	3.42 (5)	12.79 (7)	44.61 (11)	43,02 (22)	39,29 (22)	17,69 (5)
79	39.37 (10)	3.41 (5)	11.99 (7)	45.23 (11)	42,89 (22)	39,31 (22)	17,80 (5)
57	39.66 (23)	4.27 (5)	14.21 (20)	41.86 (18)	42,89 (20)	39,31 (22)	17,80 (10)
135	39.43 (23)	5.18 (5)	15.17 (20)	40.22 (11)	42,81 (20)	39,27 (22)	17,92 (10)
182	38.63 (9)	4.96 (5)	17.70 (7)	38.71 (11)	42,77 (22)	39,26 (22)	17,97 (10)
69	37.97 (10)	5.97 (5)	15.74 (7)	40.31 (11)	42,89 (22)	39,29 (22)	17,82 (5)

Table 3.10. Mass fractions of cesium and cerium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	1.328 (46)	0.117 (6)	0.476 (19)	1.490 (50)	1.540 (50)	1.407 (50)	0.634 (51)
149	1.416 (50)	0.155 (7)	0.488 (19)	1.596 (50)	1.558 (50)	1.423 (50)	0.642 (52)
162	1.471 (51)	0.128 (6)	0.480 (18)	1.675 (50)	1.640 (51)	1.498 (60)	0.674 (55)
79	1.462 (50)	0.127 (6)	0.445 (16)	1.680 (67)	1.729 (60)	1.585 (61)	0.718 (56)
57	1.253 (43)	0.135 (6)	0.449 (16)	1.323 (53)	1.285 (53)	1.178 (50)	0.533 (50)
135	1.078 (38)	0.142 (7)	0.415 (17)	1.100 (44)	1.095 (44)	1.004 (50)	0.458 (37)
182	0.848 (34)	0.109 (5)	0.389 (16)	0.850 (40)	0.832 (40)	0.764 (38)	0.350 (35)
69	1.110 (36)	0.174 (8)	0.460 (17)	1.178 (47)	1.149 (46)	1.053 (53)	0.477 (38)

Table 3.11. Fuel burnup (kg FP/т U$_{initial}$)

Specimen No.	$^{145+146}$Nd	^{148}Nd	^{137}Cs	Weighted average
21	41.5 (12)	41.55 (83)	41.6 (15)	41.5 (15)
149	41.6 (14)	42.02 (84)	42.1 (16)	41.9 (15)
162	43.8 (15)	44.27 (88)	44.2 (16)	44.2 (14)
79	46.2 (16)	46.24 (94)	46.6 (17)	46.3 (14)
57	36.2 (12)	36.08 (72)	36.4 (14)	36.2 (12)
135	30.25 (91)	30.06 (60)	29.20 (89)	29.90 (91)
182	23.12 (76)	22.65 (45)	23.23 (77)	22.86 (72)
69	31.4 (11)	31.11 (62)	31.9 (11)	31.32 (98)

Table 3.12. Burnup of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission fractions in total burnup

Parameter	Fuel rod No.65 Specimen No. 21		Fuel rod No.67 Specimen No.149		Fuel rod No.68 Specimen No. 62		Fuel rod No.69 Specimen No. 79	
	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %
F_5	22.07	53.66	22.55	53.71	23.22	53.03	25.05	54.51
F_8	4.52	11.00	4.62	11.00	4.82	11.02	5.05	11.00
F_9	12.67	30.82	12.83	30.56	13.52	30.89	13.55	29.48
F_1	1.86	4.52	1.98	4.71	2.21	5.06	2.30	5.01
F_T	41.12		41.98		43.77		45.95	
Fluence, cm^{-2}, 10^{21}	2.70		2.86		3.09		3.995	
Flux, 10^{13} cm^{-2} s^{-1}	2.819		2.986		3.229		3.828	
$F_{weighted}$ FP, kg/t U	41.5		41.9		44.2		46.3	

Table 3.13. Burnup of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission fractions in total burnup

Parameter	Fuel rod No.69 Specimen No. 57		Fuel rod No.69 Specimen No.135		Fuel rod No.65 Specimen No.182		Fuel rod No.65 Specimen No. 69	
	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %
F_5	20.75	57.78	17.99	62.41	15.31	64.50	18.75	58.74
F_8	3.92	10.92	3.12	10.83	2.56	10.79	3.48	10.90
F_9	9.91	27.60	6.96	24.15	5.42	22.82	8.70	27.27
F_1	1.33	3.70	0.75	2.61	0.45	1.88	0.98	3.08
F_T	35.91		28.82		23.73		31.92	
Fluence, cm^{-2}, 10^{21}	2.328		1.794		1.396		1.936	
Flux, 10^{13} cm^{-2} s^{-1}	2.429		1.872		1.457		2.021	
$F_{weighted}$ FP, kg/t U	36.2		29.90		22.86		31.32	

Conclusion

The present report presents the calculation results of isotopic composition and U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, and Ce contents. Calculated was also burnup in the VVER-440 spent fuel specimens using heavy atom method and fission products. A quantitative analysis for ^{237}Np content was carried out on these specimens.

Analysis for measurement of Eu, Sm, Gd, ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag, ^{101}Ru, ^{103}Rh, ^{105,108}Pd nuclides contents are going to be finished. The final results of analysis will be presented in the final report.

References

1. Selection methodology of fuel assemblies, fuel rods and specimens for measurements of nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup. Interim Progress Report, Task No.1. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.
2. Initial condition of VVER-440 working assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Interim Progress Report, Task 2. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.
3. Selection and preparation of samples for radiochemical analysis of VVER-440 fuel isotopic composition (FA No.13626135). Interim Progress Report, Task 5. Burnup Credit Project (2670p), 2003.
4. Techniques and equipment to determine nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction in fuel samples. Interim Progress Report, Task 6. Burnup Credit Project (2670p), 2003.
5. Spent nuclear fuel of thermal nuclear reactors. Fuel burnup measurement for fission product accumulation using mass-spectrometry. Report-Technique. Registration number 0-4004, RIAR, Dimitrovgrad, 1990.
6. ASTM E-244-80 Standart Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Mass Spectrometric Method).

Project Manager

_____A.V.Smirnov
"____"_____2004

Chemical Assays of Irradiated VVER Fuel For Use In Burnup Credit

Final report, Task No.7

VVER Burnup Credit (No. 2670p)

Part 7

Dimitrovgrad, 2004 г.

Abstract

The present report includes 53 pages, 29 figures, 34 tables and 11 references.

Key words: VVER Burnup Credit Project, spent fuel, VVER-440 fuel assembly, nondestructive methods, burnup, fission products, nuclide composition, radiochemical analysis, isotopic mass, computer codes.

The present report describes the selection methodology for the VVER-440 fuel assemblies, fuel rods and fuel specimens to perform a radiochemical analysis and mass-spectrometer measurements in order to obtain data on burnup and nuclide composition for their usage in the burnup credit-related tasks. Presented here is the initial condition of the VVER-440 working assembly, initial nuclide and chemical compositions of fuel, parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole.

The calculated data on the burnup distribution throughout the height of fuel rods, power release distribution at the FA bundle cross-section, fast neutron fluence on the FR claddings were obtained using the BIPR-7A and PERMAK-A computer codes. The report presents the experimental data on the isotope composition, heavy atom and fission product contents for fuel specimens at different burnup level. Given here is also the analytic dependence of the nuclide composition change in fuel specimens within a burnup range of ~22 kg/tU_{inital} up to ~45.5 kg/tU_{iitial}.

Contents

ABSTRACT **2**

INTRODUCTION **4**

1. EXPLANATION OF SELECTION METHODOLOGY FOR FUEL ASSEMBLIES, FUEL RODS AND SAMPLES **6**

2. BRIEF DESCRIPTION OF INITIAL STATE OF FA NO.13626135 FUEL AND FUEL RODS **10**

2.1. DESCRIPTION OF INITIAL FUEL PARAMETERS 10
2.2. PARAMETERS OF FUEL RODS 11
2.3. FUEL ASSEMBLY NO.13626135 PARAMETERS 13

3. NEUTRON-PHYSICAL CALCULATION OF FA NO.13626135 IRRADIATION PARAMETERS **15**

4. ANALYSIS OF NONDESTRUCTIVE POST-IRRADIATION EXAMINATION RESULTS OF FA NO.13626135 FUEL RODS **19**

5. CHARACTERISTICS OF SPECIMENS SELECTED FOR ANALYSIS **28**

6. NUCLIDE COMPOSITION ANALYSIS AND FUEL BURNUP FRACTION MEASUREMENTS IN FUEL SPECIMENS **32**

7. ANALYSIS OF NUCLIDE COMPOSITION MEASUREMENT RESULTS **46**

CONCLUSION **51**

REFERENCES **53**

Introduction

It is important to point out that VVER-440 is the main type of light water reactors operated at the nuclear power plants (NPP) of Eastern Europe and Finland. The improvement of performance capabilities and economic indexes of these particular power units at the expense of an increase in number of fuel cycles or their duration is an important task that of scientific and practical importance. In this connection the examination of spent fuel (SF) properties and isotope compositions is an important stage for both fuel cycle itself (fabrication, operation, transportation, storage, disassembling and reprocessing of fuel assemblies) and neutron-physical calculations of the VVER-type reactor cores and their reliability improvement. The known of fuel isotope composition and dynamics of its change in the course of operation will allow for a exact estimation of linear powers in fuel rods (FR) and fuel column temperature as well as calculation of burnup and heavy atom content in fuel discharged from the reactor core.

The change in isotope composition of heavy atoms and accumulation of fission products (FP) with high thermal and resonance neutron-absorption cross-sections results in the SF reactivity change. Table 1 presents nuclides that should be subjected to the quantitative analysis in order to estimate fuel reactivity.

Table 1

Nuclide list for Chemical Assays (total: 45 nuclides)

Nuclide	Error	Nuclide	Error
U^{234}	5-10%	Sm^{147}	0.5-2%
U^{235}	0.5-2%	Sm^{149}	2-4%
U^{236}	0.5-5%	Sm^{150}	0.5-2%
U^{238}	0.3-0.5%	Sm^{151}	0.5-2%
Np^{237}	3-10%	Sm^{152}	0.5-2%
Pu^{238}	3-10%	Nd^{143}	0.5-1%
Pu^{239}	0.2-0.5%	Nd^{144}	0.5-1%
Pu^{240}	0.2-0.5%	Nd^{145}	0.5-1%
Pu^{241}	0.2-0.5%	Nd^{146}	0.5-1%
Pu^{242}	0.2-0.5%	Nd^{148}	0.5-1%
Pu^{244}	50%	Nd^{150}	0.5-1%
Eu^{153}	0.5-2%	Tc^{99}	10-20%
Eu^{151}	2-5%	Mo^{95}	10-20%
Eu^{154}	2-5%	Ru^{101}	10-20%
		Rh^{103}	10-20%
Cs^{133}	2-5%	Ag^{109}	15-30%
Cs^{135}	2-5%	Gd^{155}	5-10%
Cs^{137}	2-4%	Ce^{144}	5-10%

Table 1 (continuation)

Nuclide	Error	Nuclide	Error
Cm242	3-7%	Pd^{105}	10-20%
Cm^{243}	30-50%	Pd^{108}	10-20%
Cm^{244}	3-6%		
Cm^{245}	3-10%	Am^{241}	2-5%
Cm^{246}	5-15%	Am^{242}	2-10%
		Am^{243}	2-5%

It might be well to point out that a special attention is currently being focused on the above-given parameters of irradiated fuel going under the term of “burnup credit”. This is mainly due to nuclear safety ensuring when the spent fuel management acquires a large scale basis. As an example let us refer to activities related to packing and disposition of SFA in the storage pools of nuclear power plants, SFA disposition in a special casks of temporary storage as well as issues related to disposition of fuel assemblies with different burnup level, initial enrichment, burnable poisons etc. in the storage pools. That’s why an optimal overcoming of the above-mentioned problems can be economically efficient, will allow for safety enhancement in spent nuclear fuel management and environmental effect reduction. The use of burnup credit is one of the possible ways to improve compactness of SF packages for management after operation.

It is required to verify the computer codes using fuel characteristics, operation history and data on distribution of neutron absorbing and neutron radiating nuclides along the whole length of fuel assembly (a bench-mark experiment) in order to consider possible ways of compactness improvement for SF packages.

Currently a great number of the VVER-440 fuel assemblies at a burnup of ~40MW·day/kgU and initial enrichment of 3.6 % U-235 are placed for temporary storage in NPP storage pools in different countries. That’s why FA No.13626135 operated in the fourth power unit of Novovoronezh NPP up to an average burnup of ~38.5 MW·day/kgU has been chosen as an examination object.

The main objective of this examination is to study and examine the initial condition, operation history, to describe the condition after operation and measure burnup distribution and nuclide contents (neutron absorbing and neutron radiating ones) in FA No.13626135 fuel.

1. Explanation of selection methodology for fuel assemblies, fuel rods and samples

A major share of electric power is produced at the nuclear power plants operating the VVER-440 reactors in the Eastern Europe, FSU countries and Russia. A lot of spent fuel assemblies appeared in the course of their operation. Their handling results in considerable expenditures for the nuclear power industry in the countries operating the VVER-440 power units. Fuel assemblies at 3.6 % enrichment U-235, which had been operated up to an average burnup of ~40 MW·day/kg$U_{initial}$ in the course of 3-4 fuel cycles, were used at the first stage of the VVER-440 fuel cycle. Spent fuel assemblies with the above-given characteristics represent a massive accumulation of nuclear fuel that is stored in the NPP storage pools. More than that a spent fuel assembly should be selected among the available VVER-440 spent fuel assemblies having been subjected to postreactor inspection due to the fact that the "VVER Burnup Credit" Project make provision for FR examination and fuel sampling for radiochemical analysis. From the above reasoning, fuel rods of FA No.13626135 operated up to an average burnup of 38.5MW·day/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP were selected for examination [1].

Operating fuel assembly No.13626135 was fabricated in June, 1987 in accordance with assembly drawing 440.01.000-27 and specifications TU95.598-79.

Table 1.1 shows the main design characteristics of fuel assemblies and fuel rods. Arrangement of fuel rods in the spacer grid cells is shown in Fig.1.1. One batch of fuel with the average density of 10.5g/cm^3 was used for fabrication of fuel rods in fuel assembly No.13626135.

Table 1.1

Initial data on fuel assembly No.13626135

Parameter	Value
1. Fuel assembly design	440.01.000-27
2. Specifications	ТУ95.598-79
3. Fuel assembly wrapper design	445.01.001-06
4. Wrapper tube design, mm: Length Across flats dimension	 2725 144.2
5. Fuel rod bundle design	440.01.020-27
6. Fuel rod design	440.00.020-02
7. Specifications for fuel rods	440.00.010ТУ
8. Nominal length of fuel rod, mm	2558.5
9. Outer diameter of fuel rod	9.1
10. Inner diameter of cladding, mm	$7.72^{+0.08}$
11. Fuel pellet: Outer diameter, mm Central hole diameter, mm	 $7.60_{-0.07}$ $1.2^{+0.8}$

Table 1.1 (continuation)

Parameter	Value
Height, mm	8-14
12. Fuel column length, mm	2420±10
13. Fuel column mass, g	1087±22
14. Helium pressure in fuel rod, atm	5-7

Schematic arrangement of fuel rods in fuel assembly 13626135

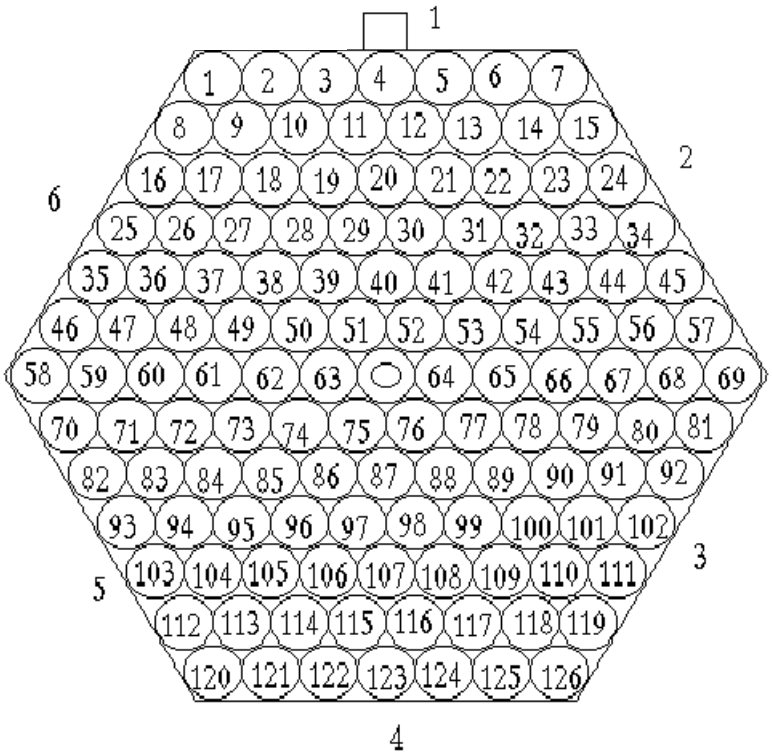


Fig.1.1

Fuel assembly 13626135 was operated as a member of 15-18 core loads in the forth power unit of Novovoronezh NPP. Table 1.2 and Fig.1.2 show fuel cycle data and position of the fuel assembly in the reactor core.

Table 1.2

Duration of fuel cycles and fuel assembly 13626135 movement diagram

Fuel cycle No.	15(1)	16(2)	17(3)	18(4)
Beginning End	10.87 08.88	10.88 12.89	01.90 05.90	07.90 7.91
Effective days	296	389.8	98.2	325.1
Average burnup in a fuel cycle, MWd/kgU	11.0	14.5	3.5	9.5
Average burnup at the end of fuel cycle, MWd/kgU	11.0	25.5	29.0	38.5
Burnup rate, $\frac{\text{MWd/kgU}}{\text{effective days}}$	0.037	0.037	0.036	0.029
Fuel assembly coordinate in the reactor core	21-38	19-40	19-40	16-45

Location of fuel assembly 13626135

in the core of the 4th power unit Novovoronezh NPP

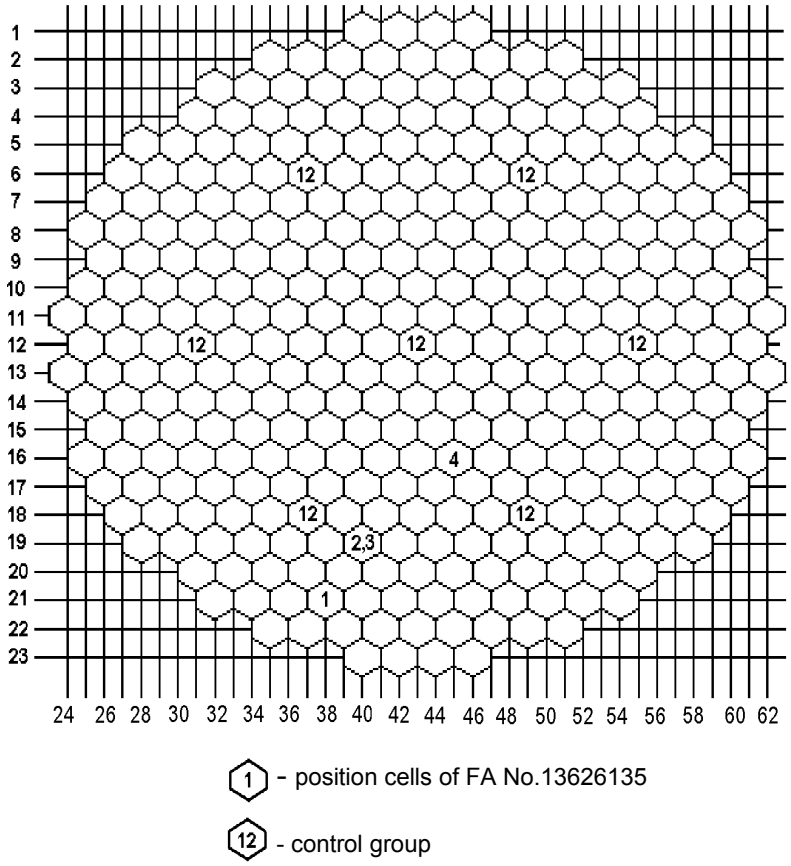


Fig.1.2

The analysis of data given in Table 1.2 and Fig.1.2 reveals that fuel assembly No.13626135 was operated at the same burnup rate during the first three fuel cycles but it was subjected to less power during the fourth fuel cycle. It was not located close to the assemblies of the 12th control rod group during none of the cycles. According to the results of cladding integrity control in the 4th power unit of Novovoronezh NPP and PIE data, fuel assembly didn't include untight fuel rods.

Four fuel rods were selected for radiochemical analysis in compliance with the performance requirements. They met the following requirements:

- One fuel rod at a maximum fuel burnup level;
- One fuel rod at a minimal fuel burnup level;
- The other two should be at an intermediated burnup level.

Three specimens are cutout throughout the height of fuel rods at a maximum and minimal burnups. One specimen is cutout from the central part of fuel column of two other fuel rods. A total of eight fuel specimens those burnup varies significantly is selected for radiochemical analysis.

2. Brief description of initial state of FA No.13626135 fuel and fuel rods

Burnup and isotope composition of the FA fuel are one of the main parameters, which are important for nuclear safety ensuring in the course of spent nuclear fuel management. But it is necessary to consider some other characteristics, which can cause the reactivity change in addition to the mentioned above. Specifically, the change in FR geometric results in a change of water-uranium ratio in fuel assembly that has got a direct bearing on the reactivity change. A reliability and serviceability of individual FA component parts affecting the design integrity are of great importance also. This chapter provides the description of initial condition of FA 13626135 fuel and fuel rods. It should be taken into consideration in estimation of the FA condition after irradiation [2].

2.1. Description of initial fuel parameters

Pellets made of the sintered uranium dioxide with enrichment of 3.6% U-235 were used as fuel.

Two batches of cladding tubes (985-6-1/2 and 1091-6-1/2) and one fuel batch (350512) were used for fabrication of FA 13626135 fuel rods.

Pellet geometry of operating assembly No.13626135, nuclide and chemical compositions of fuel, parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole are given in Table 2.1-2.3.

Table 2.1

Geometrics of FA No.13626135 pellets

Parameter	Value
Outer diameter, mm	7.60
Length, mm	11
Central hole diameter, mm	1.2
Pellet shape	with facet

Table 2.2

Isotopic composition of FA No.13626135 fuel

Parameter	Value
UO_2 mass in fuel assembly before irradiation, kg	134.76
Uranium mass in fuel assembly before irradiation, kg	118.49
U-235 mass in fuel assembly before irradiation, kg	4.25
Mass fraction of uranium isotope mixture, %	No less than 87.7
U-235 mass fraction in the mixture of uranium isotopes, %	3.60 ± 0.05
U-236 mass fraction in uranium, %	No more than 0.1
U-234 mass fraction in uranium	It isn't normalized
Density, g/cm^3	10.40 – 10.80
Oxygen coefficient	2.000…2.015

Table 2.3

Chemical composition of FA No.13626135 fuel

Parameter	Value
Mass fraction of impurities with reference to uranium, %, no more than	
Nitrogen	0.02
Boron	0.00004
Iron	0.06
Silicon	0.025
Manganese	0.002
Copper	0.005
Nickel	0.015
Carbon	0.01
Fluorine	0.005
Chromium	0.01
Total boron equivalent, %, no more than	0.00018

2.2. Parameters of fuel rods

The Zr-1%Nb alloy was used as a material of claddings and end couplings. Lower end surfaces of fuel rods were sealed using electron-beam welding but the upper end surfaces were sealed using electric resistance welding. Sintered pellets made of uranium dioxide and provided with facets at the end surfaces were used as fuel. Fuel column holders were made of 08X18H10T steel (State Standard GOST 5632-72).

Fig.2.1 is the schematic view of fuel rod; parameters of fuel rod are given in Table 2.4.

Table 2.4

Parameters of FA No.13626135 fuel rod

Length, mm	2558.5
Fuel rod mass, g	1410
Fuel material	UO_2
Fuel column length, mm	2420
Gas plenum length, average, mm	86
Fuel pellet size, mm -outer diameter -height Central hole diameter, mm	 7.6 1.2 8÷14
Pellet shape	1.2
Cladding material	With facet
Outer diameter of fuel rod, mm Inner diameter of cladding, mm Gas-filler	Zr-1%Nb 9.1 7.72
Helium pressure in fuel rod, MPa	helium
Space volume in fuel rod, cm^3 Sealing of the upper end-cap	0.5-0.7 16.7 – 17.2
Sealing of the lower end-cap	Electric resistance welding
Герметизация нижней заглушки	Electron-beam welding

Sketch of FA No.13626135 fuel rod

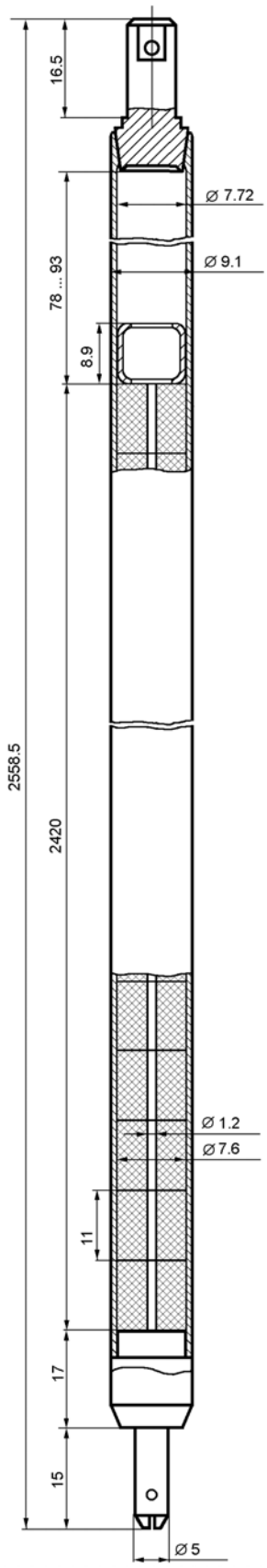


Fig.2.1

2.3. Fuel assembly No.13626135 parameters

The fuel assembly is made up of the bundle of fuel rods, head piece, tail piece and wrapper. Fuel rods as a bundle are arranged on the triangular grid and united with ten spacer grids, which are attached to the central tube. The upper grid is fastened by spacers to the head piece using welding and lower support grid is attached to the tail piece. Fuel rods as well as the central tube are attached to the lower grid using pin wire. The lower support grid is welded on the tail piece that is meant for fuel assembly insertion at the bottom of the reactor core. The tail piece pivots the tapered part of the seating. The tail part of the fuel assembly is provided with the guide pin and the core support barrel bottom has got a groove for fuel assembly orientation during its insertion in the reactor core cell.

The head and tail pieces are fastened by screws to the wrapper on the hexahedral surface. The screws are welded to prevent self-unscrewing.

The head piece of the fuel assembly has got two pins for shipping gripper of the fuel-handling machine and spring-loaded supports, which prevent floating-up of the operating assembly. Supports work as the compensator of heat expansion and technological tolerance in the reactor internals. A protective grid is attached to the lower end of the head piece.

Zirconium alloys are used for fabrication of fuel rod claddings and end couplings, spacer grids, central tube and wrapper. Other units are made of stainless steel.

Fuel makes up a column of sintered uranium dioxide pellets provided with an axial hole. Fuel column is fixed to prevent its displacement during shipment.

Fig.2.2 is the schematic view of the operating assembly. Characteristics of the main component parts of the assembly are given in Table 2.5.

Fuel assembly sketch

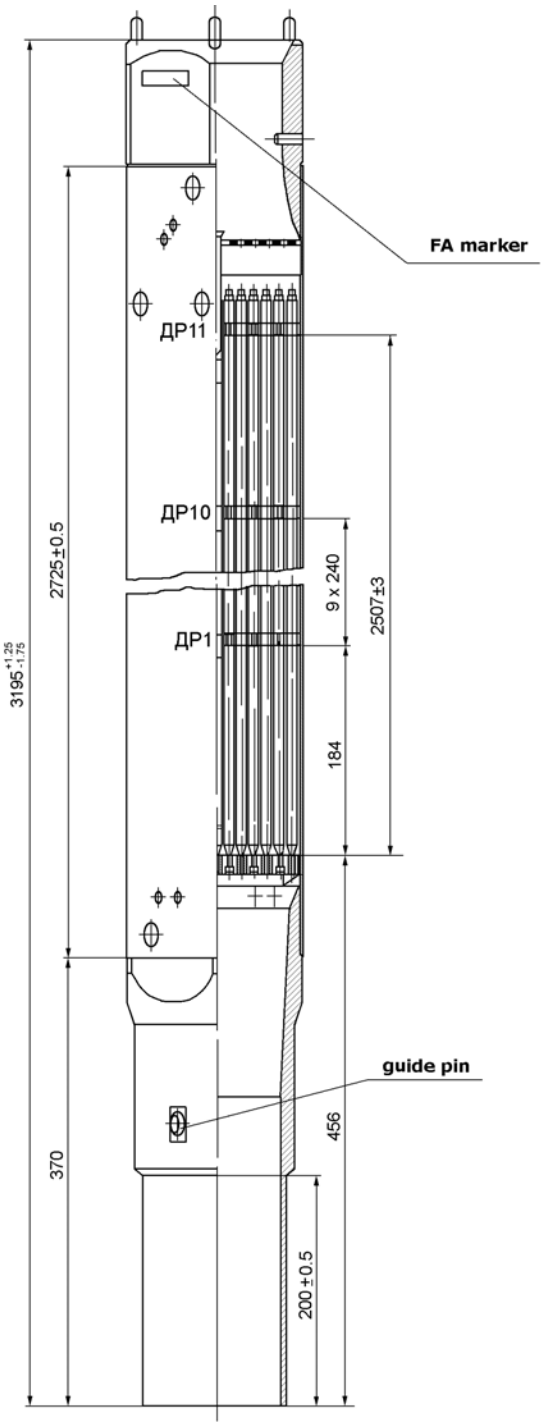


Fig.2.2

Table 2.5

Fuel assembly No.13626135 characteristics

Position No.	Name	Value
1	**Fuel assembly**	
1.1	Serial No	13626135
1.2	Fabrication date	1987
1.3	Fuel enrichment, ^{235}U, %	3.6
1.4	Fuel assembly length	3217
1.5	Number of fuel rods	126
1.6	Number of spacer grids	11
2	**Wrapper**	
2.1	Length, mm	2725
2.2	Across flats dimension, mm	144.2
2.3	Wrapper sheet thickness, mm	2.0
2.4	Wrapper fastening to the end couplings	Screws (12 screws from each end of the wrapper)
3	**Spacer grid**	
3.1	Across flats dimension, mm	138.73 max
3.2	Cell height, mm	10
3.3	Cell diameter, mm	8.90
3.4	Thickness of the cell wall, mm	0.3
3.5	Hoop availability	Absent
3.6	Material	Zr-1%Nb alloy
4	**Central tube**	
4.1	Length, mm	2565
4.2	Outer diameter, mm	10.3
4.3	Inner diameter, mm	8.8
4.4	Material	Zr-1%Nb alloy
5	**Fuel rod**	
5.1	Length, mm	2558.5
5.2	Outer diameter, mm	9.1
5.3	He initial pressure, MPa	0.5…0.7
5.4	Cladding material	Zr-1%Nb alloy
6	**Fuel pellet**	
6.1	Material	Uranium dioxide
6.2	Length, mm	8…14
6.3	Outer diameter, mm	7.6
6.4	Central hole diameter, mm	1.2
6.5	Facet availability	Available
6.6	Mean density, g/cm^3	10.5

3. Neutron-physical calculation of FA No.13626135 irradiation parameters

Neutron-physical characteristics of fuel rods under examination were calculated in accordance with the statement of work. These fuel rods were operated as a part of fuel assembly in the 4th power unit of Novovoronezh NPP in the course of 15-18 core loads [3].

The following data were used for performance of this work:

- Design characteristics of the fuel assembly under examination;
- Operation history of the reactor up to the 15th core load (schematic views of core loads, rearrangement diagrams of all fuel assemblies, duration of core loads, reactor power, coolant temperature in the reactor, coolant flow-rate through the reactor, position of operating control rod bank, criticality parameters of the reactor cores);
- Operation history of the reactor (in the course of 15-18 core loads) from the 15th up to the 18th core loads (schematic views of core loads, rearrangement diagrams of all fuel assemblies, duration of core loads, reactor power, coolant temperature in the reactor, coolant flow-rate through the reactor, position of operating control rod bank, criticality parameters of the reactor cores).

Neutron and physical calculations were made for each fuel rod and each fuel assembly of all core loads using a package of computer codes such as BIPR-7A – PERMAK-A. Data library incorporating neutron and physical characteristics of fuel assemblies and fuel rods was prepared also.

The following characteristics of fuel rods under examination were found as a result of performed work:

- Distribution of fuel burnup with height;
- Distribution of fast neutron fluence;
- Linear power distribution;
- Cladding temperature values,
- Linear power values.

The multi-level two-dimensional and four-group computer code PERMAK-A provided with a fine grid was used for calculation of energy release field and fuel burnup distributions over the reactor core cross-section in each fuel rod. Additional utility programs for the computer code PERMAK-A were used to obtain data on fast neutron fluence distribution and cladding temperature values.

The multigroup spectral program TVS-M was applied for preparation of the required programs BIPR-7A and PERMAK-A to obtain multiparametric relations of small-group neutron cross-sections in the calculated cells.

Twenty-five computation layers throughout the reactor core height were used for calculations according to BIPR-7A. It allows for the representative accounting of differences in

fuel column heights of the operating FAs and FA ARK as well as availability of steel inserts at the FA ARK upper parts and details of the FA ARK absorber-fuel tailpiece joint unit design.

The gained experience in the field of calculation data comparison with the data on VVER reactor startup and core load operation reveals that the estimated prediction errors of neutron-physical characteristics typical for the VVER-440 core loads are not in excess of the following values according to the above-mentioned package of computer codes:

- Initial values of critical boron concentration 10 %;
- Efficiency of CPS CR in the course of measurement data processing with due consideration for space-time kinetics 10%;
- Temperature coefficient of reactivity $3*10^{-5}C^{-1}$;
- Non-uniformities in FA power 5 %;
- Non-uniformities of fuel rod powers inside the fuel assembly 3 %;
- Xe-135 poisoning effect 10 %;
- Power effect of reactivity 15%;
- Secondary criticality temperature 20°C;
- Duration of the core loads (for the first transient load) 3% (5%)

Fig.3.1 gives enumeration of fuel rods within the PERMAK-A computational grid.

Enumeration of fuel rods in fuel assembly No.13626135, accepted for neutron-physical calculations

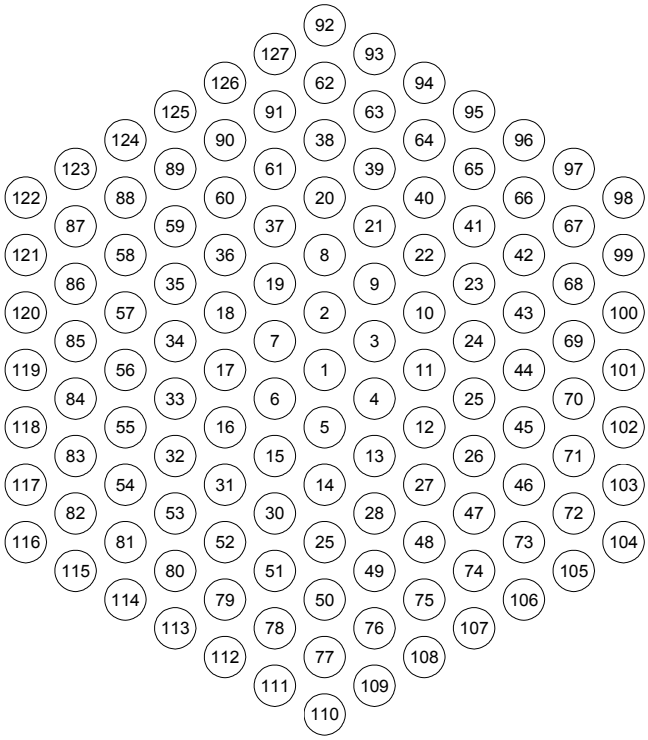
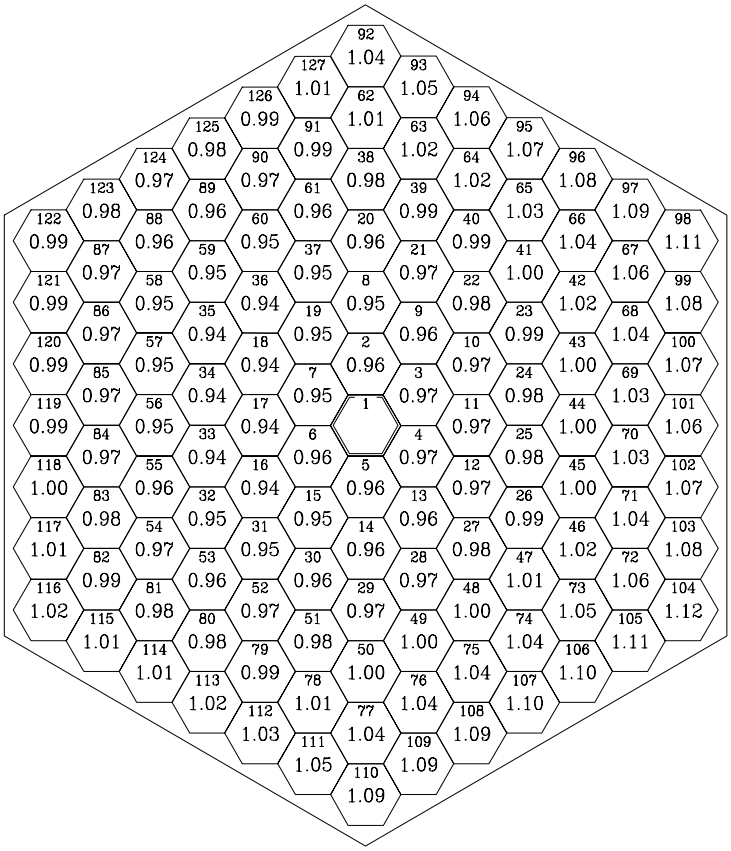


Fig.3.1

Fig.3.2 shows power release distribution over FA No.13626135 cross-section for each fuel rod. It is given for the 18th core load. Table 3.1 shows how the linear thermal power is changed in fuel rods located in the radial direction in a similar way as fuel rods examined in the course of 15-18 fuel cycles. The maximum linear power made up~220 W/cm at the point appropriate to node No.9 of corner fuel rod No.116 and it was 187.3 W/cm in fuel rod No.6 located in the center of fuel assembly close to the central tube. Table 3.2 gives the calculated values of fuel burnup for fuel rods under examination at the end of irradiation. A satisfactory agreement between the calculated and experimental data on fuel burnup fraction was revealed. The experimental data on fuel burnup fraction were obtained with the use of nondestructive measurement method presented in Chapter 4.

Cross-section relative power distribution on the fuel assembly (core load 18)



Effective time	0.00 days
Power	1375 MW
$C^{critical}_{H_3BO_3}$	6.12 g/kg
Linear power	155.1 W/cm
FA Number	28
Node	10
Fuel rod Number	104
Kk_{max}	1.12

Fig.3.2.

Table 3.1

Linear thermal power change in diagonal fuel rods No.6-116 in the course of operation

Fuel rod No.	Node No.	Core load No.15		Core load No.16		Core load No.17		Core load No.18	
		Beginning	End	Beginning	End	Beginning	End	Beginning	End
6 (centre)	21	99.6	176.0	99.0	169.5	113.2	137.2	107.0	164.5
	9	187.3	123.8	187.3	107.1	168.4	151.6	131.8	111.9
16	21	96.7	175.1	97.1	167.9	110.5	134.7	105.5	163.8
	9	185.4	123.2	184.6	106.1	166.1	149.6	130.6	111.4
32	21	100.1	179.5	97.6	169.5	111.0	135.3	106.5	165.2
	9	188.2	125.6	185.5	107.1	167.6	150.9	131.2	112.3
54	21	103.1	187.3	99.5	175.1	113.2	137.9	109.5	168.9
	9	195.5	130.4	190.1	109.5	171.4	154.3	133.7	114.3
82	21	188.5	200.4	103.9	182.3	117.5	143.0	113.7	173.3
	9	206.5	138.2	198.2	113.3	177.5	159.7	137.4	116.7
116 (corner)	21	116.3	217.8	110.3	191.9	122.9	149.4	118.9	178.4
	9	222.0	149.7	209.9	117.2	185.1	165.0	141.4	119.7

Table 3.2

Calculated values of fuel burnup throughout the height of fuel rods for the end of irradiation

Core Node No.	Burnup, MWd/kgU					
	fuel rod 6	fuel rod 16	fuel rod 32	fuel rod 54	fuel rod 82	fuel rod 116
25	19.0	18.7	18.9	19.6	20.6	22.2
24	25.2	24.8	25.1	25.9	27.2	29.1
23	30.3	29.8	30.1	31.1	32.5	34.6
22	33.6	33.3	33.6	34.5	36.1	38.3
21	35.9	35.6	35.9	36.9	38.4	40.7
20	37.8	37.3	37.6	38.7	40.2	42.6
19	39.2	38.7	39.0	40.1	41.9	44.2
18	40.5	40.1	40.5	41.8	43.5	45.8
17	41.5	41.2	41.5	42.7	44.6	47.0
16	42.3	41.9	42.3	43.5	45.4	47.9
15	48.8	42.2	42.8	44.0	45.9	48.2
14	43.1	42.5	43.1	44.3	46.2	48.6
13	43.3	42.8	43.3	44.5	46.5	48.8
12	43.5	43.1	43.5	44.7	46.7	49.0
11	43.7	43.3	43.7	44.8	46.8	49.2
10	43.8	43.4	43.8	45.0	46.9	49.3
9	43.8	43.4	43.8	45.0	47.0	49.6
8	43.8	43.4	43.8	45.0	47.0	49.6
7	43.7	43.3	43.7	44.9	46.8	49.4
6	43.3	42.7	43.3	44.4	46.4	48.9
5	42.1	41.7	42.1	43.4	45.2	47.8
4	40.1	39.7	40.1	41.4	43.2	45.8
3	36.7	36.2	36.7	37.9	39.6	42.1
2	30.7	30.3	30.7	31.7	33.4	35.7
1	22.0	21.8	22.1	22.8	24.2	26.0

4. Analysis of nondestructive post-irradiation examination results of FA No.13626135 fuel rods

This chapter briefly describes the results of examination of individual components in FA No.13626135 as well as nondestructive examination results of fuel rods No.No.65, 67, 68 and 69. The results of post-irradiation examination of fuel rods are presented in more detail in paper [4].

Visual inspection of fuel assembly and fuel rods

A visual inspection of fuel assembly revealed a satisfactory condition of its individual components. There were no serious comments with regard to the FA head and tail pieces. All zirconium spacer grids remained intact and enable a reliable fastening of a bundle. Claddings of fuel rods were mainly dark in color with contrasting whitish stains (Fig.4.1). Tracers of interaction with indents were discovered in the region of spacer grids (Fig.4.2). They looked like grey-white stretched longitudinal spots of ~2 mm width and ~10 mm long. Visual examination didn't reveal any defects of the upper and lower joint welds in fuel rods.

Contour stains on fuel rod surfaces on the side of the 4th edge in the area of the 8th spacer grid

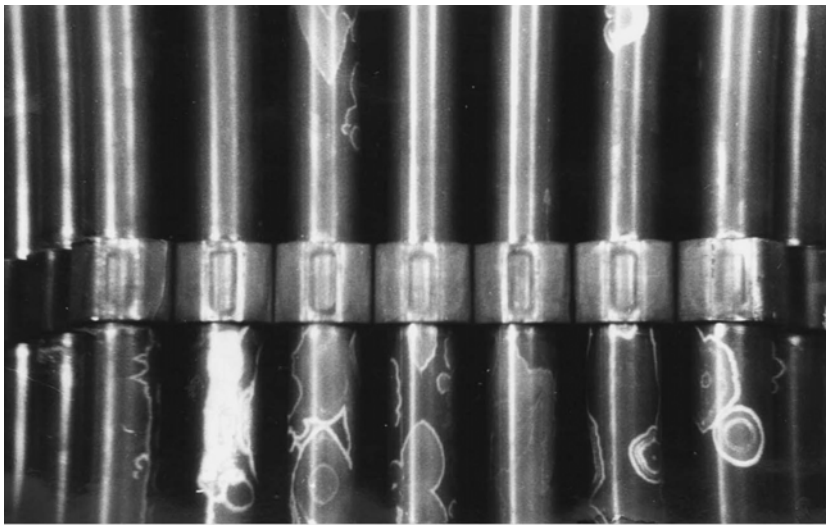


Fig.4.1.

Traces of fuel rod cladding-to-spacer grid interaction

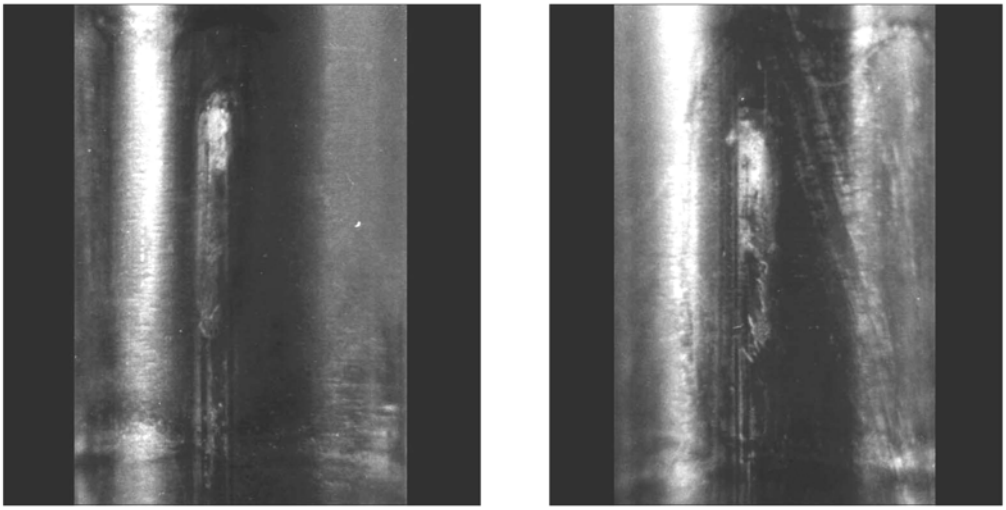


Fig.4.2

Length measurement

Elongation of fuel rods was measured in accordance with the technique described in paper [5]. A measurement error was no more than ±0.5 mm. Elongation data for all fuel rods are shown in Fig.4.3 and 4.4. The average elongation of fuel rods made up 6.06 mm ($\Delta L/L$ = 0.24%) in fuel assembly N.13626135. A minimum elongation was equal to 4.05 mm (0.16%), maximum one - 7.64 mm (0.30%).

Schematic diagram of fuel rod elongation in FA No.13626135

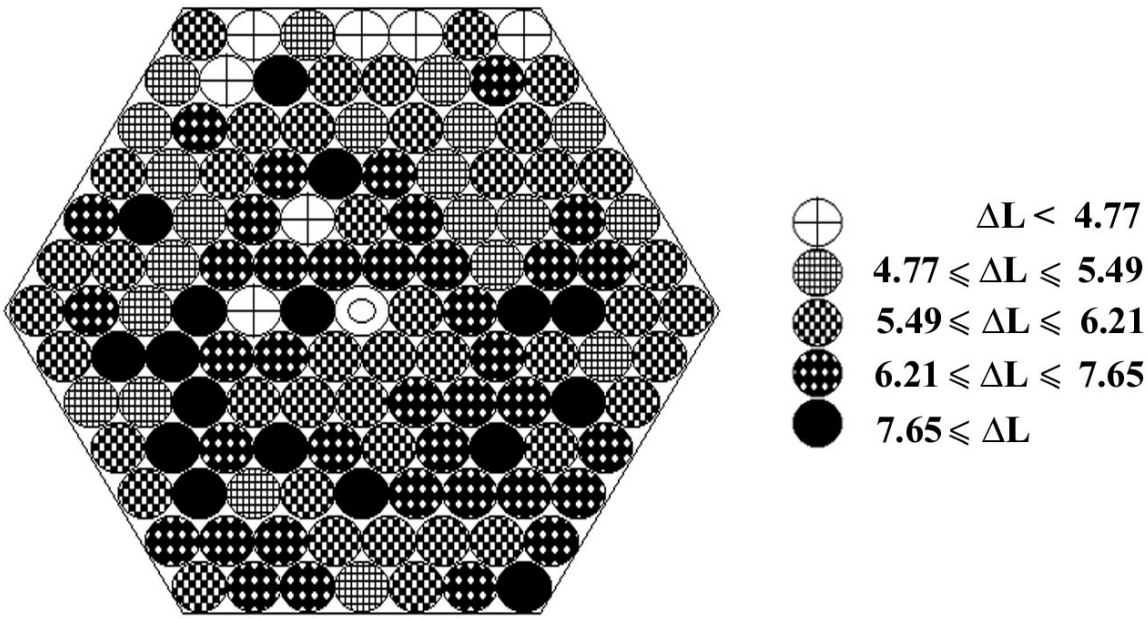


Fig.4.3

Chart of fuel rod elongation in FA No.13626135

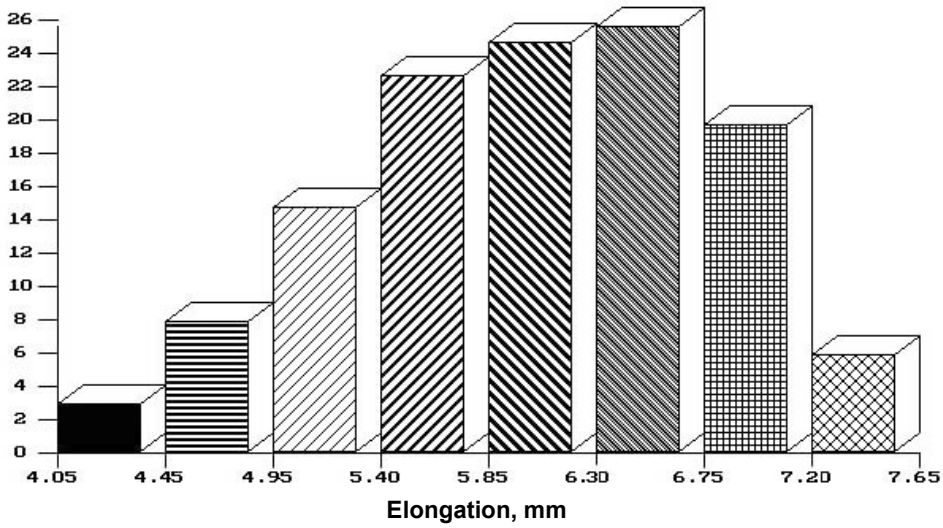


Fig.4.4

The elongations of selected fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69 made up:

- For fuel rod No.65 elongation –6.30 mm, percent elongation – 0.25 %;
- For fuel rod No. 67 elongation –7.64 mm, percent elongation – 0.30 %;
- For fuel rod No.68 elongation –5.98 mm, percent elongation – 0.24 %;
- For fuel rod No.69 elongation –6.16 mm, percent elongation – 0.24 %.

The analysis of presented data reveals that the elongation of selected fuel rods (5.98-7.64 mm) doesn't go beyond the limit of length increase of fuel rod cladding tubes in FA No.13626135 (4.05-7.64 mm).

Outer diameter measurement and eddy-current testing of claddings

The error of FR cladding diameter measurement was no higher than ±0.02 mm. measurements were made with a contact profilometer. The diameter change was calculated as the difference of the average diameter values in the gas plenum (48-70 mm from the upper part of fuel rod) and the reactor core areas (800-2000 mm). The obtained results are presented in Table 4.1.

Fig. 4.5 demonstrates the nature of cladding diameter change along the whole length of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69.

According to the results of eddy-current testing, there were no significant defects on the cladding. Low signal magnitudes were found in the regions coinciding with the coordinates of spacer grid location.

Gamma spectrometry of fuel rods

Gamma-spectrometer measurements of fuel rods were made to obtain data on fission products (FP) and fuel burnup distributions throughout the height of fuel rods. Table 4.2 gives the experimental values for axial power peaking factor (Kz) of the ^{137}Cs long-lived fission product accumulation as well as maximum and average fuel burnup values in fuel rods.

Table 4.1

Diameters of fuel rod claddings in FA No.13626135

Fuel rod No.	Average diameter in the gas plenum region, mm	Average diameter in the centre area, mm	Difference between diameters in the centre area and gas plenum regions, mm
001	9.10	9.06	-0.04
004	9.11	9.07	-0.04
007	9.11	9.06	-0.05
009	9.11	9.07	-0.04
014	9.11	9.06	-0.05
018	9.10	9.05	-0.04
022	9.11	9.07	-0.03
026	9.10	9.06	-0.05
028	9.09	9.05	-0.04
031	9.11	9.06	-0.04
039	9.10	9.07	-0.03
041	9.11	9.07	-0.04
051	9.11	9.07	-0.05
052	9.09	9.06	-0.04
058	9.12	9.07	-0.05
059	9.09	9.05	-0.04
060	9.10	9.06	-0.04
061	9.09	9.04	-0.05
062	9.11	9.07	-0.04
063	9.10	9.05	-0.06
064	9.11	9.07	-0.04
065	**9.10**	**9.07**	**-0.04**
066	9.11	9.06	-0.04
067	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
068	**9.10**	**9.06**	**-0.04**
069	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
075	9.10	9.07	-0.03
076	9.11	9.06	-0.05
086	9.10	9.07	-0.04
088	9.13	9.08	-0.05
090	9.09	9.05	-0.04
096	9.09	9.04	-0.05
099	9.10	9.05	-0.05
105	9.09	9.05	-0.04
109	9.09	9.03	-0.05
112	9.12	9.08	-0.04
113	9.10	9.07	-0.03
118	9.10	9.06	-0.04
120	9.12	9.07	-0.05
126	9.13	9.07	-0.06
Minimum	9.09	9.03	-0.06
Maximum	9.13	9.08	-0.03
Average	9.10	9.06	-0.04
Mean-square deviation	0.011	0.011	0.006

Fig.4.6 demonstrates distribution of the average fuel burnup in the FA diagonal fuel rods. A radial burnup peaking factor (K_r) makes up 1.15 in fuel assembly. Fuel rod No.69 at a burnup of 49.3 MW·day/kgU achieved a maximum burnup in fuel assembly No.13626135. Fuel rod No.65 achieved a minimal burnup. An intermediate fuel burnup level was achieved in fuel rods No.67 and No.68. Actually fuel burnup is uniformly distributed along the FA perimeter.

Distribution of diameter value along four fuel rods

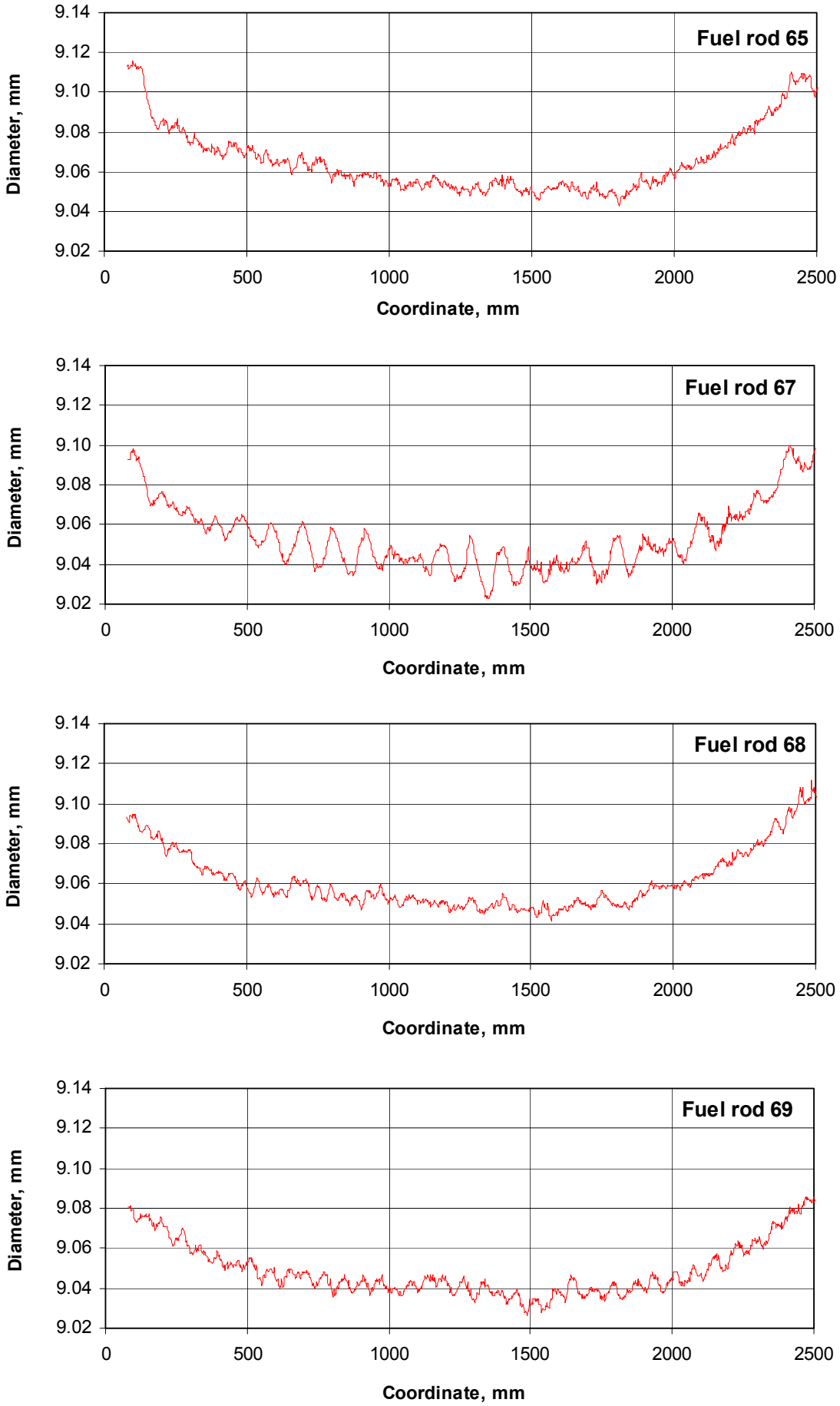


Fig.4.5

Table 4.2

Maximum and average fuel burnup and peaking factors (Kz) of fission product distribution along FA 13626135 fuel rods

Fuel rod No.	Maximum burnup, MWd/kgU	Kz (^{137}Cs)	Average burnup, MWd/kgU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	**42.3**	**1.16**	**36.4**
66	42.5	1.16	36.5
67	**43.8**	**1.16**	**37.6**
68	**45.7**	**1.16**	**39.3**
69	**49.3**	**1.17**	**42.2**
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Minimum	42.2	1.15	36.1
Maximum	49.3	1.17	42.8
Average	44.3	1.16	38.1
Mean-square deviation	2.18	0.005	1.97

Distribution of the average burnup in diagonal directions of FA No.13626135 fuel rods

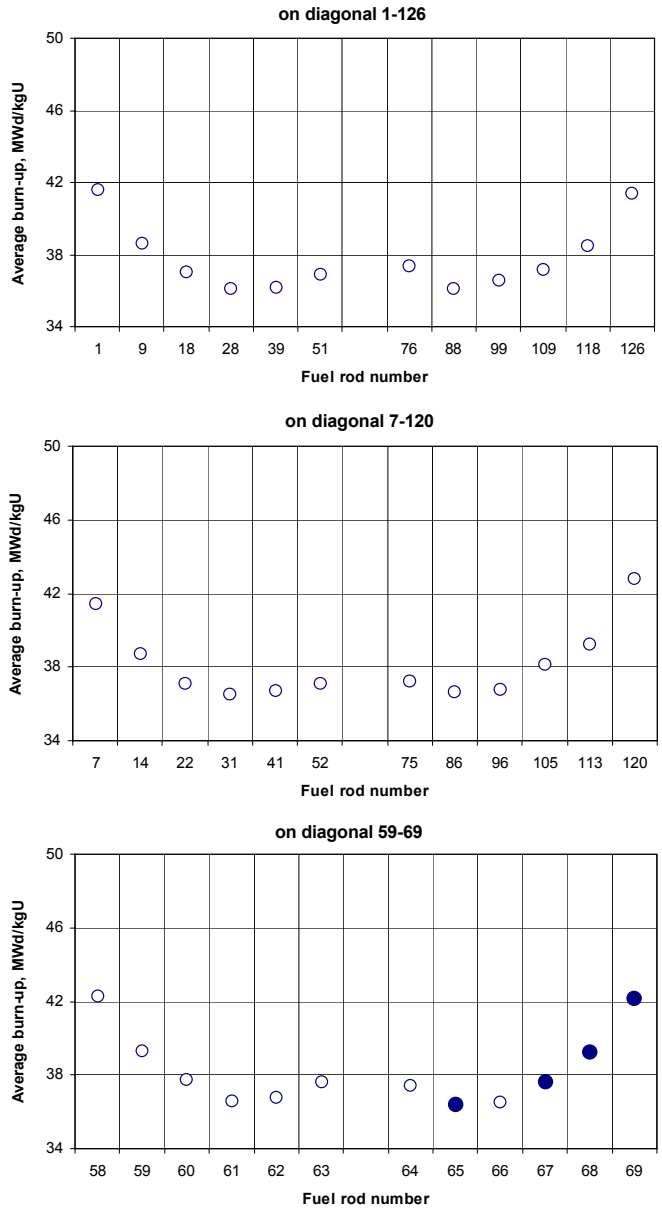


Fig.4.6

Gas quantity and composition under the cladding

Two methods were used for measurement of gaseous fission product (GFP) content under the FR claddings. The GFP content was measured nondestructively against the ^{85}Kr gamma radiation rate in the gas cavity using a gamma spectrometry analysis. Table 4.3 presents data on the GFP gamma radiation counting rate and cladding activation products in the gas plenums of fuel rods No.No. 65, 67, 68 and 69. As indicated by the given data, gas release is the highest in the corner fuel rods.

Table 4.3

Counting rate of FP gamma radiation and cladding activation products in gas plenums of FA No.13626135 fuel rods, pulse/s

Fuel rod No.	^{85}Kr Eγ=513 keV	^{134}Cs Eγ=604 keV	^{137}Cs Eγ=661 keV	^{94}Nb Eγ=871 keV
65	17.4	6.0	64.1	16.1
67	14.8	4.4	36.2	14.6
68	14.3	5.4	60.7	12.7
69	65.9	5.4	49.6	12.6

The parameters of gases present under the cladding were measured with a laser puncture equipment. The gas sampled in the course of puncture was analyzed with the use of mass spectrometry. The results of measurements are shown in Table 4.4. As indicated by the given data on the content and composition of gases present under the claddings of fuel rods (FA No.13626135), the maximum GFP release was found in the corner fuel rods. The GFP release was approximately the same for the remaining fuel rods and it was much lower as opposed to the corner fuel rods.

Based on the calculated data [3], it is possible to evaluate a maximum allowable liner thermal power value that results in the GFP release identification due to thermal diffusion. The calculated values of linear thermal power in the corner fuel rod No.116 varied in the range of ~220 W/cm (the 15th fuel cycle) up to ~178 W/cm (the 18th fuel cycle). The linear thermal power values for the other fuel rods varied in the range of ~187 W/cm (the 15th fuel cycle) to~160 W/cm at the end of irradiation. Based on these data, it is possible to assume that a maximum allowable linear thermal power value resulting in the GFP release identification is within a range of ~195÷210 W/cm.

Table 4.4

Amount and composition of gases under the fuel rod claddings in FA 13626135

Fuel rod No.	Burnup MW*day/kgU	Free volume of fuel rod, cm3	Gas volume under normal conditions cm3	Gas pressure in fuel rod, MPa	Gas composition, volume %							Gas release from fuel %
					He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe	
1	41.6	15.5	164.0	1.06	68.00	<0.20	<0.06	<0.02	<0.02	3.36	28.34	4.88
9	38.6	16.1	134.4	0.83	89.20	<0.13	<0.04	<0.018	<0.014	1.07	9.52	1.43
18	37.0	16.4	128.4	0.78	92.98	<0.08	<0.007	<0.005	<0.002	0.71	6.21	0.93
28	36.1	15.2	120.8	0.79	90.30	<0.20	<0.09	<0.01	<0.0001	1.00	8.40	1.22
39	36.2	15.9	121.1	0.76	91.60	<0.18	<0.08	<0.002	<0.0001	0.85	7.30	1.06
51	36.9	16.1	131.4	0.82	92.40	<0.28	<0.10	<0.001	<0.0001	0.72	6.50	1.01
76	37.4	16.1	130.2	0.81	93.60	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	0.56	5.69	0.85
88	36.1	16.6	131.5	0.79	93.40	<0.18	<0.03	<0.02	<0.006	0.68	5.68	0.90
99	36.6	15.4	120.5	0.78	94.90	<0.22	<0.05	<0.001	<0.0001	0.50	4.33	0.62
109	37.2	16.5	134.1	0.81	94.10	<0.29	<0.09	<0.001	<0.0001	0.57	4.95	0.77
118	38.5	15.9	127.9	0.80	94.80	<0.12	<0.03	<0.002	<0.0001	0.52	4.52	0.65
120	42.8	14.9	169.0	1.13	65.20	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	4.14	30.50	5.31
126	41.4	15.5	136.8	0.88	83.40	<0.12	<0.05	<0.001	<0.0001	1.73	14.70	2.11
65	**36.40**	**15.5**	**134.2**	**0.88**	**90.13**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.95**	**8.89**	**1.44**
67	**37.60**	**15.2**	**125.7**	**0.84**	**91.75**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.80**	**7.43**	**1.09**
68	**39.3**	**15.7**	**132.7**	**0.86**	**89.49**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**1.00**	**9.49**	**1.41**
69	**42.20**	**15.4**	**174.8**	**1.15**	**53.35**	**<0.06**	**<0.01**	**<0.006**	**<0.003**	**3.79**	**42.78**	**7.62**
Max	42.8	16.6	174.8	1.2	94.9					4.1	42.8	7.6
Min	36.1	14.9	120.5	0.8	53.4					0.5	4.3	0.6
Average	38.3	15.8	136.3	0.9	86.4					1.4	12.1	2.0
Mean-square deviation	2.29	0.49	16.57	0.12	12.18					1.20	11.04	2.00

5. Characteristics of specimens selected for analysis

In accordance with the statement of work fuel specimens were selected out of fuel rods of fuel assembly No.13626135 to perform radiochemical analysis and mass-spectrometer measurements [6]. In order to obtain exhaustive data on the isotope composition of fuel as a function of fuel burnup, fuel specimens were selected out of the following fuel rods:

- Corner fuel rod No.69 at a maximum fuel burnup of 49.3 MW·day/kgU for this particular fuel assembly. A maximum fuel burnup level throughout the height of fuel rod was found within ~650 mm and 1250 mm from the lower part of fuel rod;
- Fuel rod No.69 at a minimal fuel burnup of 42.3 MW·day/kgU within the above given region throughout the height;
- Fuel rods No.67 and 68 at an intermediate fuel burnup level of 43.8 and 45.7 MW·day/kgU respectively.

A jeweller's saw was used for cutting out specimens from fuel rods using a cutting machine. The coordinate of specimen taking out along the length of fuel rods was located with an error of ±1 mm. Specimens of length ~10 mm were cut out for radiochemical analysis.

Fig.5.1 and 5.2 demonstrate the dismantling procedures of fuel rods for cutting out specimens. A location of specimens selected along fuel rods relative to the profile of fission product distribution throughout the height is shown in Fig.5.3÷5.6. An individual equipment was used for measurement of fission product distribution throughout the height with due consideration for the increased exposition time in order to provide representative data on Eu-154 radiation intensity measurement.

The cutout fuel specimens were placed in Al-containers whose covers had numbers. When a fuel specimen is placed in the container, a cover is put down on it. It is screwed on to prevent the container opening. Any fall-out of fuel pellets from the cladding or its individual fragments wasn't noticed during cutting. Table 5.1 shows marking of Al-containers with the corresponding fuel specimens.

Cutting procedure of specimens from fuel rods No.No. 67 and 68 in FA No.13626135

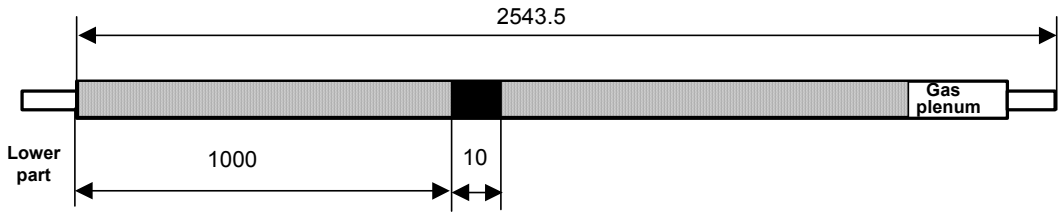


Fig.5.1

Cutting procedure of specimens from fuel rods No.No. 65 and 69 in FA No.13626135

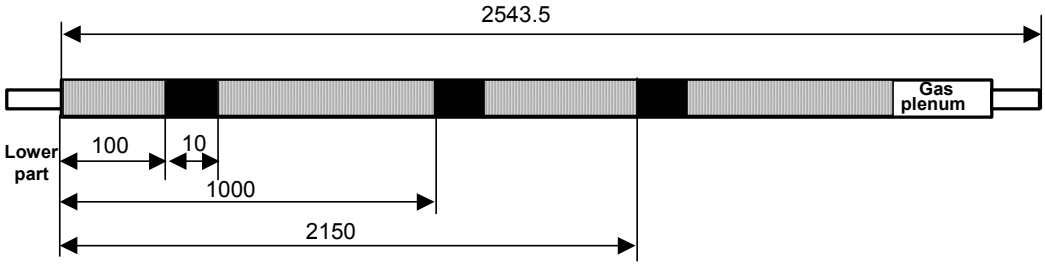


Fig.5.2

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No.65, FA 13626135
(Internal collimator– 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

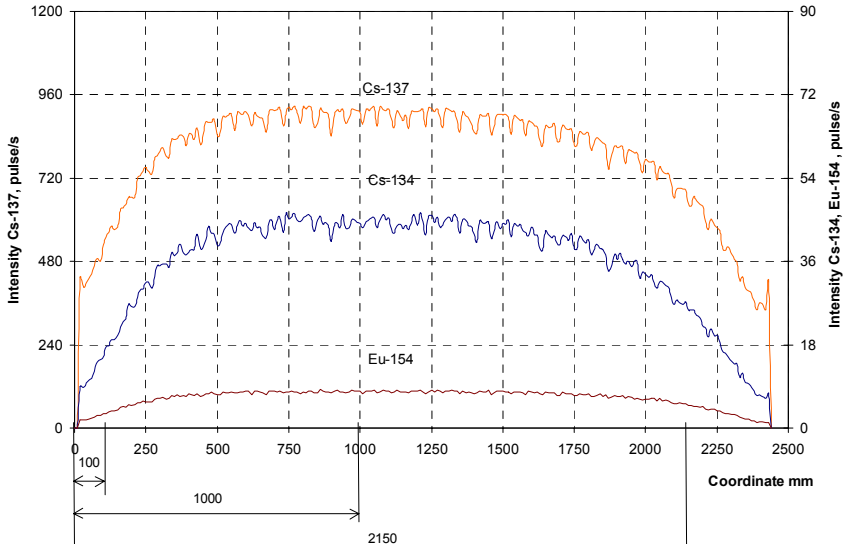


Fig.5.3

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No.67, FA 13626135
(Internal collimator– 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

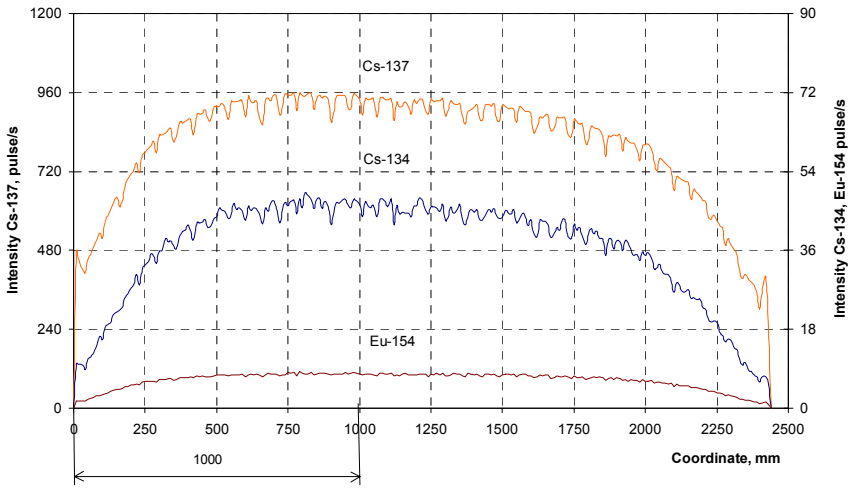


Fig.5.4

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No.68, FA 13626135
(Internal collimator– 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

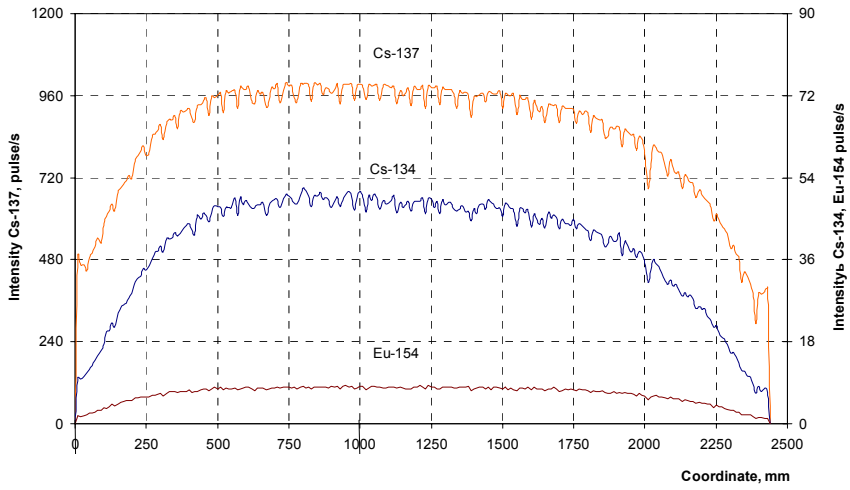


Fig.5.5

Distribution of fission product throughout the height of fuel rod No.69, FA 13626135
(Internal collimator– 3 mm, outer one – 5 mm, pitch – 10 mm)

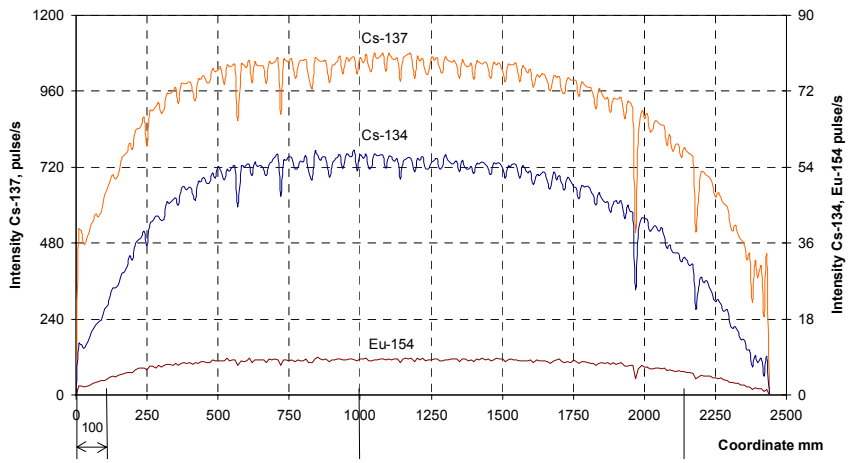


Fig.5.6

The selected fuel specimens were sent for dissolution and further radiochemical analysis and mass-spectrometry to examine fuel burnup and nuclide composition. The analysis of selected specimens will allow for obtaining data on the isotope composition, heavy atom and FP contents in fuel at a burnup of ~22 up to ~49 MW·day/kgU.

Table 5.1

Marking of fuel samples cutout from fuel rods of FA No.13626135

Fuel rod No.	Coordinate from the lower part of fuel rod, mm	Number of Al-container with a fuel sample
65	100	182
	1000	21
	2150	69
67	1000	149
68	1000	162
69	100	135
	1000	79
	2150	57

6. Nuclide composition analysis and fuel burnup fraction measurements in fuel specimens

It is necessary to make an analysis for nuclide composition, fission products and fuel burnup in eight irradiated fuel specimens (fuel rods 65, 67, 68 and 69 of VVER-440 SFA No. 13626135, Novovoronezh NPP) using a destructive radiochemical method in the framework of Task 6 (Project 2670p, stage 1).

Such data will allow for computer codes verification relative to spent fuel reactivity calculation and setting standards of safe storage and spent fuel assembly transportation with regard to its burnup.

Techniques and equipment used for nuclide composition analysis, isotopic mass and fuel burnup fraction measurements in fuel specimens

We have developed a general scheme of irradiated fuel analysis (Fig.6.1) to carry out analysis for nuclide composition, fission products and burnup. This scheme includes the following procedures:

- Dissolution of the sample to be analyzed;
- Calculation of solution volume required for analysis;
- Radiochemical extraction of U, Pu, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Am, Cm and Cs for mass-spectrometer measurements of isotopic composition;
- Repeated radiochemical extraction of U, Pu, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Am, Cm and Cs in the presence of the complex tracer for quantitative measurements of elements;
- Individual extraction of Np, Tc, Ag, Mo, Ru, Rh and Pd in accordance with individual techniques.

The radiochemical analysis techniques and procedures are covered comprehensively in paper [7].

The main procedures of radiochemical analysis involved the following stages:

Specimen dissolution

The irradiated fuel specimen weighing as mach as 2 up to 10 g is placed into a beaker flask with a volume of 150-200 cm^2. Nitric acid solution at 8 mole/l concentration with an addition of hydrofluoric acid (0.1 mole/l) is used for dissolution in poor boiling of the solution.

Radiometric measurements

A sample is taken from the initial solution after dissolution of fuel specimen to determine the total α-activity and measure α-, X-, γ-spectra. The results of measurements are used as the basis for estimation of the necessary solution quantity.

General scheme of irradiated fuel analysis

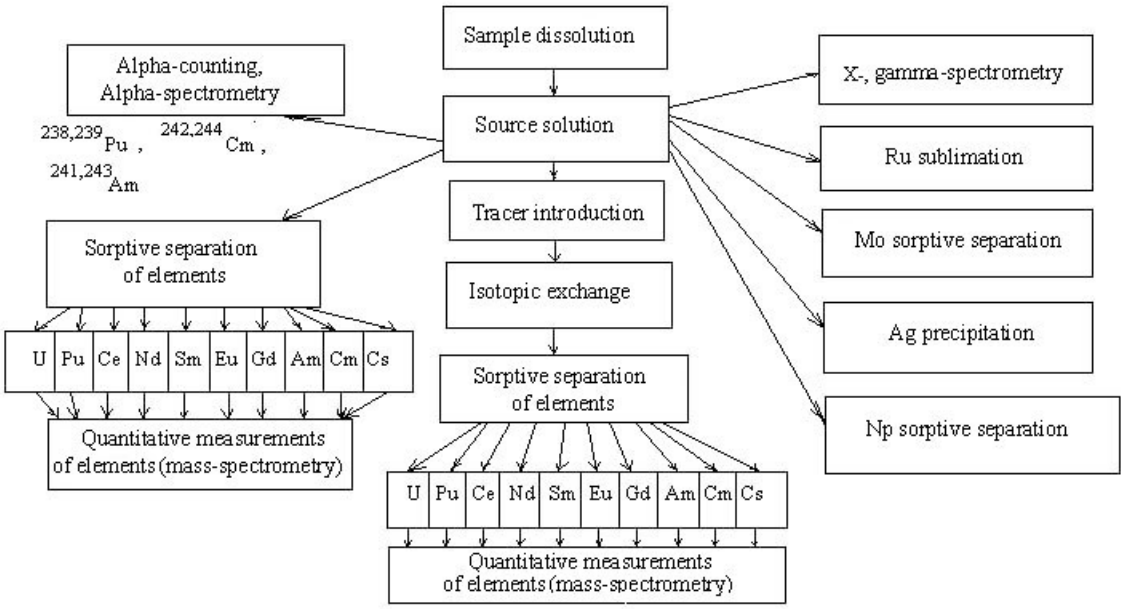


Fig.6.1

Nuclear and physical methods of analysis such as semiconductor α-, X- and γ-spectrometry were used for identification and quantitative measurements of radionuclides. Sets of reference spectrometric α- and γ- sources were used for calibration of nuclear radiation spectrometers. Table 6.1 demonstrates a general scheme of analysis, types and radioactive decay constants of radionuclides, which are still present in the irradiated fuel at the very beginning of radiochemical analysis.

Radiochemical analysis

The following physical and chemical methods were used for extraction and purification of elements in the initial solution of fuel specimens:

- A combination of anion-exchange and extraction-chromatographic methods will be used for extraction of uranium, neptunium, plutonium, rare-earth fission products and molybdenum;
- Sublimation will be used for ruthenium extraction;
- Precipitation will be used for silver extraction.

Fig.6.2 represents a radiochemical extraction scheme for uranium, plutonium, americium, curium, cesium, cerium, neodymium, samarium, europium and gadolinium. The above-given elements are measured quantitatively using isotope dilution followed by mass-spectrometer measurements. Neptunium, molybdenum, ruthenium, silver, technetium, rhodium and palladium are analyzed using a special combination of methods.

Table 6.1

Nuclear-physical characteristics of the examined isotopes

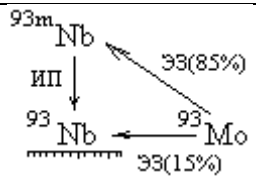
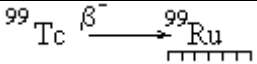
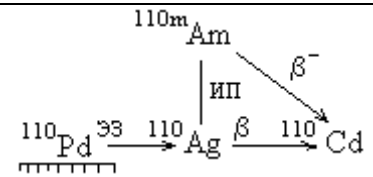
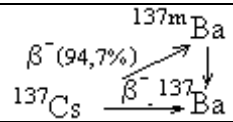
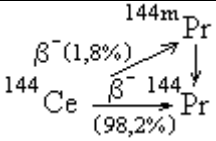
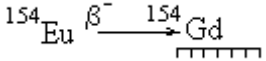
N/N	Isotope	Half-life	Decay type	Energies and intensity of X-, γ-lines	Decay scheme	Electronics
1	Mo^{93} ↓ EC Nb^{93m}	$4*10^3$ years	EC (electron capture) (100%)	30.7 keV – 0.000503(19)% X -ray line 16.86 keV – 48%		X-spectrometer, Ge-extra pure germanium
		13.6 years	Isomeric transition			
2	Tc^{99}	$2.11*10^5$ years	β^- (100%)	89.6 keV – 0.00065%		γ-spectrometer, Ge(Li), germanium diffusion coaxial detector (GDCD)-50
3	Ag^{110m}	250 days	β^- (98.6%)	658 keV – 94.2% 885 keV – 76.4% 938 keV – 32.4% 1384 keV – 26.8%		γ-спектрометр, Ge(Li), GDCD -50
4	Cs^{137}	30 years	β^- (100%)	662 keV – 85.1% X -ray line 33 keV – 6.9 %		γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50
5	Ce^{144} ↓ Pr^{144}	284.3 days	β^- (100%)	X -ray line 36.8 keV – 9.1% 80 keV – 1.6% 133.5 keV – 11.1%		γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50
6	Sm^{151}	90 years	β^- (100%)	21.5 keV – 0,0314%		X-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50
7	Eu^{154}	8.5 years	β^- (~100%)	X -ray line 44 keV – 20.3% 123 keV – 40.5% 722 keV – 19.7% 1004 keV – 17.35% 1274 keV – 35.5%		γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50

Table 6.1(continuation)

N/N	Isotope	Half-life	Decay type	Energies and intensity of X-, γ-lines	Decay scheme	Electronics
8	Ru^{106} ↓ Rh^{106}	368.2 days 29.9 s	β^- (100%) β^- (100%)	511.8 keV – 20.6% 622.1 keV – 9.94% 1050 keV – 1.48%	$^{106}Ru \xrightarrow{} {}^{106}Rh$	γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD-50
9	Rh^{101}	3.3 years	EC	X-ray line 19.64 keV–80.8% 127 keV – 75% 198.4 keV– 79% 325.4 keV – 17%	$^{101}Ru \xleftarrow{ЭЗ} {}^{101}Ru$	γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50
10	Ag^{108m}	127 years	EC (92.3%) Isomeric transition (7.7%)	80 keV – 5.9% 434 keV – 88% 614.4 keV – 92.5%	$^{108m}Ag \xrightarrow{(7,7\%)\ ИП} {}^{108}Ag$; $^{108}Ag \xrightarrow{\beta^-} {}^{108}Cd$; $^{108}Ag \xrightarrow{ЭЗ} {}^{108}Pd$	γ-spectrometer, Ge(Li), GDCD -50
11	Gd^{150}	$1.79*10^6$ years	α-decay	X-ray line of Sm – 41 keV	$^{150}Gd \xrightarrow{\alpha} {}^{146}Sm$	X-spectrometer, Ge-extra pure germanium
12	Pd^{107}	$6.5*10^6$ years	β^- (100%)	Gamma is absent, X-ray line Ag – 22.5keV	$^{107}Pd \xrightarrow{\beta^-} {}^{107}Ag$	X-spectrometer, Ge- extra pure germanium

Scheme of radiochemical extraction

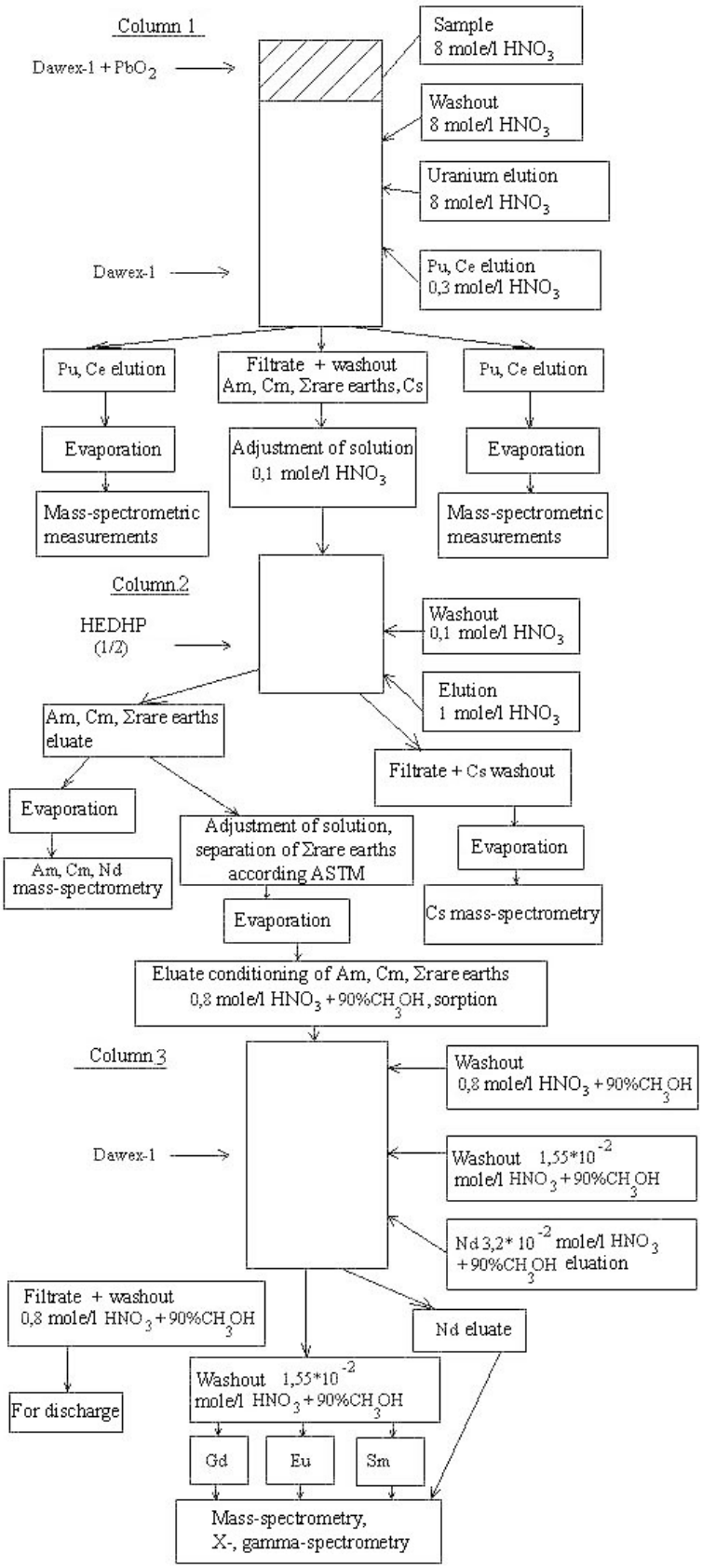


Fig.6.2

Fuel burnup fraction evaluation in specimens

Fuel burnup fraction that is defined as a ratio of heavy nuclei fissioned during irradiation to their total initial amount in fuel is calculated in two ways:

Based on the isotopic composition of fuel that is measured before and after irradiation with the help of expressions (heavy atoms method);

Based on the measured ratio of fission product atom quantity (burnup monitor) to the quantity of heavy atoms in the dissolved fuel specimen (fission product accumulation method).

The set of nuclear constants used in calculations with respect to the heavy atoms method (HAM) are given in Table 6.2.

Table 6.2

Used nuclear constants

Parameter	**Neutrons per fission, ν_i [10]**	**Capture cross section- fission cross section ratio, α_i [10]**	**$Y_{145+146Nd}$, % [9]**	**Y_{137Cs}, % [9]**	**σ_i, barn [8]**
^{235}U	2.4251(17)	0.1687(7)	6.82±0.15	6.27±0.12	556
^{238}U	1.980(15)	0.089(1)	6.70±0.16	6.33±0.12	
^{239}Pu	2.877(3)	0.5870(16)	5.66±0.55	6.48±0.77	
^{241}Pu	2.937(3)	0.4200(28)	5.79±0.17	6.52±0.39	1550.0
^{236}U	-	-	-	-	85
ε	1.046 [8]				
λ_1,c	$1.53 \cdot 10^{-9}$[8]				

Fission products of ^{137}Cs and ^{148}Nd heavy nuclei as well as total accumulation of ^{145}Nd and ^{146}Nd isotopes were used as burnup monitors for burnup level evaluation with reference to fission products [7]. These isotopes aren't included into the chemical composition of fuel of unirradiated fuel rods. Their precursors in the radioactive-decay chain are short-lived nuclides. Calculations didn't take into account the neutron radiative capture influence on the decrease of burnup monitors due to small neutron capture cross-section.

Results of radiochemical analysis of spent fuel specimens

The experimental data obtained in the course of this experiment are listed in Tables .6.3– 6.13 and provided with corresponding comments. The results of radiochemical analysis are given by the time of irradiation completion.

Table 6.14 indicates burnup values of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission portions in the total burnup. They were calculated in accordance with heavy atoms method. This table also contains calculated and experimental values of neutron flux and

fluence. The following calculated values of effective yields of burnup monitors were used in calculation of fuel burnup: $Y_{effec.137Cs}$ = 6.32 %; $Y_{effec.148Nd}$ = 1.75 %; $Y_{effec.145+146Nd}$= 6.43 % [11].

Table 6.3.

Uranium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,020(5) *	0,81(3)	0,55(3)	98,62(4)
149	0,020(5)	0,74(1)	0,56(1)	98,68(2)
162	0,020(5)	0,65(2)	0,57(2)	98,76(5)
79	0,010(5)	0,44(2)	0,56(2)	98,99(5)
57	0,011(5)	1,00(5)	0,51(2)	98,48(6)
135	0,025(4)	1,34(2)	0,46(1)	98,18(2)
182	0,014(4)	1,66(2)	0,420(16)	97,91(3)
69	0,018(5)	1,23(3)	0,49(1)	98,26(3)

* the numbers enclosed in brackets here and further (for all the Tables) indicate the global error range of the measurement result for a confidence probability of P=0.95 and refer to the last significant digits.

Table 6.4

Mass fraction of uranium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$

Specimen No.	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,189(47)	7,65(28)	5,19(28)	932,05(37)
149	0,189(47)	6,989(94)	5,289(94)	931,99(38)
162	0,188(46)	6,12(19)	5,37(19)	930,45(35)
79	0,094(68)	4,13(19)	5,26(19)	930,36(35)
57	0,105(47)	9,52(47)	4,85(19)	937,40(40)
135	0,240(38)	12,87(19)	4,419(96)	943,05(42)
182	0,135(36)	16,06(19)	4,06(19)	945,59(42)
69	0,172(46)	11,77(28)	4,692(95)	940,86(42)

Table 6.5

Plutonium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	1,95(19)	54,11(11)	23,04(8)	14,65(12)	6,25(4)
149	1,91(19)	52,36(8)	23,95(8)	14,82(5)	6,96(8)
162	2,35(9)	50,51(11)	24,46(9)	14,89(10)	7,79(10)
79	2,82(10)	49,57(11)	25,92(9)	13,42(10)	8,27(10)
57	1,55(9)	56,84(13)	22,29(14)	14,06(11)	5,26(10)
135	1,02(9)	61,30(9)	21,72(14)	12,34(6)	3,62(5)
182	0,86(9)	67,63(11)	18,72(9)	10,59(10)	2,20(10)
69	1,35(10)	60,44(11)	21,27(9)	13,04(10)	3,90(10)

Table 6.6

Mass fraction of plutonium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	0,227(24)	6,308(14)	2,686(10)	1,708(12)	0,728(5)
149	0,228(23)	6,246(9)	2,857(9)	1,768(20)	0,830(9)
162	0,280(28)	6,019(8)	2,915(12)	1,775(20)	0,928(12)
79	0,329(33)	5,785(7)	3,025(13)	1,566(12)	0,965(14)
57	0,164(16)	6,019(8)	2,361(15)	1,489(12)	0,557(9)
135	0,0884(88)	5,315(10)	1,883(16)	1,070(5)	0,314(4)
182	0,0733(73)	5,769(9)	1,597(8)	0,903(6)	0,1876(85)
69	0,143(14)	6,408(11)	2,255(13)	1,382(12)	0,413(11)

Table 6.7

Isotopic composition of americium and curium (mass %)

Specimen No.	^{241}Am	^{242m}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm
21	30,96(10)	0,69 (1)	68,34(10)	93,3(46)	6,16(12)	0,54(7)
149	31,98(8)	0,52(1)	67,51(8)	95,4(47)	4,11(11)	0,49(8)
162	36,73(12)	0,20(5)	63,07(12)	94,0(47)	5,55(11)	0,45(8)
79	37,84(10)	0,24 (1)	61,92(10)	94,4(47)	5,28(11)	0,32(8)
57	34,84(5)	0,660(9)	64,50(8)	97,3(48)	2,7(5)	-
135	47,53(7)	1,060(9)	51,41(7)	95,82(48)	3,69(6)	0,49(7)
182	63,74(12)	1,480(7)	34,78(12)	96,16(48)	3,56(7)	0,28(4)
69	40,53(10)	0,97(2)	58,50(10)	93,7(47)	5,75(11)	0,55(6)

Table 6.8

Mass fraction of transplutonium elements isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{237}Np	^{241}Am	^{242m}Am $\cdot 10^3$	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm $\cdot 10^2$	^{246}Cm $\cdot 10^4$
21	1,43 (10)	0,0650 (17)	1,45 (10)	0,1435 (87)	0,0718 (36)	0,473 (9)	4,2 (4)
149	1,46 (10)	0,0672 (14)	1,09 (10)	0,1418 (90)	0,0877 (44)	0,378 (7)	4,5 (4)
162	1,49 (10)	0,0918 (61)	0,50 (6)	0,1576 (63)	0,1222 (61)	0,722 (14)	5,8 (6)
79	1,59 (11)	0,1627 (81)	1,03 (10)	0,266 (13)	0,1888 (94)	1,056 (21)	6,4 (6)
57	1,110 (78)	0,0557 (28)	1,05 (8)	0,1032 (52)	0,0486 (24)	0,135 (3)	-
135	0,780 (56)	0,0380 (19)	0,85 (5)	0,0412 (20)	0,01348 (67)	0,052 (1)	0,68 (7)
182	0,710 (50)	0,0446 (27)	1,04 (10)	0,0243 (12)	0,00675 (33)	0,0250 (5)	0,21 (2)
69	1,030 (71)	0,0486 (24)	1,16 (10)	0,0702 (42)	0,0224 (11)	0,138 (3)	1,32 (13)

Table 6.9

Neodymium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0,66 (2)	21,65 (8)	23,40 (8)	20,14 (9)	18,42 (12)	10,61 (12)	5,12 (10)
149	0,70 (1)	21,31 (16)	23,75 (13)	20,06 (14)	18,48 (10)	10,60 (13)	5,10 (10)
162	0,72 (1)	20,85 (9)	24,18 (9)	19,93 (6)	18,59 (7)	10,61 (11)	5,12 (10)
79	0,77 (1)	19,76 (9)	25,58 (13)	19,64 (10)	18,86 (10)	10,48 (12)	4,91 (10)
57	0,54 (10)	22,66 (12)	22,80 (8)	20,38 (10)	18,22 (7)	10,49 (11)	4,91 (10)
135	0,48 (1)	24,18 (11)	21,43 (10)	20,64 (12)	17,98 (16)	10,43 (12)	4,86 (10)
182	0,32 (1)	25,54 (9)	20,26 (9)	20,90 (6)	17,78 (7)	10,41 (13)	4,80 (10)
69	0,39 (1)	23,71 (9)	21,79 (13)	20,58 (10)	18,08 (10)	10,53 (11)	4,93 (9)

Table 6.10

Mass fraction of neodymium (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0.0294 (9)	0.965 (9)	1.043 (10)	0.898 (9)	0.821 (8)	0.473 (5)	0.228 (2)
149	0.0318 (9)	0.969 (9)	1.080 (11)	0.912 (9)	0.840 (8)	0.482 (5)	0.232 (2)
162	0.0339 (9)	0.981 (9)	1.137 (11)	0.937 (9)	0.874 (8)	0.499 (5)	0.241 (2)
79	0.0386 (9)	0.992 (10)	1.284 (13)	0.986 (9)	0.947 (9)	0.526 (5)	0.246 (2)
57	0.0206 (6)	0.864 (8)	0.869 (8)	0.777 (8)	0.695 (7)	0.400 (4)	0.187 (2)
135	0.0155 (5)	0.779 (8)	0.690 (7)	0.665 (6)	0.579 (6)	0.336 (3)	0.1570 (15)
182	0.00775 (23)	0.618 (6)	0.490 (5)	0.506 (5)	0.430 (4)	0.252 (2)	0.116 (1)
69	0.0131 (5)	0.797 (8)	0.733 (7)	0.692 (7)	0.608 (6)	0.354 (3)	0.166 (2)

Table 6.11

Isotopic composition of cesium and cerium (mass %)

Specimen No.	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	38.93 (14)	3.43 (10)	13.96 (11)	43.68 (18)	43,00 (16)	39,28 (16)	17,71 (10)
149	38.74 (19)	4.25 (10)	13.36 (12)	43.66 (14)	43,01 (45)	39,28 (45)	17,71 (5)
162	39.19 (9)	3.42 (5)	12.79 (7)	44.61 (11)	43,02 (22)	39,29 (22)	17,69 (5)
79	39.37 (10)	3.41 (5)	11.99 (7)	45.23 (11)	42,89 (22)	39,31 (22)	17,80 (5)
57	39.66 (23)	4.27 (5)	14.21 (20)	41.86 (18)	42,89 (20)	39,31 (22)	17,80 (10)
135	39.43 (23)	5.18 (5)	15.17 (20)	40.22 (11)	42,81 (20)	39,27 (22)	17,92 (10)
182	38.63 (9)	4.96 (5)	17.70 (7)	38.71 (11)	42,77 (22)	39,26 (22)	17,97 (10)
69	37.97 (10)	5.97 (5)	15.74 (7)	40.31 (11)	42,89 (22)	39,29 (22)	17,82 (5)

Table 6.12

Mass fractions of cesium and cerium isotopes (kg FP/тU$_{initial}$)

Specimen No.	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	1,328 (46)	0,117 (6)	0,476 (19)	1,490 (50)	1,540 (50)	1,407 (50)	0,634 (51)
149	1,416 (50)	0,155 (7)	0,488 (19)	1,596 (50)	1,558 (50)	1,423 (50)	0,642 (52)
162	1,471 (51)	0,128 (6)	0,480 (18)	1,675 (50)	1,640 (51)	1,498 (60)	0,674 (55)
79	1,462 (50)	0,127 (6)	0,445 (16)	1,680 (67)	1,729 (60)	1,585 (61)	0,718 (56)
57	1,253 (43)	0,135 (6)	0,449 (16)	1,323 (53)	1,285 (53)	1,178 (50)	0,533 (50)
135	1,078 (38)	0,142 (7)	0,415 (17)	1,100 (44)	1,095 (44)	1,004 (50)	0,458 (37)
182	0,848 (34)	0,109 (5)	0,389 (16)	0,850 (40)	0,832 (40)	0,764 (38)	0,350 (35)
69	1,110 (36)	0,174 (8)	0,460 (17)	1,178 (47)	1,149 (46)	1,053 (53)	0,477 (38)

Table 6.13

Fuel burnup (kg FP/т U$_{initial}$)

Specimen No.	$^{145+146}$Nd	^{148}Nd	^{137}Cs	Weighted average
21	41,5 (12)	41,55 (83)	41,6 (15)	41,5 (15)
149	41,6 (14)	42,02 (84)	42,1 (16)	41,9 (15)
162	43,8 (15)	44,27 (88)	44,2 (16)	44,2 (14)
79	46,2 (16)	46,24 (94)	46,6 (17)	46,3 (14)
57	36,2 (12)	36,08 (72)	36,4 (14)	36,2 (12)
135	30,25 (91)	30,06 (60)	29,20 (89)	29,90 (91)
182	23,12 (76)	22,65 (45)	23,23 (77)	22,86 (72)
69	31,4 (11)	31,11 (62)	31,9 (11)	31,32 (98)

Table 6.14

Burnup of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission fractions in total burnup

Parameter	Fuel rod No.65 Specimen No. 21		Fuel rod No.67 Specimen No.149		Fuel rod No.68 Specimen No. 62		Fuel rod No.69 Specimen No. 79	
	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %
F_5	22,07	53,66	22,55	53,71	23,22	53,03	25,05	54,51
F_8	4,52	11,00	4,62	11,00	4,82	11,02	5,05	11,00
F_9	12,67	30,82	12,83	30,56	13,52	30,89	13,55	29,48
F_1	1,86	4,52	1,98	4,71	2,21	5,06	2,30	5,01
F_T	41,12		41,98		43,77		45,95	
Fluence, cm $^{-2}$, 10^{21}	2,70		2,86		3,09		3,995	
Flux, 10^{13} cm -^{2} s $^{-1}$	2,819		2,986		3,229		3,828	
$F_{weighted}$ FP, kg/t U	41,5		41,9		44,2		46,3	

Table 6.14 (continuation)

Burnup of ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu and ^{241}Pu isotopes and their fission fractions in total burnup

Parameter	Fuel rod No.65 Specimen No. 21		Fuel rod No.67 Specimen No.149		Fuel rod No.68 Specimen No. 62		Fuel rod No.69 Specimen No. 79	
	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %	Burnup kg/t U	Fission fraction q_I, %
F_5	20,75	57,78	17,99	62,41	15,31	64,50	18,75	58,74
F_8	3,92	10,92	3,12	10,83	2,56	10,79	3,48	10,90
F_9	9,91	27,60	6,96	24,15	5,42	22,82	8,70	27,27
F_1	1,33	3,70	0,75	2,61	0,45	1,88	0,98	3,08
F_T	35,91		28,82		23,73		31,92	
Fluence, cm $^{-2}$, 10^{21}	2,328		1,794		1,396		1,936	
Flux, 10^{13} cm $^{-2}$ s $^{-1}$	2,429		1,872		1,457		2,021	
$F_{weighted}$ FP, kg/t U	36,2		29,90		22,86		31,32	

Measurement of fission products contents

The schemes and procedures described in paper [7] were used as the basis for separation of individual fractions to perform subsequent γ-spectrometry, spectrophotometry and mass spectrometry when nuclide-FP contents were measured. Some changes were introduced in the radiochemical separation procedure of rare earths.

The rare earths (Nd, Eu, Sm, Gd) were separated in the columns with a volume of 0.75 ml. They were filled with the Dawex anionite 1×8 (Serwa) of the grain size 200-400 mesh. Nd, Eu, Sm and Gd were sorbed from the nitric acid solution at 8 mole/l concentration in absolute methyl alcohol. Eu, Sm and Gd were separated by elution with the nitric acid solution at $2.0 \cdot 10^{-2}$ mole/l concentration in absolute methyl alcohol. Nd was eluted with the nitric acid solution at $3.0 \cdot 10^{-3}$ mole/l concentration in absolute methyl alcohol. The extracted fractions of Nd, Eu, Sm and Gd were evaporated and sent for mass-spectrometer measurements of isotopic composition.

The content of Gd, Eu and Sm was measured in the fuel specimen solution using isotopic dilution. Standard solutions of these elements were used as tracers (a complex tracer [7,11]). They were prepared from the specimens of natural isotope composition. A radiochemical extraction of Nd, Eu, Sm and Gd from the mixture of fuel specimen solution aliquots and standard tracer solutions to perform mass spectrometry was similar to procedures used in isotope composition measurements of these elements.

^{95}Mo, ^{101}Ru, ^{109}Ag and $^{105,108}Pd$ mass fractions were measured by the isotopic dilution. The standard tracer solutions were prepared from molybdenum, ruthenium, silver and

palladium specimens of natural isotope composition. When the ^{99}Tc content was measured, a standard solution was made of technetium specimen where the ^{98}Tc portion made up 12 %. Such technetium specimen (12% ^{98}Tc) was produced according to the reaction (n,2n) in the course of ^{99}Tc irradiation in the nuclear reactor.

Although the analytical capabilities of this procedure are good, the data on ^{101}Ru content are of evaluation character only. The reason is that some ruthenium can be lost in dissolution of fuel specimens due to a very high volatility of this element. It was difficult to process the measured data because of the complex chemical composition that results in difficulties associated with chemical separation of elements and presence of a great number of isobar lines in the mass region of the examined nuclides. That's why we consider the obtained mass values of ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag and ^{105,108}Pd to be evaluation data.

The ^{103}Rh mass fraction wasn't measured because of the fact that its portion is 100% in the natural isotope composition (monoisotope). ^{242}Cm, ^{243}Cm and ^{244}Pu were also analyzed. ^{242}Cm was nearly subjected to a total decay because there were 28 half lives of ^{242}Cm from the date of the FA discharge from the reactor and radiochemical analysis. ^{243}Cm and^{244}Pu contents in fuel of specimens were lower than the detection limits of the techniques used for curium and plutonium measurements.

Results of measurements are included in Tables 6.15-6.19 provided with all necessary comments and given for the end of irradiation period.

Table 6.15

Samarium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	147	148	149	150	151	152	154
182	37,84 (12)*	13,33 (8)	0,46 (1)	30,55 (8)	1,67 (2)	12,68 (9)	3,47 (7)
135	34,21 (12)	15,71 (10)	0,40 (1)	32,07 (9)	1,48 (3)	12,30 (8)	3,83 (6)
69	33,48 (14)	16,19 (10)	0,39 (1)	32,38 (8)	1,44 (2)	12,22 (8)	3,90 (6)
57	30,96 (12)	17,84 (11)	0,35 (1)	33,43 (9)	1,31 (2)	11,95 (8)	4,16 (6)
21	28,23 (10)	19,64 (10)	0,31 (1)	34,57 (10)	1,16 (2)	11,67 (8)	4,42 (6)
149	28,02 (12)	19,77 (12)	0,30 (1)	34,66 (8)	1,15 (2)	11,66 (9)	4,44 (7)
162	26,83 (10)	20,55 (12)	0,29 (1)	35,16 (9)	1,09 (2)	11,52 (9)	4,56 (7)
79	25,75 (10)	21,26 (11)	0,27 (1)	35,61 (8)	1,03 (2)	11,41 (9)	4,66 (8)

* - the numbers enclosed in brackets here and further (for all the Tables) indicate the global error range of the measurement result for a confidence probability of P=0.95 and refer to the last significant digits.

Table 6.16

Mass fraction of samarium isotopes (kg FP/tU$_{initial}$)

Specimen No.	147	148	149	150	151	152	154
182	0.2543 (46)	0.0896 (16)	0.00309 (11)	0.2053 (37)	0.01122 (20)	0.0852 (15)	0.0233 (12)
135	0.2565 (47)	0.1178 (25)	0.00299 (11)	0.2405 (40)	0.01110 (20)	0.0922 (16)	0.0287 (15)
69	0.2630 (47)	0.1272 (23)	0.00306 (10)	0.2544 (46)	0.01131 (21)	0.0960 (17)	0.0306 (17)
57	0.2692 (50)	0.1551 (28)	0.00304 (10)	0.2907 (50)	0.01139 (22)	0.1039 (18)	0.0362 (20)
21	0.2776 (50)	0.1932 (33)	0.00305 (10)	0.3399 (55)	0.01148 (25)	0.1148 (20)	0.0435 (22)
149	0.2980 (52)	0.2103 (38)	0.00319 (13)	0.3686 (66)	0.01223 (22)	0.1240 (22)	0.0472 (24)
162	0.2882 (52)	0.2208 (41)	0.00312 (10)	0.3777 (60)	0.01171 (22)	0.1237 (22)	0.0490 (26)
79	0.2804 (51)	0.2315 (42)	0.00294 (10)	0.3878 (70)	0.01122 (20)	0.1243 (22)	0.0507 (25)

Table 6.17

Europium isotopic composition (mass %)

Specimen No.	151	153	154	155
182	1.87 (2)	81.24 (10)	11.78 (8)	5.11 (7)
135	1.54 (2)	80.46 (10)	13.13 (8)	4.87 (6)
69	1.48 (2)	80.34 (10)	13.38 (9)	4.80 (7)
57	1.24 (2)	79.75 (10)	14.34 (9)	4.67 (7)
21	1.01 (1)	79.10 (10)	15.36 (10)	4.53 (7)
149	0.99 (1)	79.06 (11)	15.40 (10)	4.55 (6)
162	0.88 (1)	78.84 (9)	15.85 (10)	4.43 (6)
79	0.79 (1)	78.58 (10)	16.24 (10)	4.39 (6)

Table 6.18

Mass fraction of europium isotopes (kg FP/tU$_{initial}$)

Specimen No.	151	153	154	155
182	0.000460 (18)	0.0199 (10)	0.00289 (14)	0.00125 (11)
135	0.000429 (16)	0.0224 (11)	0.00366 (18)	0.00135 (12)
69	0.000409 (16)	0.0222 (11)	0.00370 (18)	0.00133 (12)
57	0.000338 (14)	0.0217 (11)	0.00390 (19)	0.00127 (11)
21	0.000283 (12)	0.0222 (11)	0.00431 (21)	0.00127 (11)
149	0.000268 (12)	0.0214 (11)	0.00416 (21)	0.00123 (11)
162	0.000228 (10)	0.0205 (10)	0.00412 (21)	0.00115 (10)
79	0.000153 (6)	0.0152 (7)	0.00314 (16)	0.00085 (7)

Table 6.19

Mass fraction of nuclides-fission products (kg FP/$tU_{initial}$)

Specimen No.	^{95}Mo	^{99}Tc	^{101}Ru	^{105}Pd	^{108}Pd	^{109}Ag	^{155}Gd
182	0.533 (96)	0.55 (10)	0.531 (96)	0.261 (47)	0.064 (12)	0.0299 (84)	0.000746 (63)
135	0.69 (12)	0.72 (13)	0.70 (13)	0.348 (63)	0.091 (16)	0.038 (11)	0.000960 (82)
69	0.72 (13)	0.75 (14)	0.73 (13)	0.364 (66)	0.099 (17)	0.041 (11)	0.001000 (85)
57	0.78 (14)	0.82 (15)	0.82 (15)	0.439 (79)	0.115 (21)	0.046 (13)	0.001140 (97)
21	0.92 (17)	0.96 (17)	0.98 (18)	0.529 (96)	0.147 (26)	0.054 (15)	0.00134 (12)
149	0.93 (17)	0.96 (17)	0.99 (18)	0.552 (99)	0.155 (28)	0.054 (15)	0.00140 (13)
162	0.97 (17)	1.00 (18)	1.04 (19)	0.59 (11)	0.171 (31)	0.055 (16)	0.00143 (13)
79	1.01 (18)	1.02 (18)	1.08 (19)	0.58 (11)	0.166 (30)	0.051 (14)	0.00142 (13)

7. Analysis of nuclide composition measurement results

At first, two fissile nuclide like ^{235}U and ^{238}U are present in fuel only. The ^{238}U contribution in fuel burnup is insignificant and it makes up 10-11% within the examined burnup range. As the burnup level increases, the ^{235}U content decreases and it makes up ~17% in the initial one at a fuel burnup of 44,2 kg/t $U_{initial.}$ As the fuel burnup increases, the ^{236}U fraction increases in fuel as well. Fig. 7.1 illustrates changes in ^{235}U and ^{236}U contents as a function of fuel burnup.

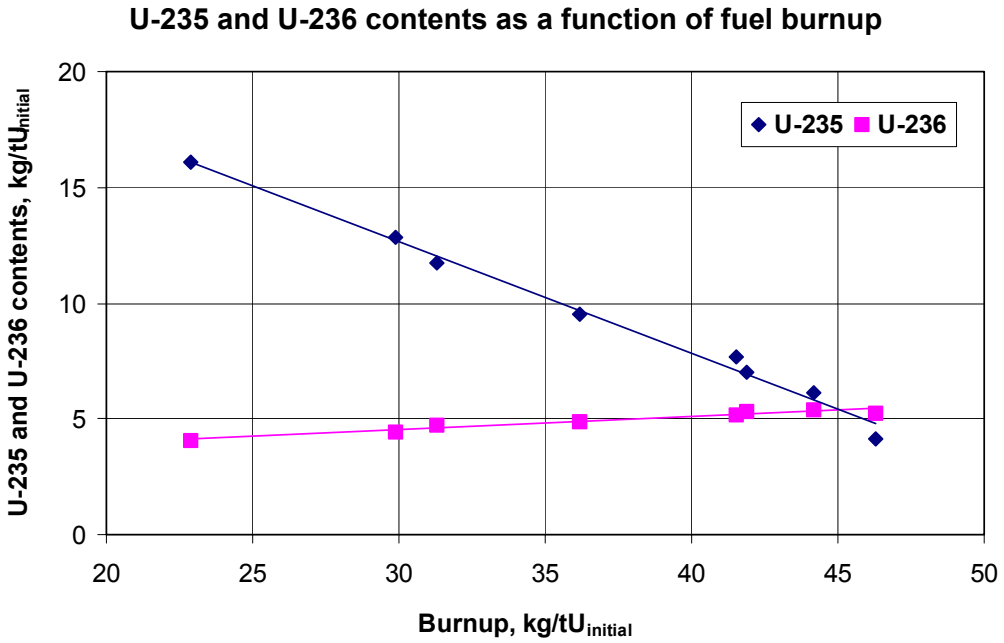


Fig.7.1

The ^{239}Pu is accumulated in a great amount at a burnup of ~ 20 kg/t $U_{initial}$ and thereafter it becomes one of the main fissile nuclides. The ^{239}Pu accumulation reaches its maximum value (6÷7 kg/t $U_{initial}$) at a burnup of ~ 40 kg/t $U_{initial}$ and on further increasing it decreases smoothly (Fig.7.2). The content of other plutonium isotopes increases also along with the ^{239}Pu content increase (Fig.7.2 and 7.3).

The total accumulation of plutonium isotopes makes up ~12-13 kg/t $U_{initial}$ at a burnup of ~ 40 kg/t $U_{initial}$ and it doesn't change significantly on further burnup increase. The plutonium accumulation rate decreases primarily due to increase in fissioned plutonium fraction. The change in the sum of accumulated and burned plutonium bears a direct relationship to the fuel burnup (Fig.7.4) that allows the plutonium contribution in fuel burnup to be predicted when the irradiation time increase. The ^{239}Pu contribution in the total burnup makes up ~30 %, ^{235}U - ~ 54 % and ^{241}Pu - ~5 % at a burnup of 46.3 kg/t $U_{initial}$ (Fig.7.5).

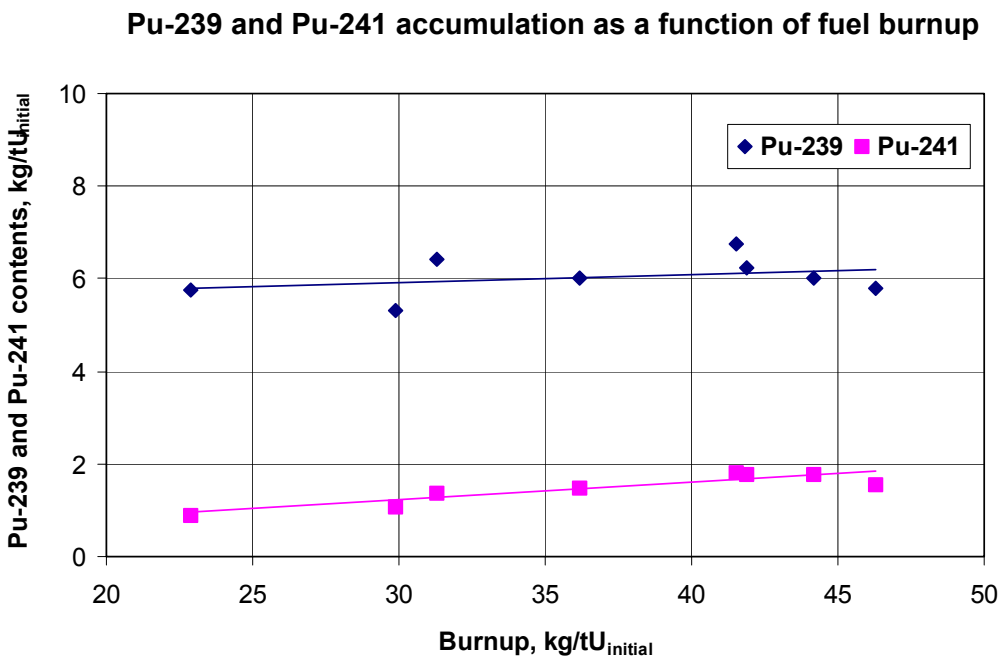

Pu-239 and Pu-241 accumulation as a function of fuel burnup
Pu-239 and Pu-241 contents, kg/tU initial
Burnup, kg/tU initial
Pu-239
Pu-241
0
2
4
6
8
10
20
25
30
35
40
45
50

Fig.7.2

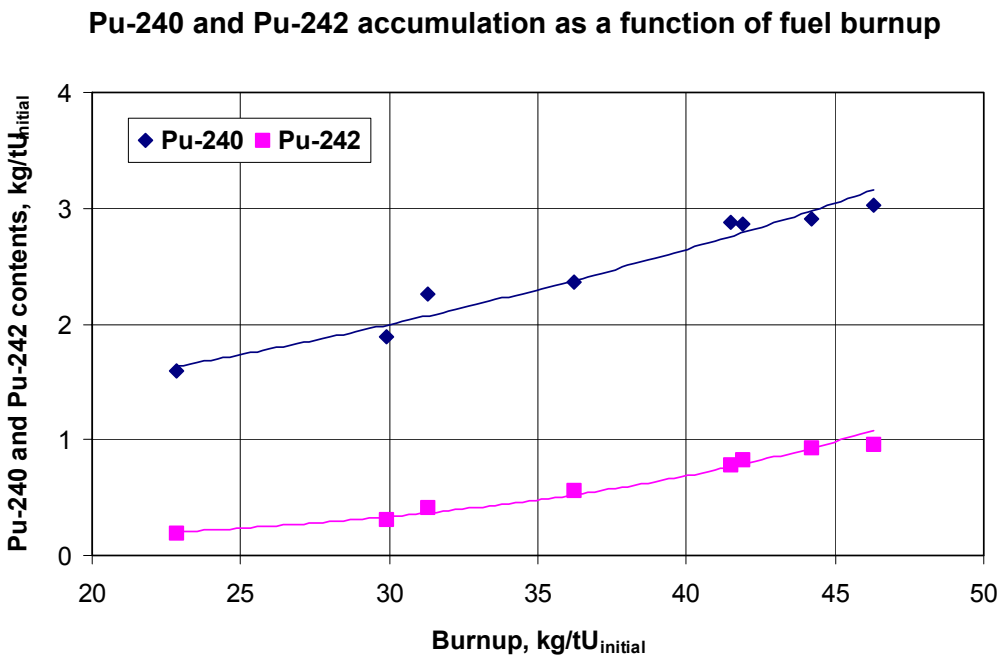

Pu-240 and Pu-242 accumulation as a function of fuel burnup
Pu-240 and Pu-242 contents, kg/tU initial
Burnup, kg/tU initial
Pu-240
Pu-242
0
1
2
3
4
20
25
30
35
40
45
50

Fig.7.3

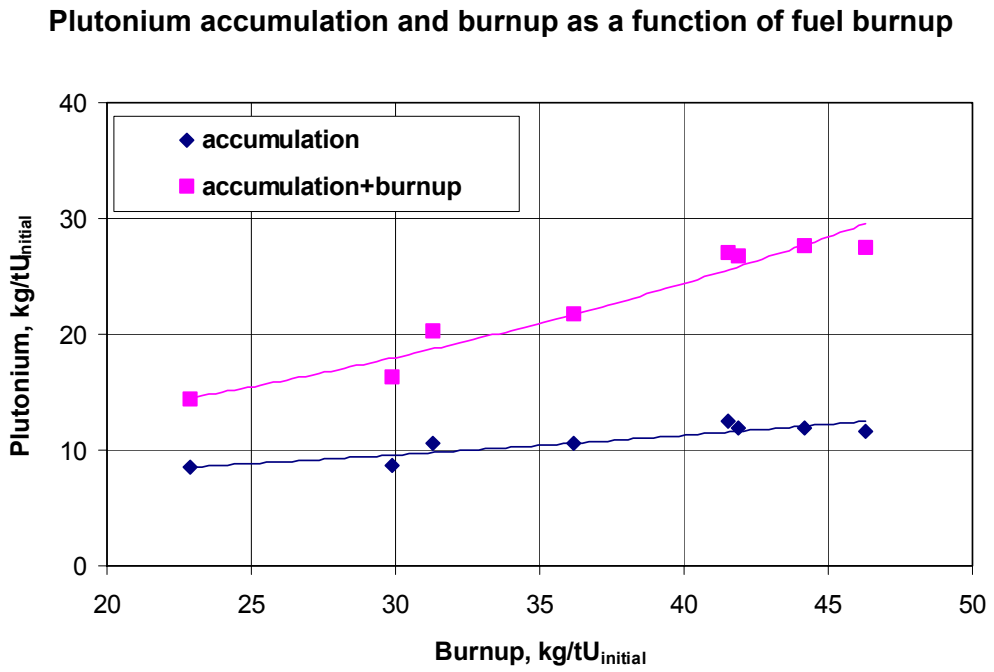

Plutonium accumulation and burnup as a function of fuel burnup
accumulation
accumulation+burnup
Plutonium, kg/tU$_{initial}$
Burnup, kg/tU$_{initial}$
0
10
20
30
40
20
25
30
35
40
45
50

Fig.7.4

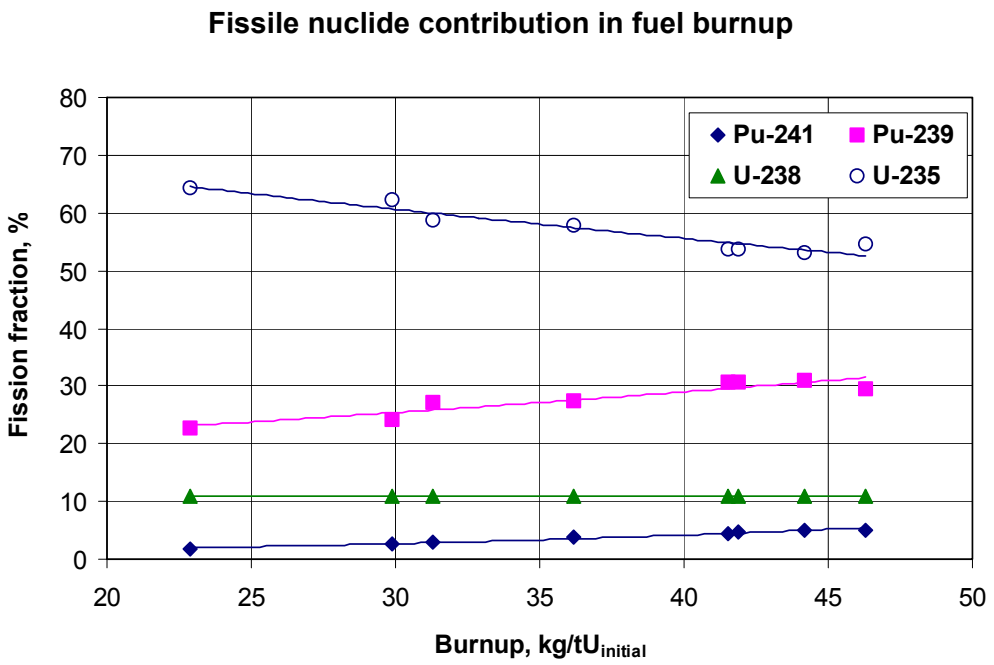

Fissile nuclide contribution in fuel burnup
Pu-241
Pu-239
U-238
U-235
Fission fraction, %
Burnup, kg/tU$_{initial}$
0
10
20
30
40
50
60
70
80
20
25
30
35
40
45
50

Fig.7.5

The accumulation of transplutonium elements increases significantly at fuel burnups higher than 35 kg/t $U_{initial.}$ So the accumulation of ^{244}Cm makes up ~0.189 kg/t $U_{initial}$, ^{243}Am - ~0.270 kg/t $U_{initial}$ and ^{237}Np ~ 1.5 kg/t $U_{initial}$ at a fuel burnup of 46.3 kg/t U_{inital} (Fig.7.6 and 7.7).

Accumulation of transplutonium elements isotopes as a function of fuel burnup

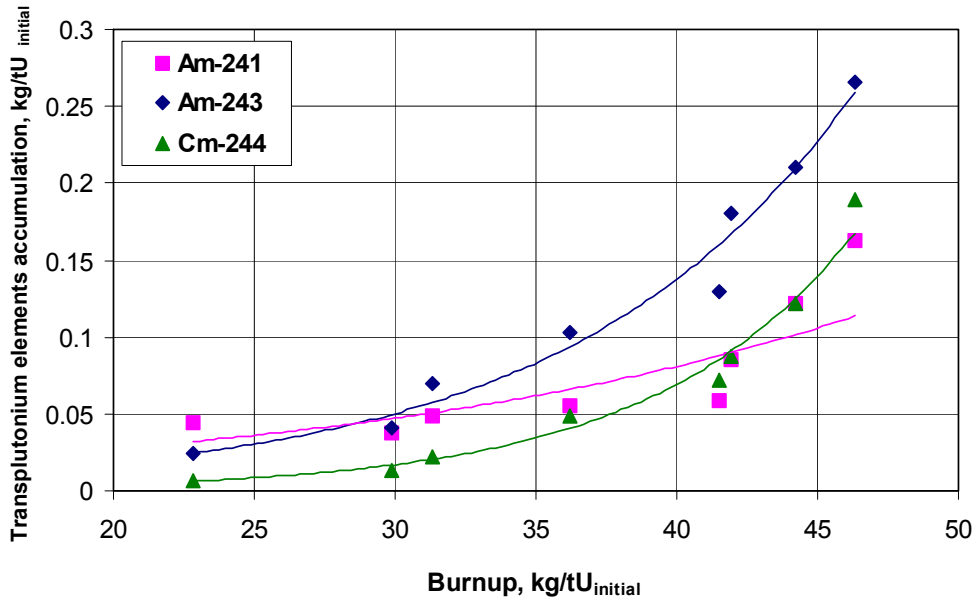


Fig.7.6

Transplutonium elements accumulation as a function of fuel burnup

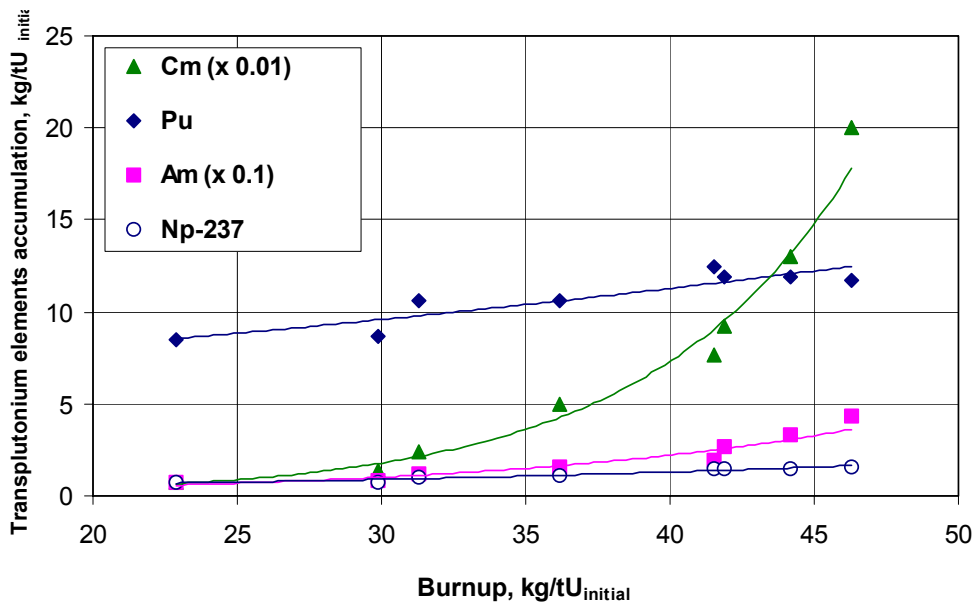


Fig.7.7

Neodymium isotopes are used as burnup monitor for burnup measurements. There is a contamination hazard when chemical operations are carried to prepare samples for mass-spectrometer measurements. The relationship between the ^{142}Nd content and fuel burnup is

used for check purposes (Fig.7.8). This isotope is not produced in fission but it is accumulated as a result of neutron capture with the ^{141}Pr nuclei. The deviation of the results from a linear relationship allows for assumption that some natural neodymium has found its way into the sample.

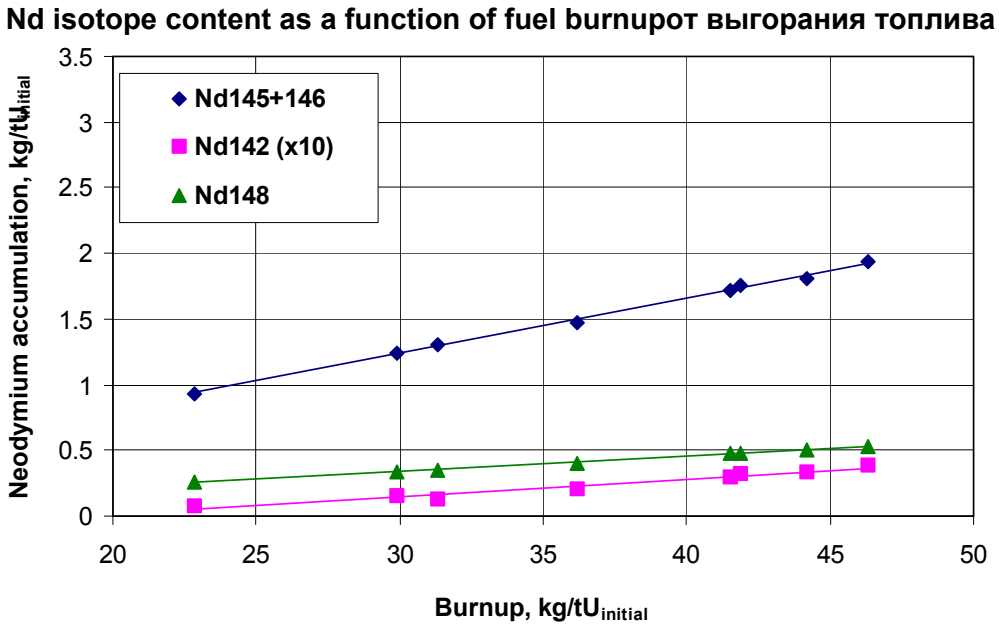


Fig.7.8

The ^{148}Nd and $^{145+146}$Nd isotopes are often used as burnup monitors. The use of ^{145}Nd and ^{146}Nd couple depends upon the necessity of neutron capture accounting with the ^{145}Nd nuclei. As the burnup increase, the ratio ^{145}Nd/^{146}Nd decreases (Fig.7.9). It is possible to use the ^{145}Nd/^{146}Nd ratio for the burnup calculation due to the linear character of this relationship.

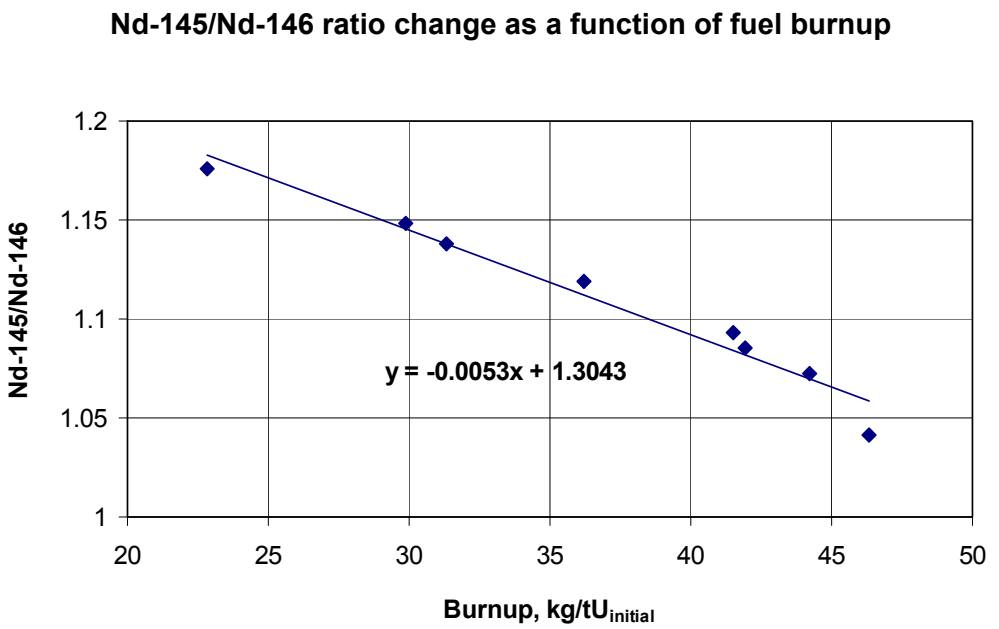


Fig.7.9

Conclusion

Analysis of technical and operating characteristics of the VVER-440 fuel assembly was performed in the framework under task 1 (Project 2670p) in order to select fuel rods for non-destructive examinations, fuel burnup measurement and nuclide composition analysis. The following activities were carried out based on the obtained results [1]:

- Fuel assembly 13626135 with the initial fuel enrichment of 3.6% U-235 that was operated in the forth power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles up to a burnup of ~38.5 MWd/kgU was selected for examination.
- Four fuel rods (No.65, 67, 68 and 69) were selected for non-destructive and destructive examinations. Fuel rod 69 had the maximum fuel burnup for this type of fuel assembly. Fuel rod 65 had the minimum burnup. Fuel rods 67 and 68 had the intermediate burnups.
- Sampling coordinates was established for 8 fuel specimens to make the radiochemical analysis. Fuel specimens are taken on the coordinates of ~100, ~1000 and ~2150mm from the lower part of fuel rods 65 and 69. Fuel specimens are taken on the coordinate ~1000mm from the lower part of fuel rods 67 and 68.

2. The initial condition of the VVER-440 FA components was described in the framework under Task 2. Pellet geometry, nuclide and chemical compositions of fuel as well as parameters of fuel rods and fuel assembly as a whole are given here [2].

3. Neutron-physical characteristics of the reactor core of the 4th power unit (Novovoronezh NPP) were calculated in the framework under Task 3. Characteristics of 4 fuel rods under examination are given in details (burnup, linear power and cladding temperature) [3].

4. In the framework under Task 4 presented are the main results of post irradiation examinations for four fuel rods of VVER-440 fuel assembly No.13626135. Their conditions were compared with the parameters of other fuel rods in the fuel assembly (FA). The appropriateness of their selection for destructive examination in spent fuel isotopic composition was evaluated. [4].

5. In the framework under Task 5 described briefly is the fuel sampling technology to perform radiochemical analysis for fission product and heavy atom continents. The cutting procedures of fuel rods selected from VVER-440 FA No.13626135 are also presented here. The report also includes brief characteristics of fuel specimens and their marking. [6].

6. The techniques used for a radiochemical analysis of fuel are presented in the framework under Task 6. The present report presents the calculation results of isotopic composition and U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, and Ce contents. Calculated was also burnup in the VVER-440 spent fuel specimens using heavy atom method and fission products. A quantitative analysis for ^{237}Np content was carried out on these specimens. Presented here are the data on the Eu, Sm, Gd, ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag, ^{101}Ru, ^{103}Rh and ^{105,108}Pd nuclide content measurements in the examined specimens. The nuclide contents are shown as a function of fuel burnup [7,11].

References

1. Selection methodology of fuel assemblies, fuel rods and specimens for measurements of nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup. Interim Progress Report, Task No.1. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.

2. Initial condition of VVER-440 working assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Interim Progress Report, Task 2. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.

3. Irradiation history ofVVER-440 working assembly No.13626135 operated up to the average burnup of 38.5MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP during 4 fuel cycles. Interim Progress Report, Task 3. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.

4. Nondestructive post-irradiation examinations of fuel rods ofVVER-440 fuel assembly No 13626135 operated up to the average burnup of 38.5 MWd/kgU in the 4th power unit of Novovoronezh NPP. Interim Progress Report, Task 4. Burnup Credit. Project (2670p), 2003.

5. Length measurement procedure of fuel rods. Registration No.74-96, Dimitrovgrad, 1996

6. Selection and preparation of samples for radiochemical analysis of VVER-440 fuel isotopic composition (FA No.13626135). Interim Progress Report, Task 5. Burnup Credit Project (2670p), 2003.

7. Techniques and equipment to determine nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction in fuel samples. Interim Progress Report, Task 6 (part 1). Burnup Credit Project (2670p), 2003.

8. ASTM E-244-80 Standard Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Mass Spectrometric Method).

9. Nuclear Data Science and Tehnology, vol.1. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1973(621).

10. Neutron Gross Section. Academic Press. JNC., vol.2, 1984.

11. Radiochemical examination of nuclide composition, isotopic mass and fuel burnup fraction in specimens. Interim Progress Report, Task 6 (part 2). Burnup Credit Project (2670p), 2004.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель проекта
_____А.В.Смирнов
"____"_____2003 г.

Методология выбора ТВС, твэлов и образцов для определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива

Промежуточный отчет по задаче №1
проекта VVER Burnup Credit (2670р)

Димитровград, 2003 г.

Одна из возможностей повышения эффективности обращения с отработавшим топливом заключается в использовании кредита выгорания.

Кредит выгорания определяется, как возможность использовать особенности отработавшего топлива, связанные с изменением изотопного состава и соответствующим уменьшением реактивности.

Комплекс экспериментальных работ, проводимых в рамках данного проекта, направлен на определение нуклидного состава и выгорания топлива ВВЭР-440 с целью дальнейшей верификации компьютерных кодов для расчета накопления/распада и реактивности.

Реферат

Отчет содержит 24 страницы, 8 рисунков, 7 таблиц, 3 библиографических ссылки.

Ключевые слова: проект VVER Burnup Credit, отработавшее топливо ВВЭР-440, определение выгорания, нуклидного состава и массы изотопов.

Изложена методология выбора ТВС, твэлов и образцов топлива ВВЭР-440 на радиохимические и масс-спектрометрические исследования с целью получения сведений о выгорании и нуклидном составе для использования их в задачах, связанных с кредитом выгорания.

Содержание

Введение..... 5

1. Выбор ОТВС ВВЭР-440 для исследований..... 8

2. Основные характеристики выбранной ОТВС..... 9

3. Отбор твэлов..... 12

4. Подготовка образцов топлива..... 16

Заключение..... 18

Список источников..... 19

Введение

ВВЭР-440 – основной тип ядерного реактора, который широко используется на АЭС в странах Восточной Европы. Таблица 1 иллюстрирует количество действующих энергоблоков с реакторами такого типа в рассматриваемом регионе.

Таблица 1

Действующие реакторы ВВЭР-440 в странах Восточной Европы

Страна	Место	Блок	Год пуска
Болгария	Козлодуй	1	1974
		2	1975
		3	1981
		4	1982
Чехия	Дукованы	1	1985
		2	1986
		3	1987
		4	1988
Венгрия	Пакш	1	1983
		2	1984
		3	1986
		4	1987
Финляндия	Ловииса	1	1977
		2	1981
Словакия	Богунице	1	1981
		2	1981
		3	1985
		4	1985
	Моховце	1	1986
Армения	Мезамор	2	1985
Украина	Ровно	1	1981
		2	1982
Россия	Нововоронеж	3	1972
		4	1973
	Полярные Зори	1	1973
		2	1875
		3	1982
		4	1984

За годы эксплуатации накопилось большое число отработавших ТВС ВВЭР-440, обращение с которыми является заметной статьей затрат в ядерной энергетике каждой из этих стран. Поэтому увеличение загрузки отработавшего топлива в промежуточные водные и сухие хранилища, транспортные контейнеры или перерабатывающее оборудование может дать значительный экономический эффект, повысить безопасность обращения с отработавшим топливом и снизить неблагоприятное воздействие на окружающую среду. В связи с вышеизложенным, возникает необходимость повышения емкости хранилищ отработавшего ядерного топлива ВВЭР-440, спроектированных в 60-70х годах, за счет более плотного, по сравнению с проектным, размещения в них ОТВС, при безусловном выполнении всех требований безопасности [1].

Выполнение ужесточившихся за последнее время требований по безопасности АЭС также приводит к необходимости уплотненного хранения топлива. Так, в соответствии с ПНАЭ-Г-14-029-91 [2], в бассейне выдержки АЭС необходимо иметь резервные места для выгрузки в любой момент аварийной активной зоны или ее части, чего не было предусмотрено ранее.

Бассейн выдержки отработавших ТВС ВВЭР-440 состоит из двух отсеков. В одном располагаются двухъярусные стеллажи, в которых ТВС обогащением до 3.6% размещаются с шагом 225 мм, второй (универсальное гнездо) предназначен для установки 30-местного чехла с ТВС или контейнера ТК-6 для транспортировки. При хранении топлива обогащением 4.4% приняты дополнительные меры безопасности – оно чередуется с топливом меньшего обогащения. Предложены способы уплотненного хранения в стеллажах с шагом 160-170 мм ТВС обогащением 4.4% в чехлах из бористой стали, однако на практике они не реализованы. Появление новых типов ТВС с уран-гадолиниевым топливом и циркониевыми дистанционирующими решетками требует дополнительного анализа ядерной безопасности. Дополнительной мерой безопасности является гомогенный поглотитель нейтронов в виде раствора борной кислоты концентрацией 12-16 г/л.

В итоге многолетних исследований и анализа ядерной безопасности хранилищ отработавшего топлива можно выделить наиболее важные проблемы, которые необходимо решать:

- выбор и определение погрешностей методов расчета $K_{эф}$;
- обоснование ядерной безопасности при проектных и запроектных авариях (уменьшение плотности воды, падение и повреждение ТВС и т.д.);
- необходимость и возможность экспериментального определения подкритичности хранилищ, глубины выгорания топлива;

- анализ новых типов топлива (уран-гадолиниевого, уран-плутониевого), обоснование безопасности при хранении новых типов ТВС.

Как правило, возможность и степень уплотнения хранилищ в основном зависит от шага расположения ТВС, т.е. требований ядерной безопасности.

Важной проблемой является определение норм хранения и транспортировки с учетом выгорания топлива. При решении этой проблемы следует учитывать пять основных факторов:

- погрешность расчета изотопного состава топлива;
- погрешность расчета $К_{эф}$, которая определяется сложным составом топлива, содержащего смесь урана, плутония, актиноидов;
- влияние на $К_{эф}$ продуктов деления;
- неравномерное распределение делящихся материалов по высоте ТВС;
- история облучения ТВС.

Реактивность облученного топлива зависит от:

- начальной загрузки делящегося топлива и его распределения по ТВС;
- начального количества выгорающего поглотителя и его распределения по ТВС;
- истории эксплуатации топлива;
- скорости образования плутония и продуктов деления;
- скорости деления, распада продуктов деления и выгорающего поглотителя;
- распределения выгорания и трансурановых элементов, а также продуктов деления в ТВС.

В работе [3] выполнена расчетная оценка вклада в $К_{эф}$ нуклидов, которые содержатся в отработавшем топливе ВВЭР с глубиной выгорания 30 МВт·сут/кгU, и временем выдержки 1-5 лет. Нуклиды были разделены на следующие группы:

- основные актиноиды (делящиеся нуклиды урана и плутония);
- второстепенные актиноиды (нейтронопоглощающие нуклиды Pu, Am и Np).

Продукты деления были также разделены на следующие группы:

- основная группа продуктов деления, содержащая нуклиды с большим сечением захвата нейтронов;
- второстепенная, содержащая остальные продукты деления.

Классификация актиноидов и продуктов деления, используемых в кодах, представлена в табл.2.

Таблица 2

Актиноиды и продукты деления, используемые в расчетных кодах

Главные актиноиды	Второстепенные актиноиды
U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241	Pu-238, Pu-242, Am-241, Am-243, Np-237
Главные продукты деления	Второстепенные продукты деления
Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Sm-147, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Nd-143, Nd-145, Eu-153, Gd-155	все другие

Примечание: представленные в табл.2 нуклиды входят в документ NUREG/CR-6665

Одной из основных возможностей обоснования безопасности повышения плотности упаковки при обращении с отработавшим топливом является учет кредита выгорания. Кредит выгорания - это возможность использования особенностей отработавшего топлива, связанная с изменением его исходного изотопного состава и соответствующего уменьшения реактивности.

Для расчета возможного повышения плотности упаковки отработавшего топлива с учетом кредита выгорания необходима верификация расчетных кодов с использованием начальных характеристик топлива, истории эксплуатации и распределения нейтронопоглощающих и нейтроноизлучающих нуклидов по объему ТВС.

Начальный изотопный состав топлива должен быть известен с хорошей точностью. История эксплуатации берется из реакторных данных. Большие вариации историй облучения делают необходимым консервативный подход, когда выбираются также режимы облучения, чтобы реактивность была наибольшей.

Все это накладывает определенные условия на выбор ОТВС, твэлов и образцов для проведения специальных экспериментов по устранению неопределенностей в кодах по расчету реактивности отработавшего топлива ВВЭР-440.

1. Выбор ОТВС ВВЭР-440 для исследований

В настоящее время в хранилищах отработавшего топлива накопилось большое количество ОТВС ВВЭР-440 штатной конструкции с 3.6% обогащения по U-235, отработавших до выгорания 40 МВт·сут/кгU. Поэтому основным критерием отбора ОТВС на исследования нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания является соответствие ее характеристик вышеперечисленным параметрам.

Кроме того, отработавшая сборка должна быть выбрана из числа имеющихся в наличии ОТВС ВВЭР-440, прошедших процедуру послереакторного контроля состояния, поскольку работы по проекту "VVER Burnup Credit" предусматривают выполнение неразрушающих послереакторных исследований твэлов.

В таблице 3 представлены основные характеристики ОТВС ВВЭР-440, которые прошли послереакторные исследования в радиационной материаловедческой лаборатории ГНЦ РФ НИИАР в 1988-2002 г.г.

Из анализа представленных данных следует, что для исследований нуклидного состава топлива наиболее подходят ОТВС №№135 и 066. Часть перечисленных в таблице сборок с Нововоронежской АЭС имеют слишком низкое выгорание, а в ОТВС с Кольской АЭС использовалось топливо повышенного обогащения.

Необходимость консервативного подхода к оценке кредита выгорания требует выбора для исследований ОТВС, у которой при прочих равных условиях реактивность отработавшего топлива будет максимальной. Реактивность облученного топлива, как известно, зависит от начальной загрузки делящихся нуклидов и истории эксплуатации в реакторе ВВЭР-440, определяющей скорость выгорания, накопление продуктов деления и актиноидов (изотопов урана, плутония и америция).

Таблица 3

Характеристики исследованных ОТВС ВВЭР-440

№ п/п	№ ТВС	Дата изготовления	Дата загрузки	Дата выгрузки	Реактор, блок	Начало исследований	Окончание исследований	Обогащение по U-235, %	Количество ТЦ	Продолжительность эксплуатации, эфф. сут	Средняя уд. энерговыработка на ТВС, МВт·сут/кгU
1	Д11066	01.03.83	06.08.83	23.06.86	Ровенская АЭС-1	01.01.89	30.12.89	3.6	3	857.6	36.8
2	Д11809	01.05.83	11.09.83	06.08.86	Н-Воронежская АЭС-4	01.01.90	22.10.90	3.6	3	994.8	32.8
3	Д15687	01.06.84	25.09.84	06.08.86	Н-Воронежская АЭС-4	01.01.90	16.10.90	3.6	2	605.2	24.2
4	Д19159	01.07.85	02.09.85	16.08.88	Н-Воронежская АЭС-4	01.01.91	01.01.92	3.6	3	989.1	34.1
5	Д26135	01.06.87	13.10.87	04.07.91	Н-Воронежская АЭС-4	01.01.95	01.09.95	3.6	3	1109.7	38.5
6	Д52380	01.02.96	10.06.96	18.06.99	Кольская АЭС-2	01.01.01	01.06.01	4.4	3	649.1	27.6
7	Е22198	01.05.86	24.09.86	01.11.90	Кольская АЭС-3	01.01.94	30.12.94	4.4	4	1259.8	46.2
8	Е22222	01.05.86	24.09.86	25.10.91	Кольская АЭС-3	01.01.94	30.12.94	4.4	5	1564.9	48.2

Поскольку ОТВС №№135 и 066 облучались в реакторе в течение 1109.7 и 857.6 эфф.суток, а темп выгорания в первой (38.5/1109.7=0.034 МВт·сут/кгU/эфф.сут) был значительно ниже, чем во второй (36.8/857.6=0.043 МВт·сут/кгU/эфф.сут), ОТВС №135 и была выбрана для проведения исследований с целью верификации расчетных кодов оценки реактивности облученного топлива ВВЭР-440.

В таблице 4 представлены некоторые результаты послереакторных исследований твэлов этих ОТВС, подтверждающие, что тепловые нагрузки в ОТВС №066 были значительно выше.

Таблица 4

Окисление и размерные изменения оболочечных труб твэлов ОТВС №№135 и 066

Номер ОТВС	Толщина оксидной пленки на оболочке, мкм	Среднее удлинение твэлов, мм	Среднее уменьшение диаметра оболочки, мкм	Зазор "топливо-оболочка", мкм	Наличие гофр на оболочках
135	3-5	6.06	40	50-90	нет
066	12-17	9.07	96	0	есть

Большее окисление, удлинение и усадка оболочечных труб, отсутствие зазора между топливом и оболочкой, наличие гофр – следов взаимодействия топлива с оболочкой на стыках таблеток указывает на то, что удельное энерговыделение в твэлах ОТВС №066 было выше, чем в ОТВС №135.

2. Основные характеристики выбранной ОТВС

Рабочая ТВС №13626135 была изготовлена в июне 1987 г. в соответствии с чертежом 440.01.000-27 и техническими условиями ТУ95.598-79.

В табл.5 приведены основные конструктивные характеристики ТВС и твэлов. Картограмма размещения твэлов по ячейкам дистанционирующих решеток представлена на рис.1. Для изготовления твэлов ТВС №135 использовалась одна партия топлива со средней плотностью 10.5 г/см^3.

Таблица 5

Исходные данные о ТВС №135

Параметр	Значение
1. Исполнение ТВС	440.01.000-27
2. Технические условия	ТУ95.598-79
3. Исполнение чехла ТВС	445.01.001-06
4. Размеры чехловой трубы, мм:	
длина	2725
размер "под ключ"	$144.2^{+1.3}_{-0.5}$
5. Исполнение пучка твэлов	440.01.020-27
6. Исполнение твэлов	440.00.020-02
7. Технические условия на твэлы	440.00.010ТУ
8. Номинальная длина твэла, мм	2558.5
9. Наружный диаметр твэла	$9.1^{+0.1}_{-0.05}$
10. Внутренний диаметр оболочки, мм	$7.72^{+0.08}$
11. Топливная таблетка:	
наружный диаметр, мм	$7.60_{-0.07}$
диаметр центрального отверстия, мм	$1.2^{+0.8}$
высота, мм	8-14
12. Длина топливного сердечника, мм	2420±10
13. Масса топливного сердечника, мм	1087±22
14. Давление гелия в твэле, атм.	5-7

Картограмма размещения твэлов в ТВС №135

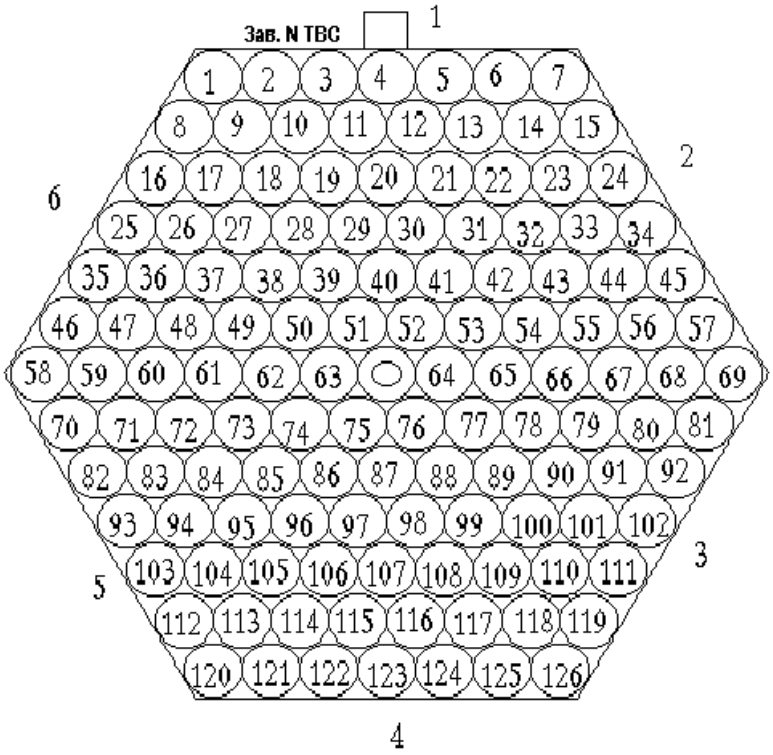


Рис.1

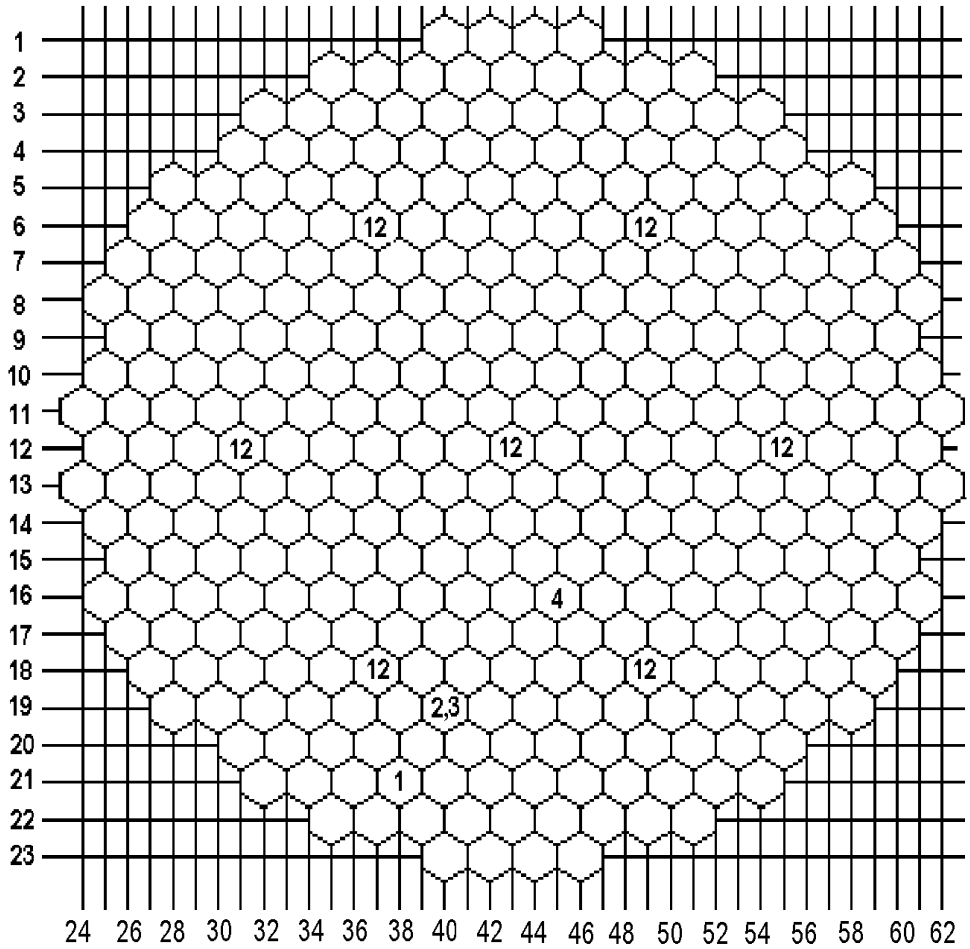
ТВС 135 эксплуатировалась в составе 15-18-ой топливных загрузок активной зоны 4-го блока НВАЭС. В таблице 6 и на рис. 2 представлены данные о топливных циклах и координаты расположения ТВС в активной зоне.

Таблица 6

Длительность топливных циклов и схема движения ТВС 135

Номер топливного цикла	15(1)	16(2)	17(3)	18(4)
Начало Конец	10.87 08.88	10.88 12.89	01.90 05.90	07.90 7.91
Эфф. сутки	296	389.8	98.2	325.1
Ср. выгорание за ТЦ, МВт·сут/кгU	11.0	14.5	3.5	9.5
Ср. выгорание на конец ТЦ, МВт·сут/кгU	11.0	25.5	29.0	38.5
Темп выгорания, МВт·сут/кгU эфф.сут	0.037	0.037	0.036	0.029
Координата ТВС в АЗ	21-38	19-40	19-40	16-45

Размещение ТВС 135
в активной зоне 4-го блока НВАЭС



1 - ячейки, в которых размещались ТВС 135 в 1-4 топливных циклах

12 -регулирующая группа СУЗ

Рис.2

Из анализа данных, представленных в табл.6 и на рис.2, следует, что ТВС №135 работала при одинаковом темпе выгорания в течение первых трех топливных циклов и менее напряженно в 4-м топливном цикле. Ни в одном из топливных циклов она не стояла рядом с кассетами 12-й регулирующей группы СУЗ. По результатам КГО на 4-м блоке НВАЭС и по данным послереакторных исследований сборка не содержала негерметичных твэлов.

3. Отбор твэлов

Отбор четырех твэлов из ОТВС ВВЭР-440 №135 для радиохимических и масс-спектрометрических исследований осуществлялся на основе экспериментально полученных данных по выгоранию топлива:

- один твэл с максимальным выгоранием;
- один твэл с минимальным выгоранием;
- два других твэла имеют промежуточное выгорание.

Выгорание топлива в твэлах выбранной для исследований ОТВС ВВЭР-440 №135 определялось гамма-спектрометрическим методом по накоплению долгоживущего продукта деления Cs-137 путем сравнения с эталоном выгорания – фрагментом штатного твэла ВВЭР, выгорание топлива в котором было определено масс-спектрометрическим методом.

Гамма-спектрометрические исследования твэлов проводились на полупроводниковом Ge(Li) спектрометре. Обработка гамма-спектров, накопление массивов данных и выдача результатов осуществлялись на ЭВМ PDP-11/23 в автоматическом режиме с шагом 10 мм. Перед началом и после окончания измерений проводилась калибровка гамма-спектрометра с помощью эталона выгорания.

Методом гамма-сканирования выгорание топлива определялось в 36-ти диагональных твэлах ОТВС. В табл.7 представлены экспериментальные значения коэффициента аксиальной неравномерности (Kz) и накопления долгоживущего продукта деления Cs-137, а также максимальное и среднее выгорание топлива в твэлах сборки.

Рис.3-4 иллюстрируют характер распределения среднего и максимального выгорания в диагональных и угловых твэлах сборки.

Из анализа представленных данных следует, что максимальное выгорание топлива наблюдается в угловых твэлах первого ряда, промежуточное – во втором ряду, а минимальное – в пятом ряду твэлов ОТВС №135. Исходя из этих соображений были выбраны четыре твэла для исследований и отбора образцов:

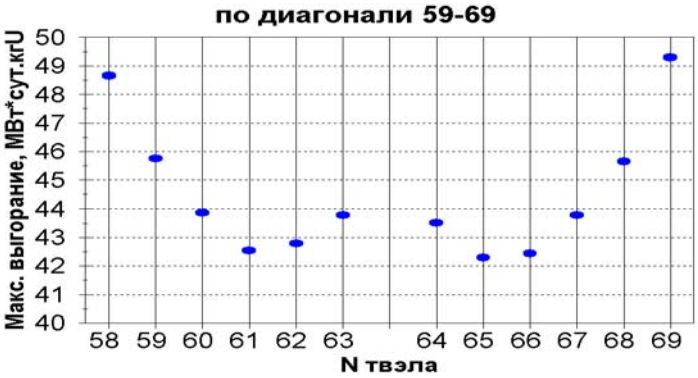
- твэл 69 с максимальным выгоранием топлива 49.3 МВт·сут/кгU;
- твэл 65 с минимальным выгоранием топлива 42.3 МВт·сут/кгU;
- твэлы 67 и 68 с промежуточным значением выгорания топлива 43.8 и 45.7 МВт·сут/кгU соответственно.

Таблица 7

Максимальное и среднее выгорание топлива и коэффициенты (K_z) неравномерности распределения продуктов деления по длине твэлов ТВС 135

N твэла	Максимальное выгорание, МВт*сут/кгU	Kz (Cs137)	Среднее выгорание, МВт*сут/кгU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	42.3	1.16	36.4
66	42.5	1.16	36.5
67	43.8	1.16	37.6
68	45.7	1.16	39.3
69	49.3	1.17	42.2
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Минимальное	42.2	1.15	36.1
Максимальное	49.3	1.17	42.8
Среднее	44.3	1.16	38.1
СКО	2.18	0.005	1.97

Распределение максимального выгорания в твэлах по диагональным направлениям ТВС 135



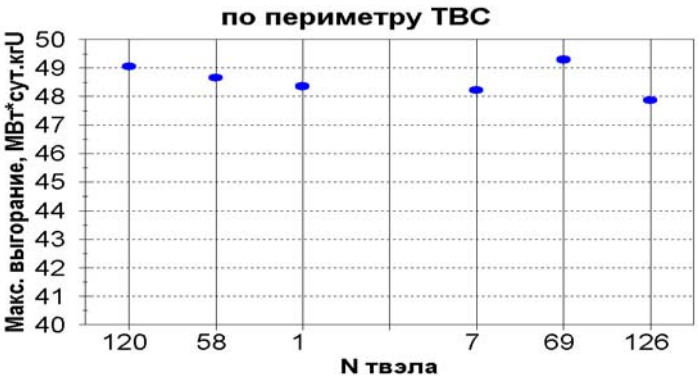
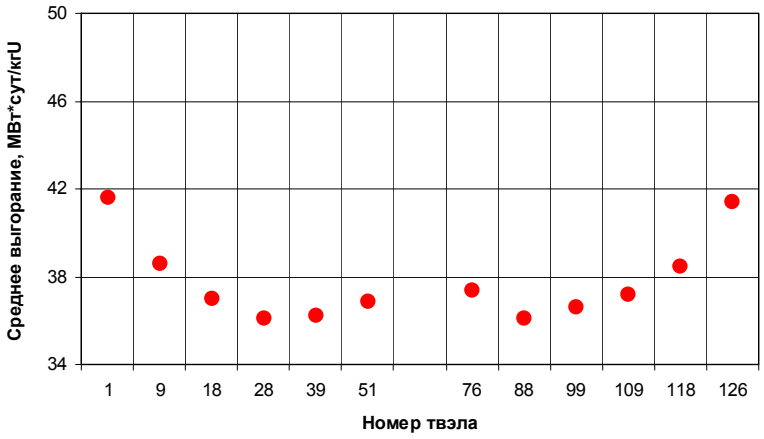
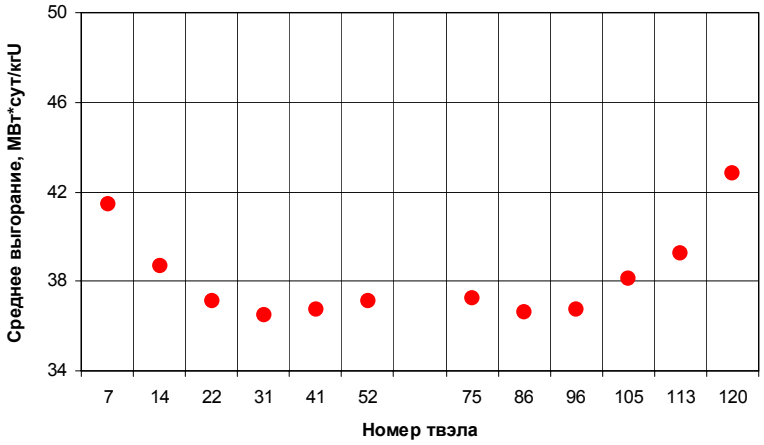


Рис.3

Распределение среднего выгорания в твэлах по диагональным направлениям ТВС 135





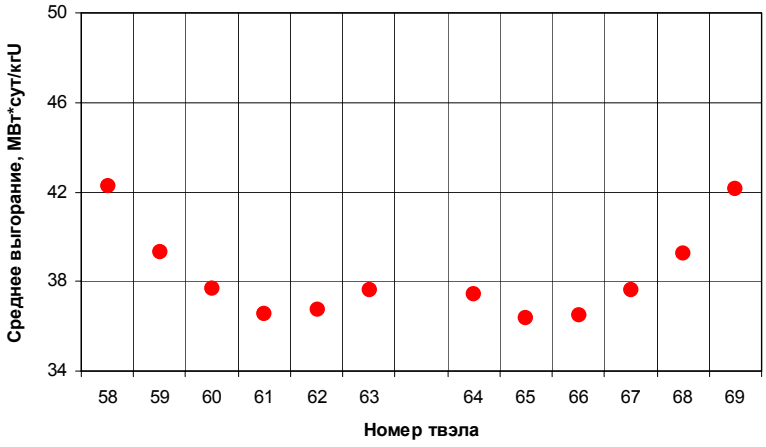


Рис.4

4. Подготовка образцов топлива

На рис.5-8 представлены распределения Cs-137, являющегося монитором выгорания, по длине отобранных твэлов. На основании полученных аномальных распределений выгорания отбираются 8 образцов для количественного анализа изотопного состава топлива:

- из твэла 69, имеющего максимальное выгорание по сечению пучка ТВС, вырезаются три образца в нижней, центральной и верхней частях топливного сердечника (соответственно на координатах ~100, ~1000 мм и ~2150 мм от низа твэла);
- из твэла 65 с минимальным выгоранием вырезаются три образца из тех же участков;
- из твэла 67 с промежуточным выгоранием вырезается один образец в центральной части топливного сердечника;
- из твэла 68 с промежуточным выгоранием вырезается один образец в центральной части топливного сердечника.

Анализ отобранных образцов позволит получить информацию о содержании делящихся материалов и продуктов деления в топливе с выгоранием в диапазоне от~22 до ~49 МВт·сут/кгU.

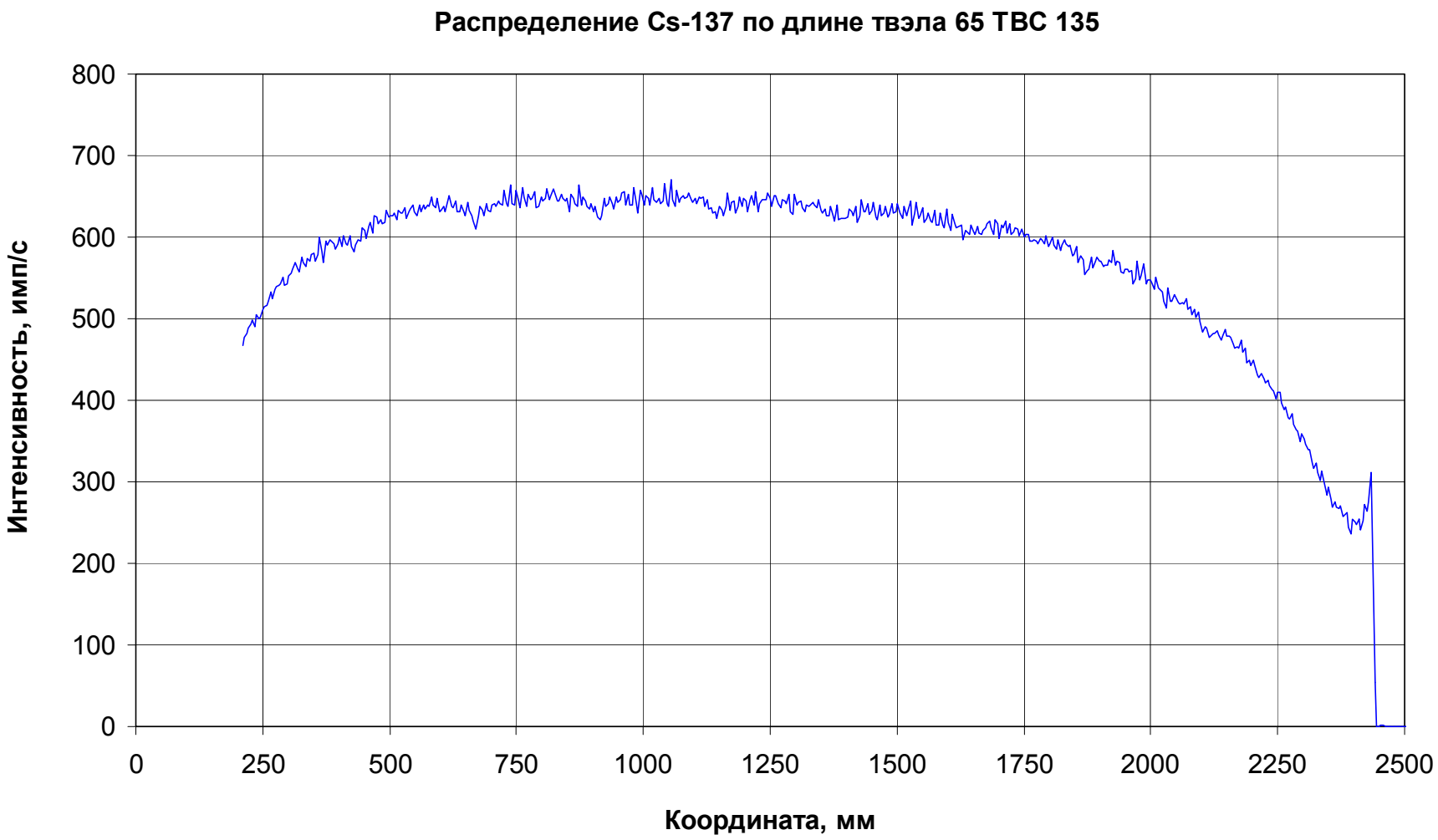

Распределение Cs-137 по длине твэла 65 ТВС 135
Интенсивность, имп/с
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Координата, мм

Рис.5

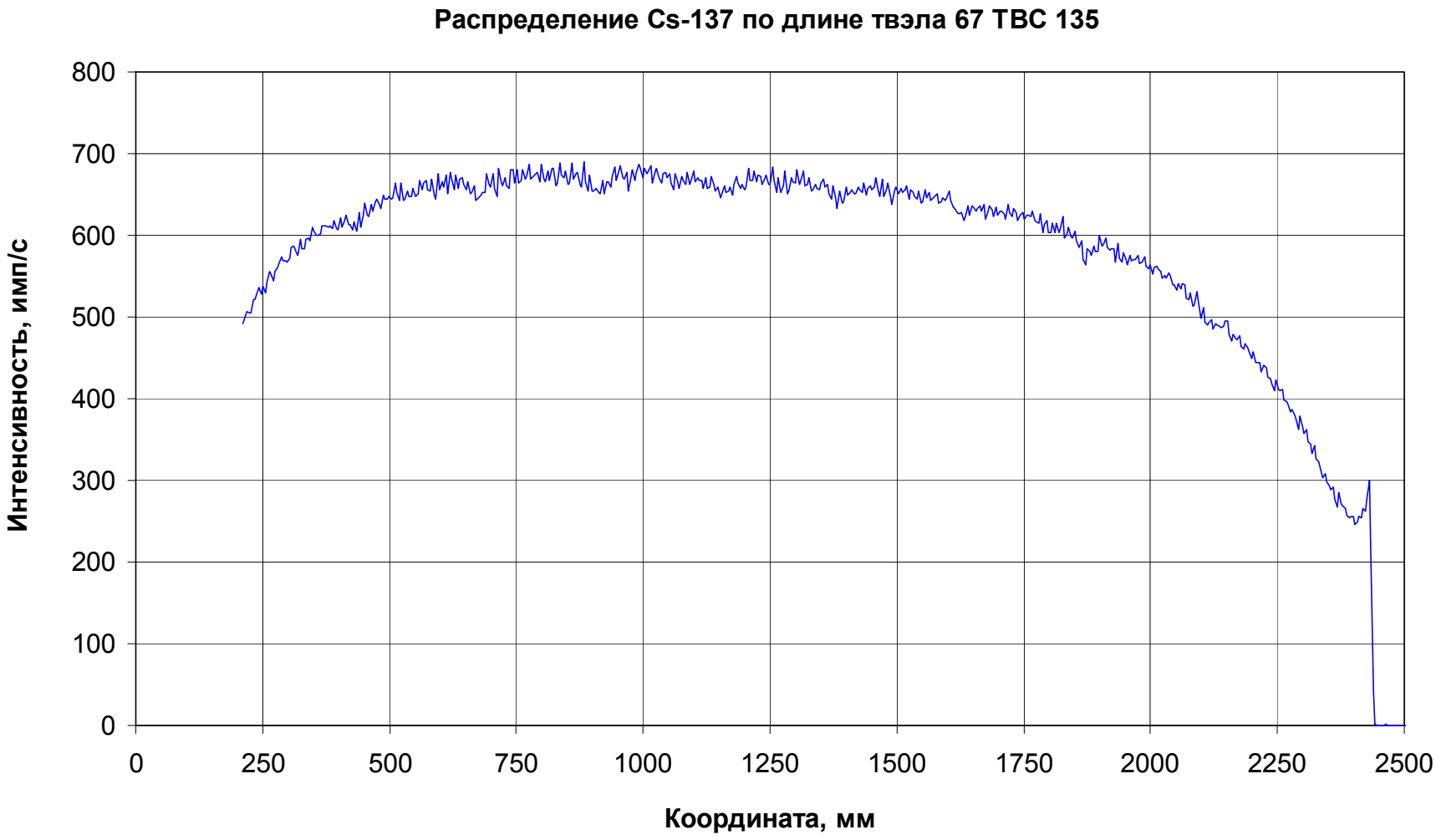

Распределение Cs-137 по длине твэла 67 ТВС 135
Интенсивность, имп/с
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Координата, мм

Рис.6

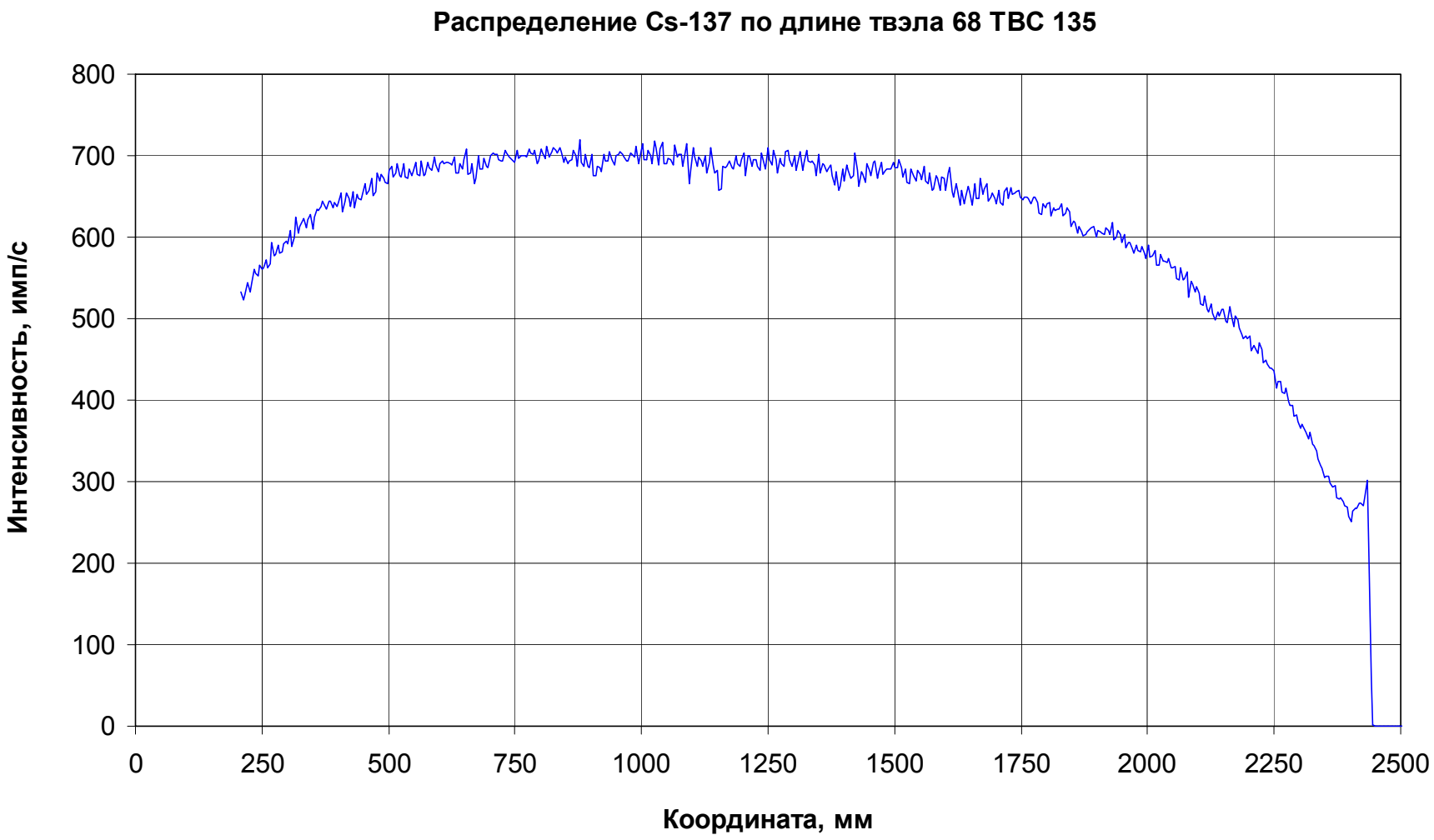

Распределение Cs-137 по длине твэла 68 ТВС 135
Интенсивность, имп/с
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Координата, мм

Рис.7

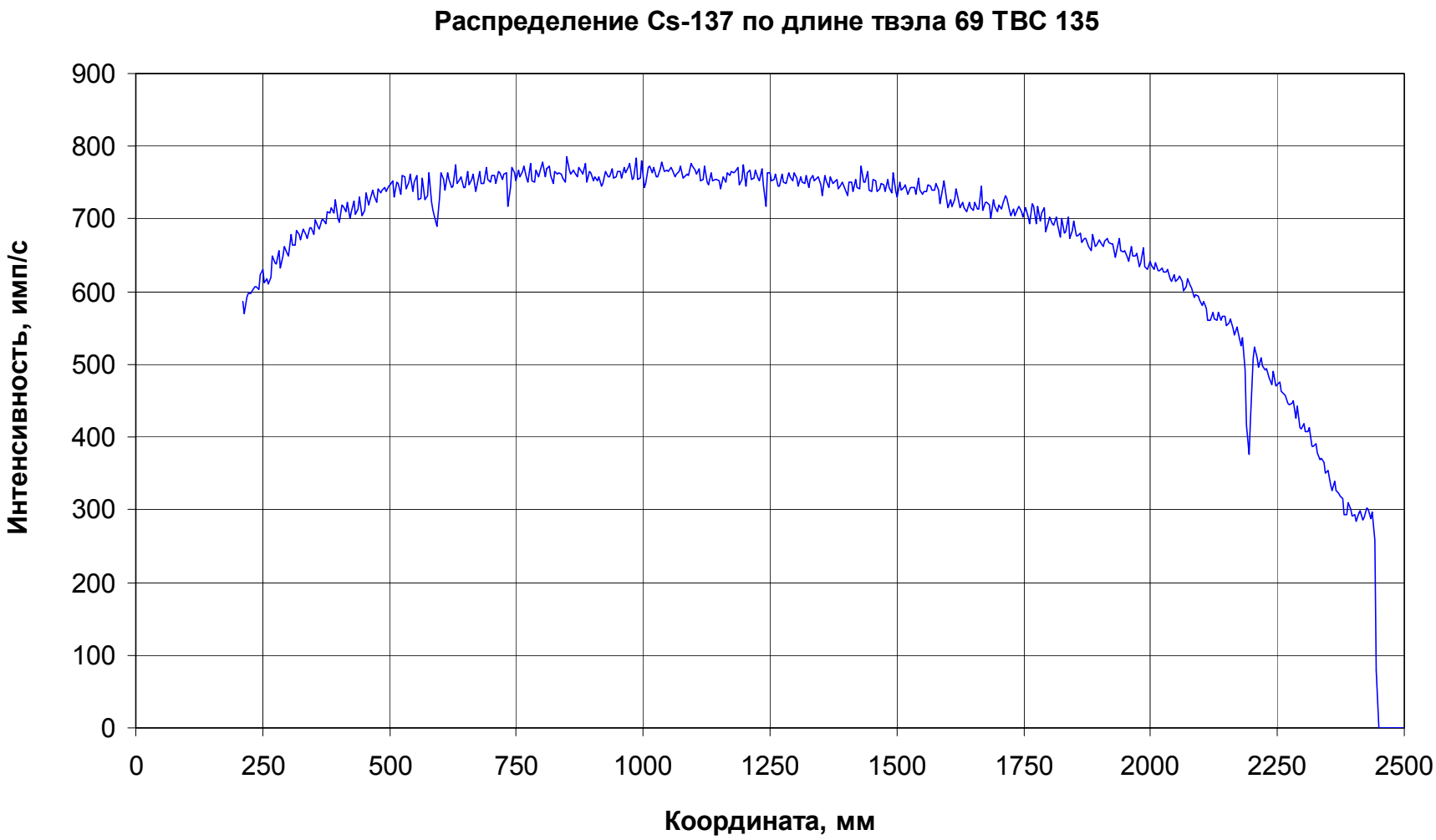

Распределение Cs-137 по длине твэла 69 ТВС 135
Интенсивность, имп/с
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
Координата, мм

Рис.8

Заключение

В рамках задачи 1 проекта 2670р выполнен анализ технологических и эксплуатационных характеристик ТВС ВВЭР-440 с целью отбора твэлов для проведения неразрушающих исследований и определения выгорания и нуклидного состава топлива. На основании проведенной работы выполнено следующее:

1. Для исследований выбрана ТВС 13626135 с исходным обогащением 3.6% по урану-235, отработавшая на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х топливных циклов до среднего выгорания ~38.5 МВт·сут/кгU.
2. Отобраны четыре твэла (№№65,67,68 и 69) для проведения неразрушающих и разрушающих исследований. Твэл 69 имеет максимальное выгорание топлива для данной ТВС, а твэл 65 – минимальное; твэлы 67 и 68 имеют промежуточное значение выгорания.
3. Определены координаты отбора восьми образцов топлива для радиохимического анализа. Из твэлов 65 и 69 образцы топлива отбираются с координатами ~100, ~1000 и ~2150 мм от низа твэлов; из твэлов 67 и 68 образцы отбираются с координатами ~1000 мм от низа твэлов.

Список источников:

1. Внуков В.С., Рязанов Б.Г. Проблемы и опыт обеспечения ядерной безопасности при хранении отработавшего топлива АЭС. Атомная энергия, т.91, вып.4, октябрь 2001 г.
2. Правила безопасного при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетики, ПНАЭ Г-14-025-91, М., ЦНИИатоминформ, 1992.
3. Marcova L. VVER-related burnup credit calculation. – Jn: JCNC'99, Versailles, France, 1999.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель проекта
_____А.В.Смирнов
"____"_____2003 г.

Исходное состояние рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU

Промежуточный отчет по задаче №2
проекта VVER Burnup Credit (2670р)

Димитровград, 2003 г.

Одна из возможностей повышения эффективности обращения с отработавшим топливом заключается в использовании кредита выгорания.

Кредит выгорания определяется, как возможность использовать особенности отработавшего топлива, связанные с изменением изотопного состава и соответствующим уменьшением реактивности.

Комплекс экспериментальных работ, проводимых в рамках данного проекта, направлен на определение нуклидного состава и выгорания топлива ВВЭР-440 с целью дальнейшей верификации компьютерных кодов для расчета накопления/распада и реактивности.

Реферат

Отчет содержит15 страниц, 2 рисунка, 6 таблиц.

Ключевые слова: проект VVER Burnup Credit, отработавшее топливо ВВЭР-440, определение выгорания, нуклидного состава и массы изотопов.

Изложено описание исходного состояния компонентов рабочей кассеты №13626135 (в дальнейшем РК 135) ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU. Приведены геометрические параметры топливных таблеток, нуклидный и химический составы топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом.

Содержание

Введение..... 5

1. Описание исходных параметров топлива..... 6

2. Параметры твэлов..... 8

3. Параметры рабочей кассеты..... 9

Заключение..... 12

Введение

С 1987 года на 4-ом блоке НВАЭС в 15-ом топливном цикле начались испытания ТВС с циркониевыми ДР. Одна из этих ТВС, отработавшая в течение 4-х ТЦ (15-18-й ТЦ) до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU, после трех лет расхолаживания в водном бассейне выдержки была доставлена в ГНЦ НИИАР и исследована в материловедческой лаборатории.

Рабочая кассета №13626135 (далее РК 135) изготовлена в июне 1987 г.

Условия эксплуатации ТВС №13626135 были штатными, т.е. в процессе эксплуатации не было отмечено каких-либо отклонений от ТУ. С момента извлечения РК из АЗ (июль 1991 г.) прошло 12 лет. Следовательно, данная РК является типичной для большинства кассет, хранящихся в бассейнах выдержки АЭС.

1. Описание исходных параметров топлива

В качестве топлива были использованы таблетки из спеченной двуокиси урана с обогащением топлива 3.6% по U-235.

Для изготовления твэлов РК 135 использовались две партии оболочечных труб (985-6-1/2 и 1091-6-1/2) и одна партия топлива (350512).

Геометрические параметры топливных таблеток РК 135, нуклидный и химический составы топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом приведены в табл.1-3.

Метод изготовления

Изготовление таблеток включает в себя следующие основные операции:

1. Документальный контроль исходных материалов.
2. Приготовление пластификатора и контроль параметров (температура подогрева, время растворения пластифицирующих веществ в воде, плотность раствора).
3. Приготовление пресспорошка, представляющего собой смесь порошка двуокиси урана с пластификатором и контроль параметров (количество смешиваемых компонентов и время смешения, давление уплотнения, температура и время сушки, насыпная плотность и массовая доля воды).
4. Прессование таблеток и контроль параметров (контроль прессинструмента, давление прессования, диаметр, высота, внешний вид, плотность таблеток).
5. Спекание таблеток и контроль параметров (температура и время в печах сушки и спекания, расход водорода и избыточное давление в печах, выборочный контроль диаметра и плотности спеченных таблеток).
6. Шлифование таблеток.
7. Разбраковка таблеток по диаметру на автоматическом сортировочном устройстве.
8. Контроль качества таблеток: отношение кислорода к урану, содержание урана, изотопный состав, химический состав, визуальный контроль внешнего вида на соответствие контрольным образцам, плотность, диаметр, высота таблеток, содержание влаги.
9. Оформление паспорта и упаковка таблеток в тару.

Таблица 1

Геометрические параметры таблеток РК 135

Параметр	Значение		
	максимум	**средний**	**минимум**
Наружный диаметр, мм	7.60	7.565	7.53
Длина, мм	14	11	8
Диаметр центрального отверстия, мм	$1.2^{+0.8}$		
Форма таблетки	с фаской с катетом 0.2…0.5 мм и углом $25^0 \pm 5^0$.		

Таблица 2

Изотопный состав топлива РК 135

Параметр	Значение
Масса UO_2 в ТВС до облучения, кг	134.76
Масса урана в ТВС до облучения, кг	118.49
Масса U-235 в ТВС до облучения, кг	4.25
Массовая доля смеси изотопов урана, %	не менее 87.7
Массовая доля урана-235 в смеси изотопов урана, %	3.60 ± 0.05
Массовая доля урана-236 в уране, %	не более 0.1
Массовая доля урана-234 в уране	не нормируется
Плотность, г/см^3	10.40 – 10.80
Кислородный коэффициент	2.000…2.015

Таблица 3

Физико-химические показатели топлива РК 135

Наименование показателя	Норма
Массовая доля примесей по отношению к урану, %, не более	
Азот	0.02
Бор	0.00004
Железо	0.06
Кремний	0.025
Марганец	0.002
Медь	0.005
Никель	0.015
Углерод	0.01
Фтор	0.005
Хром	0.01
Суммарный борный эквивалент, %, не более	0.00018

2. Параметры твэлов

В качестве материала оболочек и концевых деталей твэлов использован сплав Zr-1%Nb (Э110). Нижние торцы твэлов герметизировались сваркой ЭЛУ, верхние - КСС. Топливом служили спеченные таблетки из диоксида урана с фасками на торцах. Фиксаторы топливного столба твэлов выполнены из стали типа 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.

Эскиз твэла представлен на рис.1, параметры твэла - в табл.4.

Таблица 4

Эскиз твэла РК 135 **Параметры твэла РК 135**

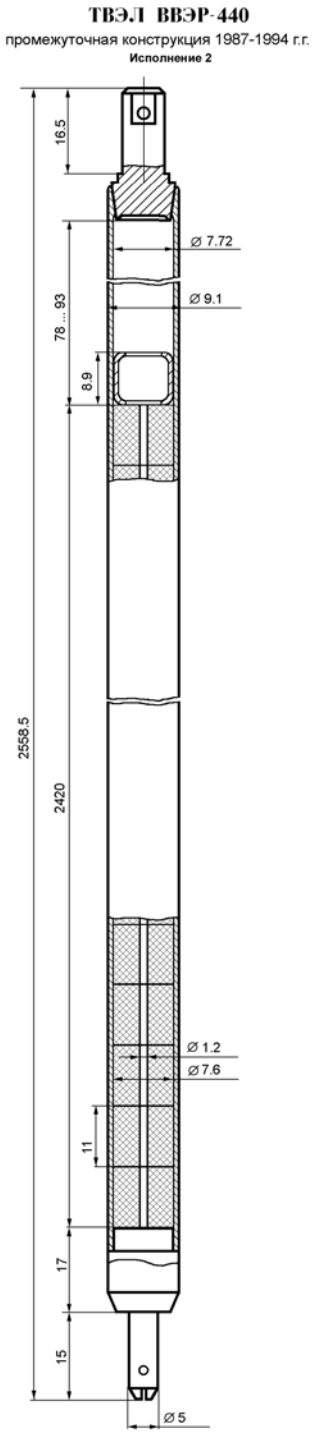


Рис.1

Длина, мм	2558.5
Масса твэла, г	1410
Материал топлива	UO_2
Длина топливного сердечника, мм	2420
Длина газосборника, средняя, мм	86
Размеры топливной таблетки, мм -наружный диаметр -диаметр канала -высота	 7.6 1.2 8÷14
Диаметр центрального отверстия, мм	1.2
Форма таблетки	С фаской
Материал оболочки Наружный диаметр твэла, мм Внутренний диаметр оболочки, мм	Zr-1%Nb 9.1 7.72
Газ-наполнитель	гелий
Давление гелия в твэле, МПа Свободный объем в твэле, $см^3$	0.5-0.7 16.7 – 17.2
Герметизация верхней заглушки	КСС-2
Герметизация нижней заглушки	ЭЛС

3. Параметры рабочей кассеты 135

Рабочая кассета состоит из пучка твэлов, головки, хвостовика и чехла. Твэлы в пучке располагаются по треугольной решетке и объединены между собой десятью дистанционирующими решетками, механически закрепленными на центральной трубе, верхней решеткой, закрепленной шайбами при помощи сварки к головке, и нижней опорной решеткой, закрепленной на хвостовике. Твэлы, а также центральная труба, закреплены в нижней решетке шплинтующей проволокой. Нижняя опорная решетка приварена к хвостовику, предназначенному для установки РК в днище корзины реактора, хвостовик опирается шаровой поверхностью на конусную часть гнезда. Для ориентации ТВС при установке в ячейку АЗ на хвостовике РК есть фиксирующий палец, а в днище корзины - соответствующий паз.

Головку и хвостовик по шестигранной поверхности крепят к чехлу с помощью винтов. Для предотвращения непроизвольного отвинчивания винты фиксируют при помощи сварки.

Головка РК имеет два пальца под транспортный захват перегрузочной машины и подпружиненные упоры, удерживающие рабочую кассету от всплытия. Упоры также служат компенсаторами тепловых расширений и технологических допусков внутрикорпусных устройств реактора. К нижнему торцу головки крепят защитную решетку.

Для изготовления оболочек и концевых деталей твэлов, дистанционирующих решеток, центральной трубы и чехла используют циркониевые сплавы. Остальные узлы изготавливают из нержавеющей стали.

Топливо твэлов представляет собой столб таблеток из спеченного диоксида урана с осевым отверстием. Столб топлива закреплен фиксатором от перемещения при транспортировании.

Эскиз рабочей кассеты представлен на рис.2, характеристики основных компонентов кассеты - в табл.5.

Массовые характеристики топливного сердечника твэлов приведены в табл. 6.

Эскиз рабочей кассеты 135

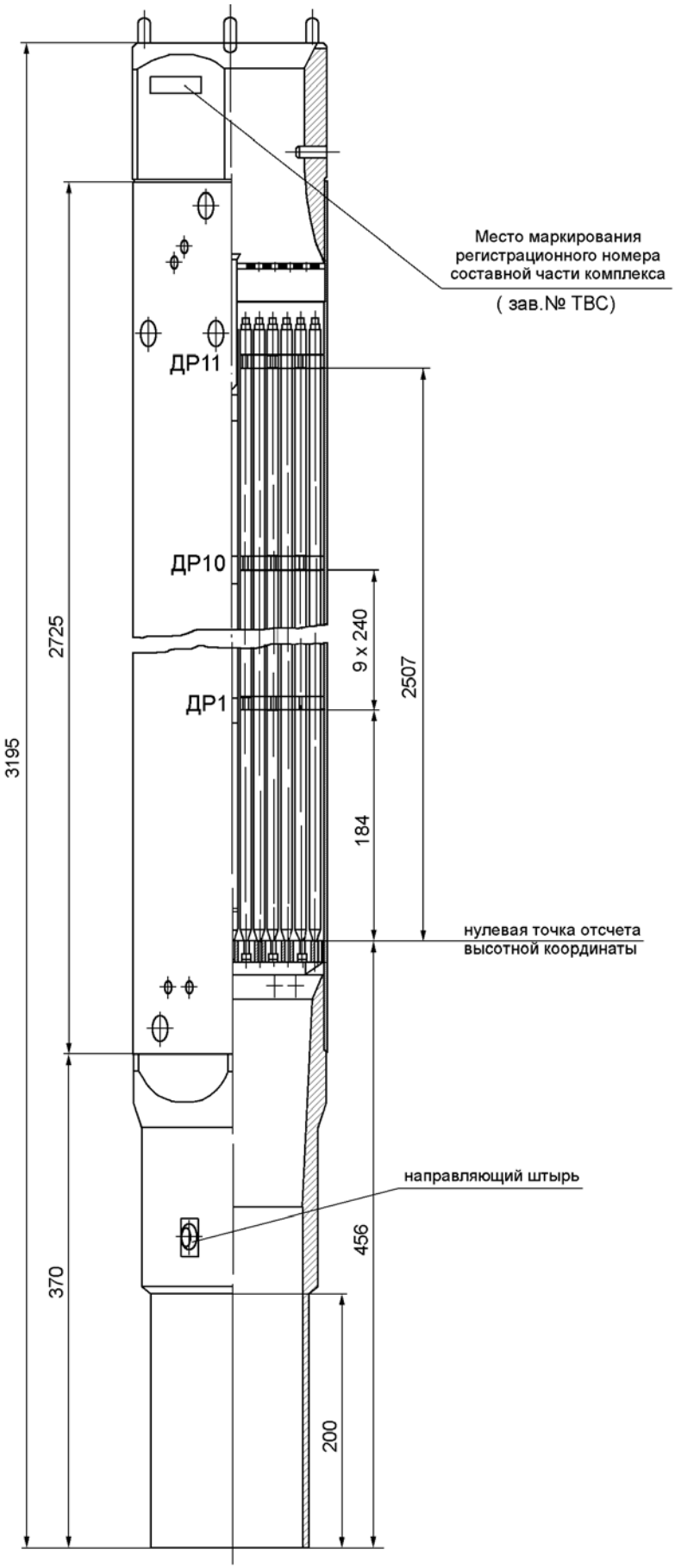


Рис.2

Таблица 5

Характеристики РК 26135

№ п/п	Наименование	Значение
1	**ТВС**	
1.1	Заводской номер	13626135
1.2	Дата изготовления	1987
1.3	Обогащение топлива по ^{235}U, %	3.6
1.4	Длина ТВС	3217
1.5	Количество твэлов	126
1.6	Количество ДР	11
2	**Чехол**	
2.1	Длина, мм	2725
2.2	Размер "под ключ", мм	144.2
2.3	Толщина листа чехла, мм	2.0
2.4	Крепление чехла к концевым деталям	винтами (по 12 винтов с каждого конца чехла)
3	**Дистанционирующая решетка**	
3.1	Размер "под ключ", мм	138.73 max
3.2	Высота ячейки, мм	10
3.3	Диаметр ячейки, мм	8.90
3.4	Толщина стенки ячейки, мм	0.3
3.5	Наличие обода	отсутствует
3.6	Материал	Сплав Zr-1%Nb
4	**Центральная труба**	
4.1	Длина, мм	2565
4.2	Наружный диаметр, мм	10.3
4.3	Внутренний диаметр, мм	8.8
4.4	Материал	Сплав Zr-1%Nb
5	**Твэл**	
5.1	Длина, мм	2558.5
5.2	Наружный диаметр, мм	9.1
5.3	Исходное давление He, МПа	0.5…0.7
5.4	Материал оболочки	Сплав Zr-1%Nb
6	**Топливная таблетка**	
6.1	Материал	Диоксид урана
6.2	Длина, мм	8…14
6.3	Наружный диаметр, мм	7.6
6.4	Диаметр центрального отверстия, мм	1.2
6.5	Наличие фаски	имеется
6.6	Средняя плотность, г/см^3	10.6

Таблица 6

Характеристики топливного сердечника твэлов РК 26135

Порядковый номер твэла	Заводской номер твэла	Масса диоксида урана, г	Масса изотопов урана, г	Масса урана-235, г
1	749201	1065	936.5	33.6
2	748707	1067	938.2	33.7
3	748716	1077	947	34
4	748759	1067	938.2	33.7
5	748708	1077	947	34
6	748738	1066	937.3	33.6
7	748749	1069	940	33.7
8	748743	1067	938.2	33.7
9	748712	1074	944.4	33.9
10	748746	1066	937.3	33.6
11	748761	1067	938.2	33.7
12	748752	1073	943.5	33.9
13	748747	1066	937.3	33.6
14	748726	1066	937.3	33.6
15	748737	1066	937.3	33.6
16	748740	1068	939.1	33.7
17	748755	1065	936.5	33.6
18	748756	1068	939.1	33.7
19	748724	1067	938.2	33.7
20	748758	1065	936.5	33.6
21	748750	1067	938.2	33.7
22	748735	1068	939.1	33.7
23	748727	1066	937.3	33.6
24	748727	1067	938.2	33.7
25	748713	1066	937.3	33.6
26	748729	1074	944.4	33.9
27	748734	1068	939.1	33.7
28	748719	1073	943.5	33.9
29	748730	1067	938.2	33.7
30	748732	1076	946.1	34
31	748720	1068	939.1	33.7
32	748742	1068	939.1	33.7
33	748748	1066	937.3	33.6
34	748711	1068	939.1	33.7
35	748714	1068	939.1	33.7
36	748718	1074	944.4	33.9
37	748736	1068	939.1	33.7
38	748764	1073	943.5	33.9
39	748762	1067	938.2	33.7
40	748733	1068	939.1	33.7
41	748717	1066	937.3	33.6
42	748739	1073	943.5	33.9
43	746445	1073	943.5	33.9

44	746453	1071	941.7	33.8
45	746493	1068	939.1	33.7
46	746481	1065	936.5	33.6
47	746463	1068	939.1	33.7
48	746501	1069	940	33.7
49	746492	1066	937.3	33.6
50	746470	1070	940.9	33.8
51	746449	1070	940.9	33.8
52	746484	1075	945.2	33.9
53	746456	1072	942.6	33.8
54	746471	1065	936.5	33.6
55	746475	1070	940.9	33.8
56	746461	1070	940.9	33.8
57	746502	1065	936.5	33.6
58	746476	1069	940	33.7
59	746495	1070	940.9	33.8
60	746482	1067	938.2	33.7
61	746446	1069	940	33.7
62	746447	1069	940	33.7
63	746483	1072	942.6	33.8
64	746488	1068	939.1	33.7
65	746486	1067	938.2	33.7
66	746460	1069	940	33.7
67	746477	1069	940	33.7
68	746499	1066	937.3	33.6
69	746489	1070	940.9	33.8
70	746500	1065	936.5	33.6
71	746468	1068	939.1	33.7
72	746494	1070	940.9	33.8
73	746473	1071	941.7	33.8
74	746454	1072	942.6	33.8
75	746478	1069	940	33.7
76	746455	1065	936.5	33.6
77	746479	1065	936.5	33.6
78	746450	1075	945.2	33.9
79	746457	1069	940	33.7
80	746469	1071	941.7	33.8
81	746480	1071	941.7	33.8
82	746496	1074	944.4	33.9
83	746467	1068	939.1	33.7
84	746458	1073	943.5	33.9
85	749054	1074	944.4	33.9
86	749003	1066	937.3	33.6
87	748998	1066	937.3	33.6
88	749042	1071	941.7	33.8
89	749001	1066	937.3	33.6
90	749051	1074	944.4	33.9
91	749029	1065	936.5	33.6

92	749033	1068	939.1	33.7
93	749010	1069	940	33.7
94	749025	1077	947	34
95	749039	1067	938.2	33.7
96	749022	1071	941.7	33.8
97	749035	1068	939.1	33.7
98	749009	1073	943.5	33.9
99	749044	1075	945.2	33.9
100	749040	1075	945.2	33.9
101	749000	1075	945.2	33.9
102	749027	1067	938.2	33.7
103	749046	1073	943.5	33.9
104	749050	1075	945.2	33.9
105	749006	1069	940	33.7
106	749034	1072	942.6	33.8
107	749004	1066	937.3	33.6
108	748997	1066	937.3	33.6
109	749014	1070	940.9	33.8
110	749013	1065	936.5	33.6
111	749015	1072	942.6	33.8
112	748999	1076	946.1	34
113	749053	1078	947.9	34
114	749048	1073	943.5	33.9
115	749017	1070	940.9	33.8
116	749023	1073	943.5	33.9
117	749043	1070	940.9	33.8
118	749028	1068	939.1	33.7
119	749002	1066	937.3	33.6
120	749018	1069	940	33.7
121	749008	1076	946.1	34
122	749026	1071	941.7	33.8
123	749019	1069	940	33.7
124	749016	1071	941.7	33.8
125	749021	1070	940.9	33.8
126	749011	1071	941.7	33.8
	Сумма:	**134759**	**118494**	**4252.4**

Заключение

В отчете описано исходное состояние компонентов рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU. Приведены геометрические параметры топливных таблеток, нуклидный и химический составы топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель проекта
_____А.В.Смирнов
"____"_____2003 г.

История облучения рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU

Промежуточный отчет по задаче №3
проекта VVER Burnup Credit (2670р)

Димитровград, 2003 г.

Одна из возможностей повышения эффективности обращения с отработавшим топливом заключается в использовании кредита выгорания.

Кредит выгорания определяется, как возможность использовать особенности отработавшего топлива, связанные с изменением изотопного состава и соответствующим уменьшением реактивности.

Комплекс экспериментальных работ, проводимых в рамках данного проекта, направлен на определение нуклидного состава и выгорания топлива ВВЭР-440 с целью дальнейшей верификации компьютерных кодов для расчета накопления/распада и реактивности.

Реферат

Отчет содержит 88 страниц, 9 рисунков, 57 таблиц.

Ключевые слова: проект VVER Burnup Credit, отработавшее топливо ВВЭР-440, история эксплуатации, определение выгорания, нуклидного состава.

Представленный материал отражает результаты работы по задаче 2 рабочего плана по Проекту «Исследование выгорания и нуклидного состава топлива ВВЭР для использования в задачах, связанных с кредитом выгорания». Исследования и расчеты проводились для рабочей кассеты ВВЭР-440 №13626135, которая эксплуатировалась на 4-м блоке НВ АЭС.

Содержание

Введение	8
1. Используемая система расчетных программ, принятые приближения	9
2. Предыстория работы реактора с 1-й по 14-ю топливную загрузку	10
3. История эксплуатации 15-18 топливных загрузок и нейтронно-физические характеристики исследуемых твэлов	10
Заключение	13
Литература	14

Обозначения, используемые в отчете

НФХ - нейтронно-физические характеристики

ОР - орган регулирования

СУЗ - система управления и защиты

ТВС - тепловыделяющая сборка (топливная кассета)

ТВС АРК - топливный хвостовик ОР СУЗ

МКУ - минимально контролируемый уровень мощности реактора

В - выгорание топлива, МВт·сут/кгU

ВОС - начало работы топливной загрузки

ЕОС - конец работы топливной загрузки

C_B - концентрация бора в теплоносителе

C_{H3BO3} - концентрация борной кислоты в теплоносителе

$H_{упр}$ - положение управляющей группы ОР СУЗ (определено как разность высот верхней границы топлива в ТВС АРК и нижней границы топлива в рабочих ТВС)

K_q - неравномерность в мощности ТВС (для 349 ТВС), относительное значение мощности конкретной ТВС

$\overline{K}_q$ - средняя мощность периферийных ТВС, относ.ед.

K_V - неравномерность распределения мощности по объему активной зоны (для 8725 нодов), относительное значение мощности конкретного нода

PSI - неравномерность распределения мощности по объему активной зоны (для 8725*126 нодов), относительное значение мощности конкретного нода в твэле

Bur значение глубины выгорания для нода в твэле 349*25*126 (1 нод по высоте равен 9.76 см)

K_k - неравномерность линейных нагрузок твэлов в поперечном сечении ТВС

$\overline{q_l}$ - среднее значение линейных нагрузок твэлов в реакторе, Вт/см

q_l^{max} - максимальное значение линейной нагрузки твэла, Вт/см

$q_l^{max} = \overline{q_l} * \max(K_V * K_k) * K_{инж} * K_N$

$q_l^{доп}$, $Q_l^{доп}$ - допустимое значение линейной нагрузки твэла, Вт/см

$K_{инж}$ - коэффициент запаса на возможную погрешность расчетной величины X (под X могут подразумеваться K_q, K_V, K_k, $\max(K_V * K_k)$, $\max(K_q * K_k)$ и др.)

KN - коэффициент запаса на неопределенность мощности реактора (KN=1,04)

$K\Delta t$ - коэффициент запаса на неопределенность расхода теплоносителя

K_0 - коэффициент размножения нейтронов

$K_{эфф}$ - эффективный коэффициент размножения нейтронов в реакторе

ρ - реактивность

$T_{эфф}$, FPD - эффективное время работы топливной загрузки, эфф.сут.

T_{in}, $T_{вх}$ - температура теплоносителя на входе в активную зону, ^oC

$T_{вых}$ - средняя температура теплоносителя на выходе из конкретной ТВС

$\partial\rho/\partial\gamma$ - Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя

$\partial\rho/\partial t$ - Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя

$\partial\rho/\partial t_U$ - Коэффициент реактивности по распределенной температуре топлива

$\partial\rho/\partial t_U{}^*$ - Коэффициент реактивности по средней температуре топлива

$\partial\rho/\partial N_U$ - Коэффициент реактивности по мощности реактора без учета подогрева теплоносителя

$\partial\rho/\partial N_B$ - Коэффициент реактивности по мощности реактора с учетом подогрева теплоносителя при неизменной температуре на входе в активную зону

$\partial\rho/\partial N_{KB}$ - Коэффициент реактивности по мощности реактора с учетом подогрева теплоносителя при неизменной средней температуре в активной зоне

$\partial\rho/\partial C$ - Коэффициент реактивности по концентрации борной кислоты

$\beta_{эфф}$ - Эффективная доля запаздывающих нейтронов

$l_{мг}$ - Среднее время жизни мгновенных нейтронов

Nk - Номер ТВС

Nz - Номер расчетной зоны по высоте

Xe, NXE - Индекс учета влияния Xe-135

= 0 - без отравления,

= 1 - равновесная концентрация Xe,

=-1 - концентрация Xe берется из предыдущего состояния,

=-2 - концентрация Xe рассчитана в ходе выгорания на данный момент кампании;

Sm, NSM - Индекс учета влияния Sm-149

= 0 - без отравления,

= 1 - равновесная концентрация Sm,

= 2 - учет постепенного накопления Sm,

= 3 - распад Pm в Sm в начале кампании с дальнейшим постепенным накоплением Sm

=-1 - концентрация Sm берется из предыдущего состояния,

=-2 - концентрация Sm рассчитана в ходе выгорания на данный момент кампании

Обозначения, принятые на картограммах топливных загрузок

N	- порядковый номер ТВС на картограмме
Тип	- тип ТВС в соответствии с данными таблицы 2.1 и год ее эксплуатации
δ	- отличие расчетного значения мощности ТВС от измеренного ($\delta = Q_{расч}/Q_{изм} - 1$)
Пред.N	- порядковый номер ТВС в предыдущей топливной загрузке
нач.	- начало работы топливной загрузки
кон.	- конец работы топливной загрузки
Выгорание	- среднее выгорание топлива в ТВС, МВт*сут./кг
Отн. мощн.	- относительная мощность ТВС
Подогрев	- подогрев теплоносителя в ТВС ($T_{вых} - T_{вх}$)
$T_{КБК}$, T_{EOBC}	- конец борной части кампании топливной загрузки
$T_{КР}$, T_{EOSC}	- конец кампании из условия исчерпания запаса реактивности
$T_{КК}$, T_{EOC}	- конец кампании с учетом ее продления
твэг	- твэл, топливо, которого содержит Gd_2O_3

Введение

Исследование свойств и изотопных составов отработавшего ядерного топлива является важным этапом, как и для самого топливного цикла (изготовление, эксплуатация, транспортировка, хранение и разделка топливных сборок), так и для проведения нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов типа ВВЭР и улучшения их достоверности. Данная работа посвящена расчетам нейтронно-физических характеристик исследуемых твэлов топливной кассеты, которая эксплуатировалась на 4-м блоке Нововоронежской АЭС в течение 15-18 топливных загрузок.

Для проведения этой работы использовались следующие данные:

- конструкционные характеристики исследуемой топливной сборки;
- история эксплуатации реактора до 15-ой топливной загрузки (картограммы топливных загрузок, схемы перестановок всех топливных сборок, длительность работы топливных загрузок, мощность реактора, температура теплоносителя в реакторе, расход теплоносителя через реактор, положение рабочей группы органов СУЗ, параметры критичности активных зон);
- история эксплуатации реактора 15-18 топливных загрузок (картограммы топливных загрузок, схемы перестановок всех топливных сборок, длительность работы топливных загрузок, мощность реактора, температура теплоносителя в реакторе, расход теплоносителя через реактор, положение рабочей группы органов СУЗ, параметры критичности активных зон);

Были произведены по-твэльные и по-кассетные нейтронно-физические расчеты всех топливных загрузок по комплексу программ БИПР-7А – ПЕРМАК-А, включая подготовку необходимых к ним библиотек констант с нейтронно-физическими характеристиками топливных сборок и твэлов.

В результате выполненной работы были определены следующие характеристики исследуемых твэлов:

- распределение глубин выгорания по высоте;
- распределение флюенса быстрых нейтронов;
- распределения энерговыделения;
- значения температуры оболочки;
- величины линейной мощности,

а также зависимость от глубины выгорания среднего изотопного состава по топливной сборке.

1. Используемая система расчетных программ, принятые приближения

Все обсуждаемые ниже физические расчеты выполнялись с использованием аттестованного в России комплекса программ БИПР-7А [1], ПЕРМАК-А [2] и программы ТВС-М [3].

Редкосеточная (покассетная в плане) программа **БИПР-7А** применялась для:

- расчетной имитации истории работы реактора;
- определения основных нейтронно-физических характеристик топливных загрузок.

Многослойная двумерная четырехгрупповая мелкосеточная программа **ПЕРМАК-А** использовалась для расчета потвэльных распределений поля энерговыделений и выгорания топлива в поперечном сечении активной зоны. Дополнительные сервисные блоки к программе ПЕРМАК-А использовались для получения распределения флюенса быстрых нейтронов и значений температуры оболочки.

Многогрупповая спектральная программа **ТВС-М** применялись для подготовки требуемых программами БИПР-7А и ПЕРМАК-А многопараметрических зависимостей малогрупповых нейтронных сечений расчетных ячеек.

Расчеты по программе БИПР-7А выполнялись с использованием 25 расчетных слоев по высоте активной зоны. Это обеспечивает возможность представительного учета в расчетах различия высотных размеров топливных частей рабочих ТВС и ТВС АРК, наличия стальных вкладышей в верхних частях ТВС АРК, особенностей конструкции узла стыка поглотитель-топливный хвостовик АРК.

Накопленный опыт сопоставлений расчетов с данными пусков и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР свидетельствует о том, что погрешности расчетного прогноза нейтронно-физических характеристик типичных для реакторов ВВЭР-440 топливных загрузок по указанному комплексу программ не превышают для:

- начальных значений критической концентрации бора 10 %;
- эффективности системы ОР СУЗ при обработке данных измерений с учетом эффектов пространственно-временной кинетики 10%;
- температурного коэффициента реактивности $3*10^{-5}C^{-1}$;
- неравномерности в мощности ТВС 5 %;
- неравномерности мощностей твэлов внутри ТВС 3 %;
- эффекта отравления Хе-135 10 %;
- мощностного эффекта реактивности 15%;
- температуры повторной критичности 20°С;
- длительностей работы топливных загрузок (для первой переходной загрузки) 3% (5%)

2. Предыстория работы реактора с 1-й по 14-ю топливных загрузок

Расчеты проводились для обеспечения представительности необходимой для проведения расчетов 15-18 топливных загрузок информации о распределении выгорания топлива по объему активной зоны в конце работы 14-ой топливной загрузки.

Результаты этих расчетов в данном материале не иллюстрируются.

3. История эксплуатации 15-18 топливных загрузок и нейтронно-физические характеристики исследуемых твэлов

Картограмма активной зоны реактора с координатной сеткой приведена на рис.1. По ней можно проследить реальное перемещение по активной зоне исследуемой топливной сборки; а именно:

- ячейка 21-38 в 15-ой топливной загрузке (ячейка 26 в 60-ти градусной симметрии);
- ячейка 19-40 в 16-ой ТЗ (24);
- ячейка 19-40 в 17-ой ТЗ (24);
- ячейка 16-45 в 18-ой ТЗ (28).

При этом следует отметить наличие несимметричности 18-ой загрузки. Все симметричные ТВС ячейки 16-45 являются кассетами 3-го года эксплуатации, в то время как исследуемая ТВС является кассетой 4-го года. Данная несимметричность в расчетах не была учтена. Расчеты выполнены в условиях 60-ти градусной симметрии. Однако при выдаче нейтронно-физических характеристик для исследуемых твэл (64,65,67,68,69) была учтена ориентация граней кассеты.

Рис. 2 демонстрирует нумерацию твэлов внутри расчетной сетки программы ПЕРМАК-А.

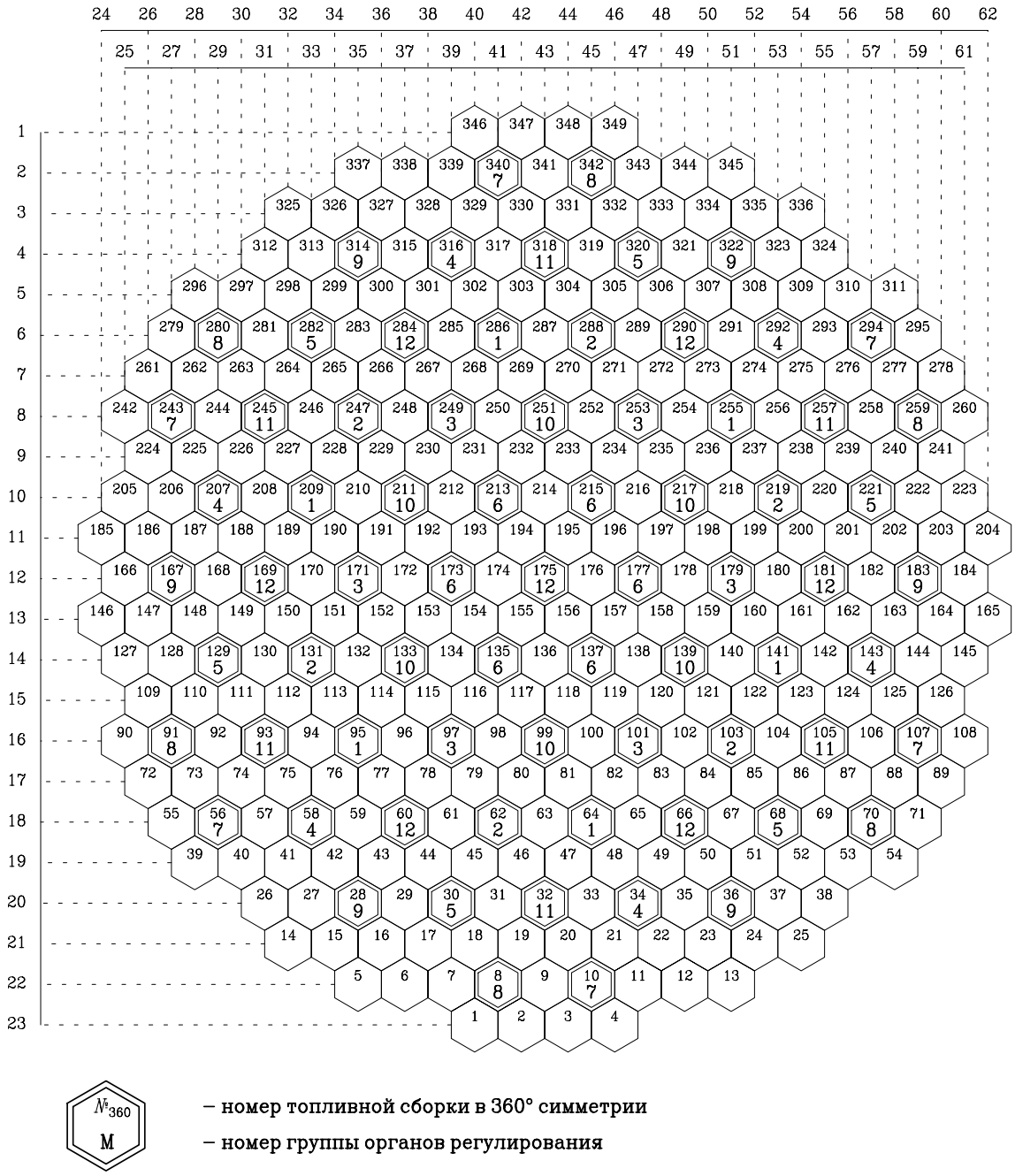


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора ВВЭР-440

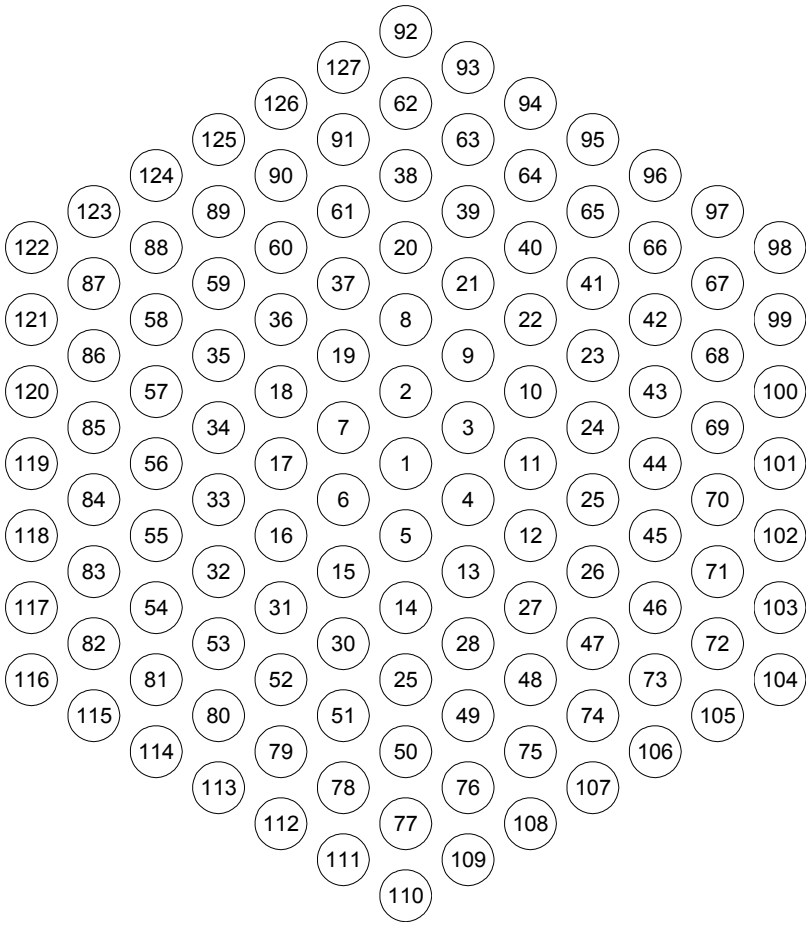


Рис. 2. Нумерация твэлов в ТВС 135, принятая в нейтронно-физических расчетах.

Результаты расчетов, выполненных для 15-18 топливных загрузок, приведены на рис. 3-6 и в таблицах 1-5. Они демонстрируют схемы перегрузок и изменение основных нейтронно-физических характеристик (указанных топливных загрузок в процессе их эксплуатации, в том числе включая имитирование продления работы реактора на мощностном и температурном эффектах в конце эксплуатации каждой загрузки.

Указанные на рисунках 3-6 подогревы теплоносителя в ТВС определены исходя из того, что:

- расход теплоносителя через реактор составляет 44000 $м^3$/час,
- доля протечек теплоносителя вне ТВС равна 9 %,
- температура теплоносителя на входе в активную зону составляет 269 ^{O}C,
- различием расходов теплоносителя через рабочие ТВС и ТВС АРК пренебрегается.

На рис. 7 дано потвэльное распределение энерговыделения в ТВС 135, а на рис. 8, 9 – максимальные глубины выгорания в топливной таблетке для слоя 9 и максимальные глубины выгорания в твэле после 18-ой топливной компании. Из рисунка видно, что максимальное выгорание в таблетке после эксплуатации было 49.6 МВт·сут/кгU, а в твэле – 43.4 МВт·сут/кгU.

Далее приведены нейтронно-физические характеристики для исследуемых твэл (в соответствии с нумерацией ПЕРМАК-А 6,16,32,54,82,116) в процессе их эксплуатации в течении 4-х лет.54-й твэл дан для информации.

В таблицах 6-29 для каждого твэла приведены:

- распределение энерговыделения по высоте;
- глубина выгорания по высоте;

В таблицах 30-53 для каждого твэла приведены:

- значения температур оболочки;
- линейная мощность;

В таблицах 54-57 приведены значения флюенса быстрых нейтронов.

Заключение

Выполнены расчеты нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора 4-го блока НВ АЭС. Подробно представлены характеристики 5 исследуемых твэл. В дальнейшем, в случае необходимости, объём может быть расширен. После проведения измерений изотопного состава необходимо провести детальное сравнение данных измерений с результатами расчетов, что даст дополнительное подтверждение точности выполняемых расчетов.

Литература

1. Большагин С.Н. и др. Программа БИПР-7А (версия 1.3) (аттестационный паспорт №137 от 21.02.2002)

2. Томилов М.Ю. и др. Программа ПЕРМАК-А (версия 1.3) (аттестационный паспорт №136 от 21.02.2002)

3. V.D. Sidorenko e.a. Spectral Code TVS-M for Calculation of Characteristics of Cells, Supercells and Fuel Assemblies of VVER-Type Reactors. 5-th Symposium of the AER, Dobogoko, October 15-20, 1995 (Аттестационный паспорт программного средства (программа ТВС-М, версия 1.2). Регистрационный номер программного средства в ЦЭП (№473), регистрационный номер паспорта аттестации (№135) от 21.02.02)

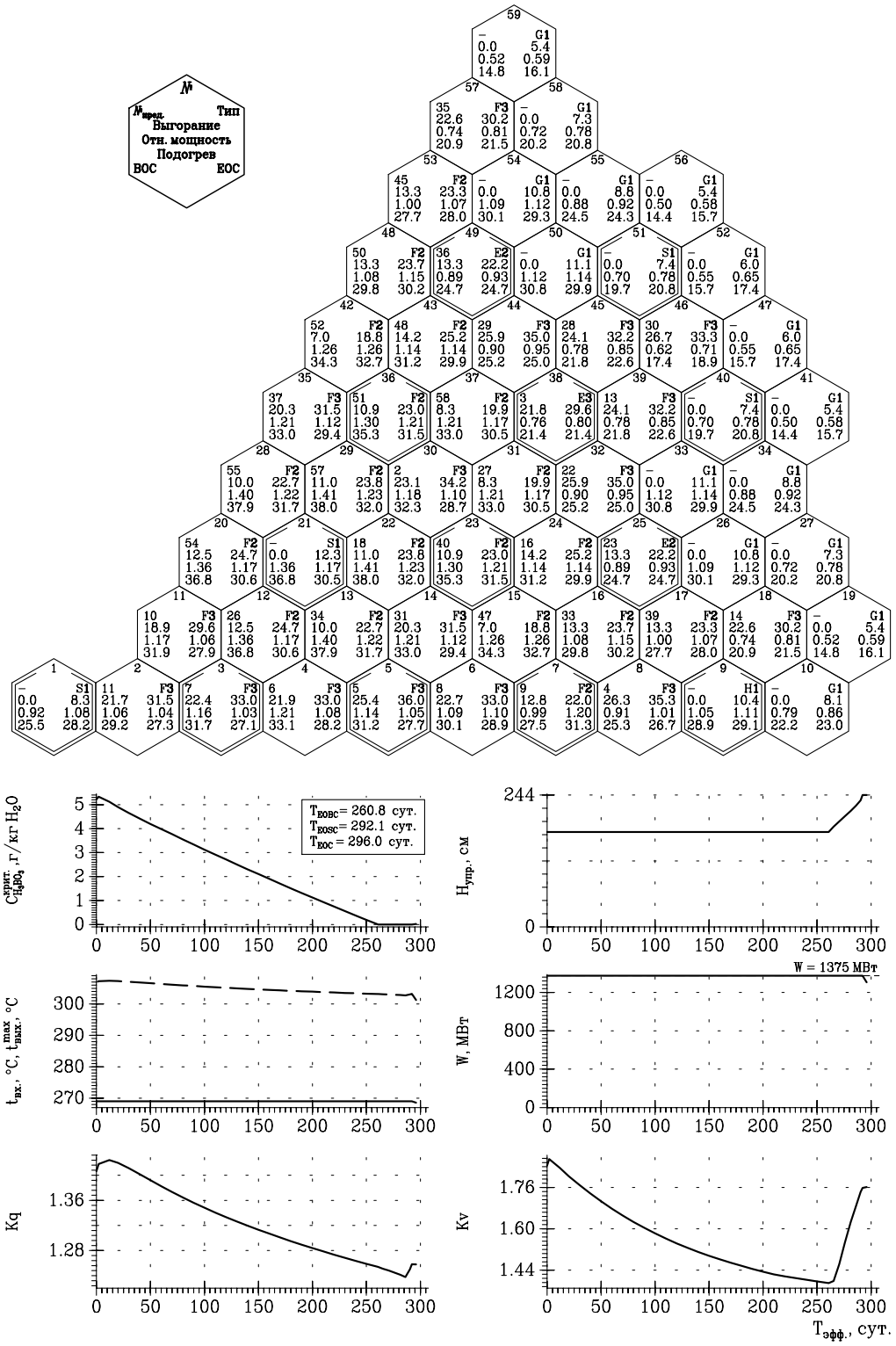


Рис. 3. Изменение основных НФХ 15-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Таблица 1. Именение основных НФХ 15-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Xe = 1 , Sm = 3

№	$T_{эфф.}$ сут.	$H_{упр.}$ см	$t_{вх.}$ °C	W МВт	$C^{крит.}_{H_3BO_3}$ г/кг	G 10^{-2} м^3/час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	$\bar{B}$ МВт*сут /кг U	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} 1/(г/см^3)	$d\rho/dt_M$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_{U*}$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(г/кг)	$\beta_{эфф.}$ $*10^2$	l $*10^5$ сек
1	0.0	175.7	269.0	1375	5.22	440.	60	1.407	29	1.845	13	7	11.30	14.52	−22.29	−3.49	−2.71	−0.56	−0.84	−0.62	−1.48	1.10	15.18
2	2.0	175.7	269.0	1375	5.33	440.	60	1.418	29	1.870	28	7	11.37	14.48	−22.23	−3.52	−2.71	−0.56	−0.85	−0.62	−1.48	1.10	15.14
3	12.0	175.7	269.0	1375	5.12	440.	60	1.424	29	1.835	28	7	11.69	14.90	−23.04	−3.51	−2.73	−0.56	−0.86	−0.63	−1.48	1.09	15.17
4	20.0	175.7	269.0	1375	4.90	440.	60	1.420	29	1.803	28	7	11.96	15.33	−23.83	−3.49	−2.74	−0.56	−0.87	−0.63	−1.49	1.09	15.21
5	30.0	175.7	269.0	1375	4.65	440.	60	1.411	29	1.770	28	7	12.28	15.86	−24.79	−3.47	−2.75	−0.55	−0.87	−0.62	−1.49	1.09	15.25
6	40.0	175.7	269.0	1375	4.42	440.	60	1.402	29	1.737	28	7	12.61	16.39	−25.72	−3.46	−2.76	−0.55	−0.88	−0.62	−1.50	1.09	15.30
7	50.0	175.7	269.0	1375	4.20	440.	60	1.392	22	1.706	29	8	12.93	16.91	−26.66	−3.44	−2.77	−0.55	−0.89	−0.62	−1.51	1.09	15.34
8	60.0	175.7	269.0	1375	3.98	440.	60	1.383	29	1.678	29	8	13.26	17.43	−27.57	−3.42	−2.78	−0.55	−0.90	−0.62	−1.51	1.09	15.38
9	70.0	175.7	269.0	1375	3.77	440.	60	1.373	22	1.651	29	8	13.59	17.95	−28.50	−3.41	−2.80	−0.54	−0.90	−0.62	−1.52	1.09	15.43
10	80.0	175.7	269.0	1375	3.55	440.	60	1.365	22	1.627	29	8	13.91	18.47	−29.43	−3.40	−2.81	−0.54	−0.91	−0.62	−1.52	1.09	15.47
11	90.0	175.7	269.0	1375	3.34	440.	60	1.356	22	1.604	29	8	14.24	19.00	−30.37	−3.39	−2.82	−0.54	−0.92	−0.62	−1.53	1.09	15.52
12	100.0	175.7	269.0	1375	3.12	440.	60	1.348	22	1.582	29	8	14.57	19.52	−31.32	−3.38	−2.83	−0.54	−0.93	−0.62	−1.54	1.09	15.57
13	110.0	175.7	269.0	1375	2.92	440.	60	1.341	29	1.562	29	8	14.89	20.04	−32.25	−3.37	−2.84	−0.54	−0.94	−0.61	−1.54	1.09	15.61
14	120.0	175.7	269.0	1375	2.71	440.	60	1.333	22	1.544	29	8	15.22	20.55	−33.18	−3.36	−2.85	−0.54	−0.95	−0.61	−1.55	1.09	15.66
15	130.0	175.7	269.0	1375	2.50	440.	60	1.326	22	1.526	29	8	15.55	21.06	−34.11	−3.36	−2.86	−0.54	−0.96	−0.61	−1.55	1.09	15.70
16	140.0	175.7	269.0	1375	2.30	440.	60	1.320	22	1.510	29	7	15.87	21.57	−35.05	−3.35	−2.87	−0.53	−0.97	−0.61	−1.56	1.09	15.75
17	150.0	175.7	269.0	1375	2.10	440.	60	1.313	29	1.496	29	7	16.20	22.08	−35.98	−3.35	−2.88	−0.53	−0.98	−0.61	−1.57	1.09	15.80
18	160.0	175.7	269.0	1375	1.90	440.	60	1.307	22	1.482	22	7	16.53	22.58	−36.90	−3.34	−2.89	−0.53	−0.98	−0.61	−1.57	1.09	15.84
19	170.0	175.7	269.0	1375	1.70	440.	60	1.301	22	1.469	22	7	16.85	23.09	−37.83	−3.34	−2.89	−0.53	−0.99	−0.61	−1.58	1.09	15.89
20	180.0	175.7	269.0	1375	1.50	440.	60	1.295	22	1.456	22	7	17.18	23.59	−38.76	−3.34	−2.90	−0.53	−1.00	−0.61	−1.58	1.09	15.94
21	190.0	175.7	269.0	1375	1.32	440.	60	1.289	29	1.445	29	7	17.50	24.09	−39.67	−3.34	−2.91	−0.53	−1.01	−0.61	−1.59	1.09	15.99
22	200.0	175.7	269.0	1375	1.13	440.	60	1.284	22	1.434	29	7	17.83	24.58	−40.58	−3.34	−2.92	−0.53	−1.02	−0.61	−1.59	1.08	16.04
23	210.0	175.7	269.0	1375	0.94	440.	60	1.279	22	1.424	42	7	18.16	25.07	−41.49	−3.34	−2.93	−0.53	−1.03	−0.62	−1.60	1.08	16.08
24	220.0	175.7	269.0	1375	0.75	440.	60	1.273	22	1.416	42	7	18.48	25.56	−42.40	−3.34	−2.94	−0.53	−1.04	−0.62	−1.60	1.08	16.13
25	230.0	175.7	269.0	1375	0.56	440.	60	1.268	22	1.409	42	7	18.81	26.05	−43.32	−3.34	−2.95	−0.53	−1.05	−0.62	−1.61	1.08	16.18
26	240.0	175.7	269.0	1375	0.37	440.	60	1.264	22	1.402	42	7	19.14	26.55	−44.24	−3.34	−2.96	−0.53	−1.06	−0.62	−1.61	1.08	16.23
27	250.0	175.7	269.0	1375	0.19	440.	60	1.259	29	1.396	42	7	19.46	27.02	−45.13	−3.34	−2.97	−0.53	−1.07	−0.62	−1.62	1.08	16.28
28	260.0	175.7	269.0	1375	0.01	440.	60	1.254	22	1.390	42	7	19.79	27.50	−46.02	−3.34	−2.97	−0.53	−1.08	−0.62	−1.62	1.08	16.33
29	260.8	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.254	29	1.390	42	7	19.82	27.54	−46.09	−3.34	−2.97	−0.53	−1.08	−0.62	−1.62	1.08	16.33
30	265.3	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	1.251	29	1.398	29	18	19.96	27.53	−46.31	−3.34	−2.98	−0.53	−1.09	−0.63	−1.62	1.08	16.33
31	270.4	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.248	29	1.463	22	19	20.13	27.54	−46.60	−3.35	−2.98	−0.54	−1.11	−0.64	−1.62	1.08	16.32
32	275.8	205.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.245	22	1.546	15	19	20.31	27.56	−46.93	−3.38	−2.99	−0.54	−1.13	−0.65	−1.62	1.08	16.32
33	281.1	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.242	22	1.626	15	20	20.48	27.60	−47.31	−3.41	−2.99	−0.54	−1.15	−0.67	−1.62	1.08	16.31
34	286.1	224.5	269.0	1375	0.00	440.	60	1.238	22	1.687	15	20	20.64	27.65	−47.66	−3.45	−2.98	−0.55	−1.17	−0.69	−1.62	1.08	16.30
35	290.2	234.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.250	15	1.742	15	21	20.78	27.68	−47.92	−3.48	−2.98	−0.56	−1.18	−0.70	−1.62	1.08	16.30
36	292.1	244.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.258	15	1.758	15	21	20.84	27.66	−47.92	−3.49	−2.98	−0.56	−1.19	−0.71	−1.62	1.08	16.29
37	296.0	244.0	268.5	1306	0.03	440.	60	1.258	42	1.761	42	21	20.97	27.46	−46.79	−3.51	−2.99	−0.56	−1.18	−0.71	−1.62	1.08	16.29

Таблица 1. Схема перестановки кассет для сектора симметрии 60° в процессе 14 перегрузки топлива (загрузка 15)

Свежие кассеты сорта S обогащения 2.40%

--> 1 -->
--> 21 -->
--> 40 --> 23 --> 25 -->
--> 51 --> 36 --> 49 -->

Свежие кассеты сорта H обогащения 3.60%

--> 9 --> 7 --> 3 --> 38 -->

Свежие кассеты сорта G обогащения 3.60%

--> 10 --> 11 --> 2 --> 30 --> 46 -->
--> 19 -->
--> 26 --> 12 -->
--> 27 --> 31 --> 14 --> 18 --> 22 --> 32 -->
--> 33 --> 16 --> 24 -->
--> 34 --> 13 --> 39 --> 17 -->
--> 41 -->
--> 47 --> 15 -->
--> 50 --> 48 --> 43 -->
--> 52 --> 42 -->
--> 54 --> 20 -->
--> 55 --> 28 --> 45 --> 53 -->
--> 56 -->
--> 58 --> 37 --> 35 --> 57 --> 29 --> 44 -->
--> 59 -->

Перестановка кассет

6 --> 4 --> 8 --> 6

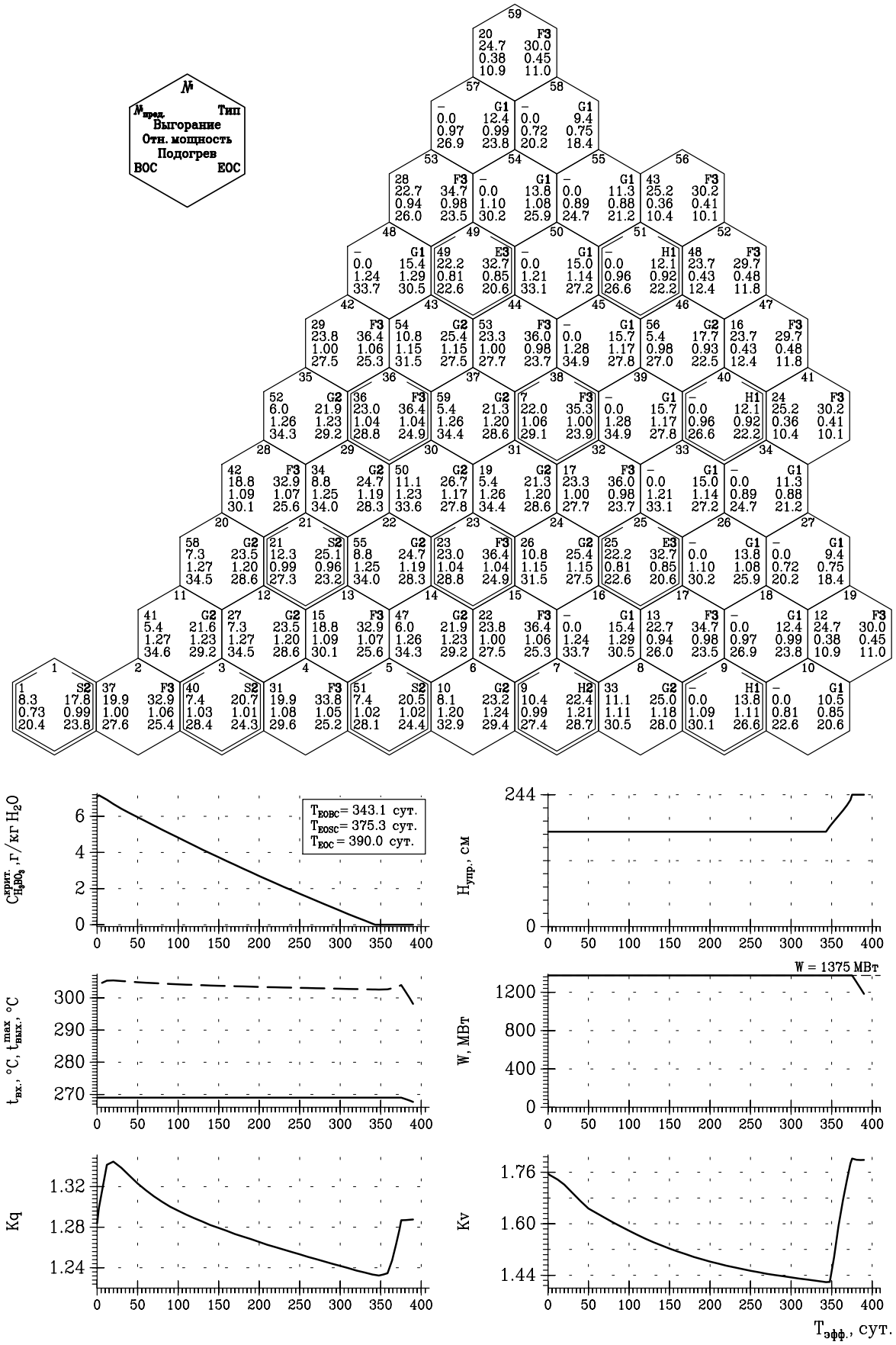


Рис. 4. Изменение основных НФХ 16-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Таблица 3. Изменение основных НФХ 16-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Xe = 1 , Sm = 3

№	$T_{эфф.}$ сут.	$H_{упр.}$ см	$t_{вх.}$ °C	W МВт	$C_{H_3BO_3}^{крит.}$ г/кг	G 10^{-2} м^3/час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	$\bar{B}$ МВт*сут /кг U	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} 1/(г/см^3)	$d\rho/dt_M$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U*$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(г/кг)	$\beta_{эфф.}$ $*10^2$	l $*10^5$ сек
1	0.0	175.7	269.0	1375	7.08	440.	60	1.284	45	1.755	48	10	10.89	10.17	−14.26	−3.21	−2.57	−0.51	−0.71	−0.57	−1.47	1.10	15.17
2	2.0	175.7	269.0	1375	7.18	440.	60	1.299	11	1.751	48	10	10.95	10.09	−14.08	−3.23	−2.57	−0.52	−0.71	−0.57	−1.46	1.10	15.14
3	12.0	175.7	269.0	1375	6.92	440.	60	1.342	11	1.738	11	10	11.28	10.41	−14.67	−3.24	−2.58	−0.52	−0.72	−0.57	−1.47	1.10	15.18
4	20.0	175.7	269.0	1375	6.69	440.	60	1.345	11	1.722	11	10	11.54	10.82	−15.42	−3.24	−2.59	−0.52	−0.73	−0.57	−1.47	1.10	15.22
5	30.0	175.7	269.0	1375	6.42	440.	60	1.339	11	1.697	11	10	11.87	11.39	−16.43	−3.23	−2.61	−0.52	−0.74	−0.58	−1.48	1.10	15.25
6	40.0	175.7	269.0	1375	6.18	440.	60	1.331	11	1.671	11	10	12.19	11.94	−17.41	−3.22	−2.62	−0.51	−0.75	−0.58	−1.49	1.10	15.29
7	50.0	175.7	269.0	1375	5.95	440.	60	1.323	11	1.647	48	10	12.52	12.49	−18.38	−3.22	−2.63	−0.51	−0.76	−0.58	−1.49	1.09	15.33
8	60.0	175.7	269.0	1375	5.72	440.	60	1.317	11	1.633	16	10	12.85	13.04	−19.36	−3.21	−2.64	−0.51	−0.77	−0.58	−1.50	1.09	15.37
9	70.0	175.7	269.0	1375	5.49	440.	60	1.310	11	1.619	16	10	13.17	13.59	−20.35	−3.21	−2.65	−0.51	−0.78	−0.58	−1.51	1.09	15.41
10	80.0	175.7	269.0	1375	5.26	440.	60	1.305	11	1.605	16	10	13.50	14.15	−21.35	−3.20	−2.66	−0.51	−0.79	−0.58	−1.51	1.09	15.45
11	90.0	175.7	269.0	1375	5.04	440.	60	1.300	11	1.591	48	10	13.82	14.69	−22.32	−3.20	−2.67	−0.51	−0.80	−0.58	−1.52	1.09	15.49
12	100.0	175.7	269.0	1375	4.82	440.	60	1.296	11	1.578	16	10	14.15	15.23	−23.29	−3.20	−2.69	−0.51	−0.82	−0.58	−1.53	1.09	15.53
13	110.0	175.7	269.0	1375	4.60	440.	60	1.292	11	1.566	16	10	14.48	15.77	−24.27	−3.20	−2.70	−0.51	−0.83	−0.58	−1.53	1.09	15.57
14	120.0	175.7	269.0	1375	4.38	440.	60	1.289	11	1.554	16	10	14.80	16.31	−25.25	−3.20	−2.71	−0.51	−0.84	−0.58	−1.54	1.09	15.61
15	130.0	175.7	269.0	1375	4.16	440.	60	1.286	11	1.543	16	9	15.13	16.85	−26.24	−3.20	−2.72	−0.51	−0.85	−0.59	−1.54	1.09	15.66
16	140.0	175.7	269.0	1375	3.95	440.	60	1.282	11	1.533	48	9	15.46	17.38	−27.20	−3.20	−2.73	−0.51	−0.86	−0.59	−1.55	1.09	15.70
17	150.0	175.7	269.0	1375	3.74	440.	60	1.279	11	1.523	16	9	15.78	17.90	−28.17	−3.21	−2.74	−0.51	−0.87	−0.59	−1.56	1.09	15.74
18	160.0	175.7	269.0	1375	3.52	440.	60	1.276	11	1.514	16	9	16.11	18.43	−29.13	−3.21	−2.75	−0.51	−0.88	−0.59	−1.56	1.09	15.79
19	170.0	175.7	269.0	1375	3.32	440.	60	1.273	11	1.505	48	9	16.44	18.94	−30.09	−3.21	−2.76	−0.51	−0.89	−0.59	−1.57	1.09	15.83
20	180.0	175.7	269.0	1375	3.11	440.	60	1.271	11	1.497	48	9	16.76	19.45	−31.03	−3.22	−2.78	−0.51	−0.91	−0.59	−1.57	1.09	15.88
21	190.0	175.7	269.0	1375	2.91	440.	60	1.268	11	1.489	48	9	17.09	19.97	−31.98	−3.22	−2.79	−0.51	−0.92	−0.60	−1.58	1.09	15.93
22	200.0	175.7	269.0	1375	2.70	440.	60	1.265	11	1.482	48	8	17.41	20.48	−32.93	−3.22	−2.80	−0.51	−0.93	−0.60	−1.59	1.09	15.97
23	210.0	175.7	269.0	1375	2.50	440.	60	1.263	20	1.476	48	8	17.74	20.98	−33.86	−3.23	−2.81	−0.52	−0.94	−0.60	−1.59	1.09	16.02
24	220.0	175.7	269.0	1375	2.31	440.	60	1.260	12	1.470	48	8	18.07	21.48	−34.79	−3.23	−2.82	−0.52	−0.95	−0.60	−1.60	1.09	16.07
25	230.0	175.7	269.0	1375	2.11	440.	60	1.258	12	1.464	16	8	18.39	21.98	−35.72	−3.24	−2.83	−0.52	−0.96	−0.60	−1.60	1.08	16.11
26	240.0	175.7	269.0	1375	1.91	440.	60	1.256	12	1.459	16	8	18.72	22.47	−36.65	−3.24	−2.84	−0.52	−0.97	−0.60	−1.61	1.08	16.16
27	250.0	175.7	269.0	1375	1.71	440.	60	1.253	12	1.454	16	8	19.05	22.97	−37.58	−3.25	−2.85	−0.52	−0.98	−0.61	−1.61	1.08	16.21
28	260.0	175.7	269.0	1375	1.53	440.	60	1.251	20	1.449	48	8	19.37	23.46	−38.49	−3.25	−2.86	−0.52	−0.99	−0.61	−1.62	1.08	16.26
29	270.0	175.7	269.0	1375	1.34	440.	60	1.249	12	1.444	48	7	19.70	23.93	−39.39	−3.26	−2.87	−0.52	−1.00	−0.61	−1.62	1.08	16.31
30	280.0	175.7	269.0	1375	1.15	440.	60	1.246	12	1.440	48	7	20.03	24.42	−40.29	−3.26	−2.88	−0.52	−1.02	−0.61	−1.63	1.08	16.36
31	290.0	175.7	269.0	1375	0.96	440.	60	1.244	12	1.437	48	7	20.35	24.90	−41.20	−3.27	−2.88	−0.52	−1.03	−0.61	−1.64	1.08	16.41
32	300.0	175.7	269.0	1375	0.78	440.	60	1.242	12	1.433	48	7	20.68	25.38	−42.11	−3.27	−2.89	−0.52	−1.04	−0.61	−1.64	1.08	16.46
33	310.0	175.7	269.0	1375	0.59	440.	60	1.240	12	1.430	48	7	21.01	25.86	−43.03	−3.28	−2.90	−0.52	−1.05	−0.61	−1.65	1.08	16.51
34	320.0	175.7	269.0	1375	0.41	440.	60	1.237	20	1.427	48	7	21.33	26.33	−43.91	−3.28	−2.91	−0.52	−1.06	−0.62	−1.65	1.08	16.56
35	330.0	175.7	269.0	1375	0.23	440.	60	1.235	12	1.423	16	7	21.66	26.79	−44.80	−3.29	−2.92	−0.52	−1.07	−0.62	−1.66	1.08	16.61
36	340.0	175.7	269.0	1375	0.05	440.	60	1.233	31	1.420	16	7	21.98	27.26	−45.69	−3.29	−2.93	−0.53	−1.08	−0.62	−1.66	1.08	16.66
37	343.1	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.233	37	1.419	48	7	22.08	27.41	−45.96	−3.30	−2.93	−0.53	−1.08	−0.62	−1.66	1.08	16.68
38	347.8	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	1.232	11	1.419	48	17	22.24	27.39	−46.17	−3.30	−2.94	−0.53	−1.09	−0.63	−1.66	1.08	16.68
39	353.0	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.233	11	1.496	16	18	22.41	27.39	−46.43	−3.31	−2.94	−0.53	−1.11	−0.64	−1.66	1.08	16.68
40	358.5	205.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.235	11	1.592	16	19	22.59	27.41	−46.74	−3.33	−2.94	−0.53	−1.13	−0.66	−1.66	1.08	16.68
41	364.0	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.247	16	1.674	16	20	22.77	27.45	−47.09	−3.37	−2.94	−0.54	−1.15	−0.67	−1.66	1.08	16.68
42	369.1	224.5	269.0	1375	0.00	440.	60	1.263	16	1.737	16	20	22.93	27.48	−47.42	−3.40	−2.94	−0.54	−1.17	−0.69	−1.66	1.08	16.68
43	373.3	234.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.278	16	1.787	16	21	23.07	27.51	−47.66	−3.43	−2.94	−0.55	−1.18	−0.70	−1.66	1.08	16.68
44	375.3	244.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.287	16	1.803	16	21	23.14	27.49	−47.65	−3.44	−2.93	−0.55	−1.19	−0.71	−1.66	1.08	16.67
45	380.7	244.0	268.5	1306	0.00	440.	60	1.287	16	1.799	16	21	23.31	27.36	−46.63	−3.45	−2.95	−0.55	−1.17	−0.70	−1.66	1.08	16.68
46	385.8	244.0	268.1	1238	0.00	440.	60	1.287	16	1.798	16	21	23.48	27.22	−45.60	−3.47	−2.96	−0.56	−1.16	−0.70	−1.66	1.08	16.68
47	390.0	244.0	267.6	1183	0.00	440.	60	1.288	48	1.799	48	21	23.62	27.10	−44.73	−3.48	−2.98	−0.56	−1.16	−0.70	−1.66	1.08	16.68

Таблица 2 . Схема перестановки кассет для сектора симметрии 60° в процессе 15 перегрузки топлива (загрузка 16)

Свежие кассеты сорта H обогащения 3.60%

--> 9 --> 7 --> 38 -->
--> 40 --> 3 -->
--> 51 --> 5 -->

Свежие кассеты сорта G обогащения 3.60%

--> 10 --> 6 -->
--> 16 --> 47 --> 14 -->
--> 18 -->
--> 26 --> 24 --> 41 --> 11 -->
--> 27 --> 12 --> 19 --> 31 --> 4 -->
--> 33 --> 8 -->
--> 34 --> 29 --> 42 --> 28 --> 53 --> 44 -->
--> 39 -->
--> 45 -->
--> 48 --> 52 --> 35 -->
--> 50 --> 30 -->
--> 54 --> 43 --> 56 --> 46 -->
--> 55 --> 22 --> 15 --> 13 --> 17 --> 32 -->
--> 57 -->
--> 58 --> 20 --> 59 --> 37 --> 2 -->

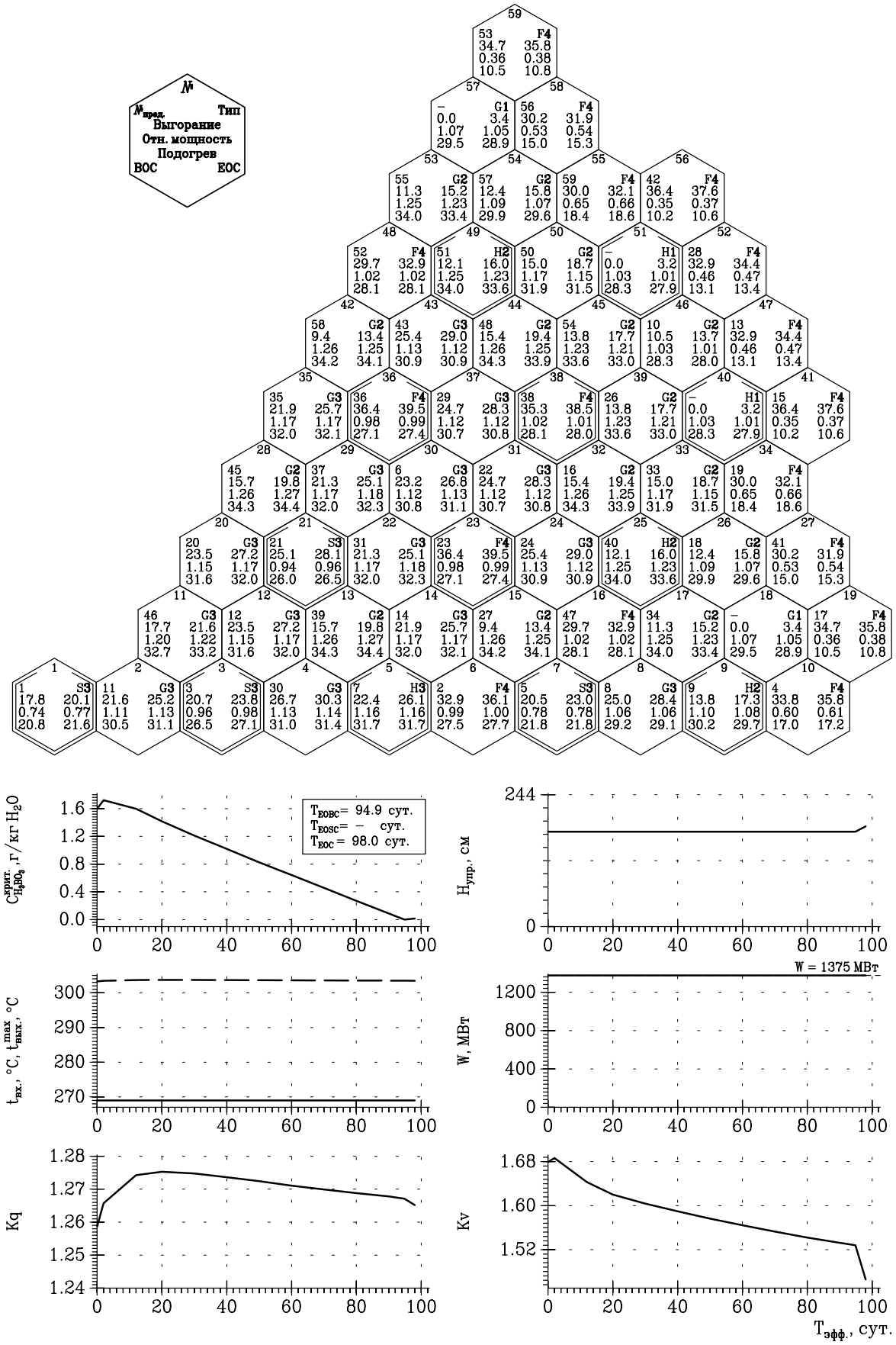


Рис. 5. Изменение основных НФХ 17-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Таблица 5. Изменение основных НФХ 17-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Xe = 1 , Sm = 3

№	$T_{эфф.}$ сут.	$H_{упр.}$ см	$t_{вх.}$ °C	W МВт	$C^{крит.}_{H_3BO_3}$ г/кг	G 10^{-2} м^3/час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	$\bar{B}$ МВт*сут /кг U	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} 1/(г/см^3)	$d\rho/dt_M$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U*$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(г/кг)	$\beta_{эфф.}$ $*10^2$	l $*10^5$ сек
1	0.0	175.7	269.0	1375	1.60	440.	60	1.259	44	1.679	15	6	21.25	23.20	−38.29	−3.38	−2.81	−0.54	−1.00	−0.62	−1.62	1.08	16.27
2	2.0	175.7	269.0	1375	1.72	440.	60	1.266	28	1.687	42	6	21.32	23.09	−38.05	−3.39	−2.81	−0.54	−1.00	−0.62	−1.62	1.08	16.24
3	12.0	175.7	269.0	1375	1.60	440.	60	1.274	28	1.643	15	6	21.65	23.42	−38.71	−3.37	−2.83	−0.54	−1.01	−0.62	−1.62	1.08	16.28
4	20.0	175.7	269.0	1375	1.42	440.	60	1.275	28	1.620	15	6	21.91	23.82	−39.49	−3.36	−2.84	−0.54	−1.02	−0.62	−1.63	1.08	16.32
5	30.0	175.7	269.0	1375	1.21	440.	60	1.275	28	1.604	42	6	22.23	24.31	−40.43	−3.36	−2.85	−0.54	−1.03	−0.62	−1.63	1.08	16.38
6	40.0	175.7	269.0	1375	1.02	440.	60	1.274	28	1.590	42	6	22.56	24.79	−41.34	−3.36	−2.86	−0.54	−1.04	−0.63	−1.64	1.08	16.43
7	50.0	175.7	269.0	1375	0.83	440.	60	1.272	13	1.576	42	6	22.89	25.27	−42.26	−3.37	−2.87	−0.54	−1.05	−0.63	−1.64	1.08	16.48
8	60.0	175.7	269.0	1375	0.64	440.	60	1.271	28	1.564	42	6	23.21	25.74	−43.16	−3.37	−2.88	−0.54	−1.07	−0.63	−1.65	1.08	16.54
9	70.0	175.7	269.0	1375	0.46	440.	60	1.270	13	1.553	42	6	23.54	26.21	−44.06	−3.37	−2.89	−0.54	−1.08	−0.63	−1.65	1.08	16.59
10	80.0	175.7	269.0	1375	0.27	440.	60	1.269	13	1.542	42	6	23.87	26.69	−44.97	−3.37	−2.90	−0.54	−1.09	−0.64	−1.66	1.08	16.64
11	90.0	175.7	269.0	1375	0.09	440.	60	1.268	13	1.533	42	6	24.19	27.16	−45.88	−3.37	−2.91	−0.54	−1.10	−0.64	−1.67	1.08	16.70
12	94.9	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.267	28	1.528	42	6	24.35	27.40	−46.33	−3.38	−2.91	−0.54	−1.11	−0.64	−1.67	1.08	16.72
13	98.0	185.4	269.0	1375	0.02	440.	60	1.265	28	1.466	15	7	24.45	27.33	−46.43	−3.36	−2.92	−0.54	−1.11	−0.65	−1.67	1.08	16.72

Таблица 3. Схема перестановки кассет для сектора симметрии 60° в процессе 16 перегрузки топлива (загрузка 17)

Свежие кассеты сорта G обогащения 3.60%

--> 18 --> 26 --> 39 --> 13 --> 47 --> 16 --> 32 -->
--> 57 --> 54 --> 45 --> 28 --> 52 --> 48 --> 44 -->

Свежие кассеты сорта H обогащения 3.60%

--> 40 --> 25 -->
--> 51 --> 49 -->

Перестановка кассет

11 --> 2 --> 6 --> 30 --> 4 --> 10 --> 46 --> 11
7 --> 5 --> 7
27 --> 15 --> 41 --> 27
34 --> 17 --> 19 --> 34
31 --> 22 --> 31
37 --> 29 --> 37
58 --> 42 --> 56 --> 58
55 --> 53 --> 59 --> 55

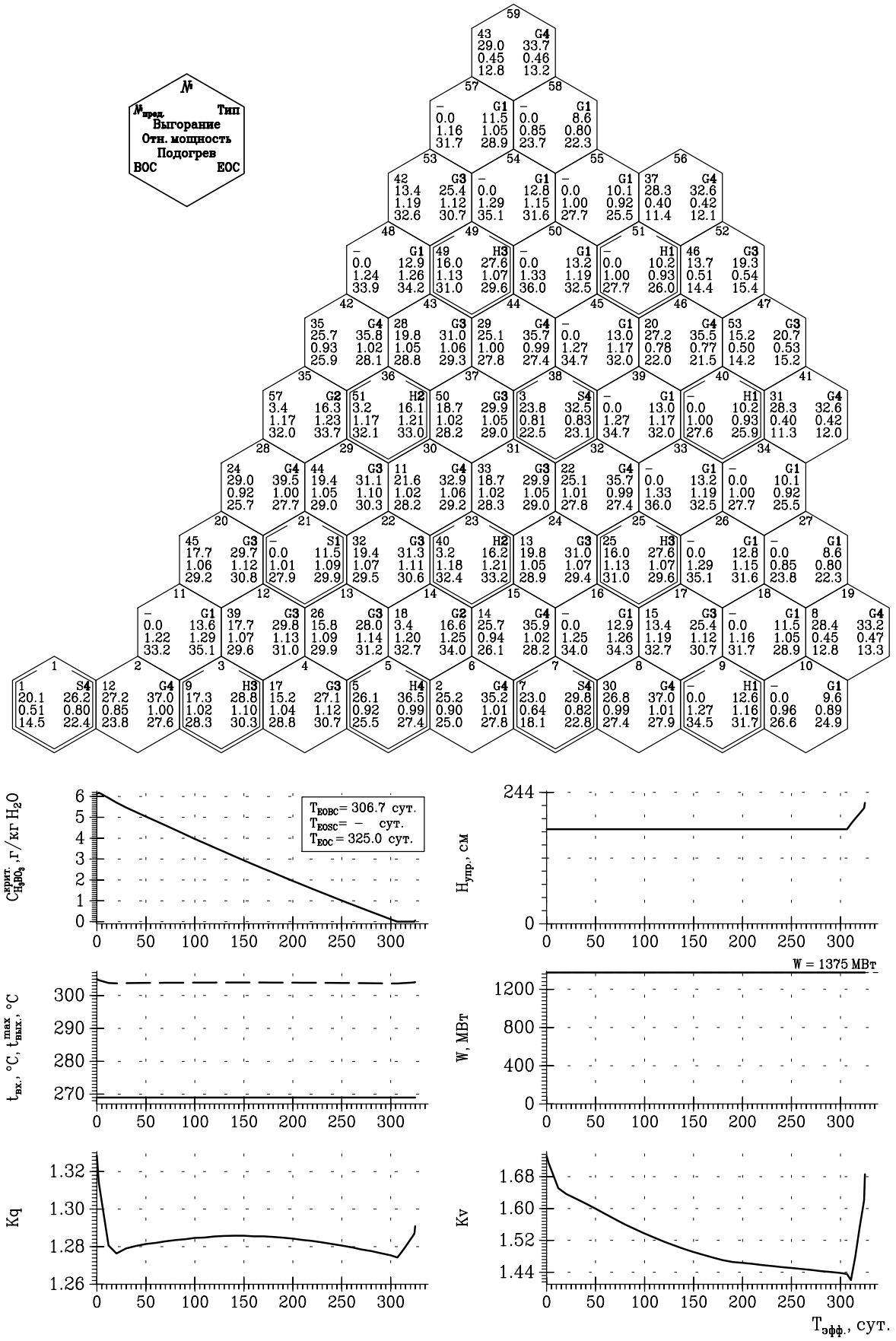


Рис. 6. Изменение основных НФХ 18-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Таблица 4. Изменение основных НФХ 18-ой топливной загрузки в процессе работы реактора

Xe = 1 , Sm = 3

№	$T_{эфф.}$ сут.	$H_{упр.}$ см	$t_{вх.}$ °C	W МВт	$C^{крит.}_{H_3BO_3}$ г/кг	G 10^{-2} м^3/час	Sim	Kq	Nk	Kv	Nk	Nz	$\bar{B}$ МВт*сут /кг U	$\partial\rho/\partial\gamma$ 10^{-2} 1/(г/см^3)	$d\rho/dt_M$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U$ 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial t_U$* 10^{-5} °C^{-1}	$\partial\rho/\partial N_U$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_B$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial N_{KB}$ 10^{-5} МВт$^{-1}$	$\partial\rho/\partial C$ 10^{-2} 1/(г/кг)	$\beta_{эфф.}$ $*10^2$	l $*10^5$ сек
1	0.0	175.7	269.0	1375	6.12	440.	60	1.328	33	1.732	33	11	12.88	12.96	−19.34	−3.08	−2.58	−0.49	−0.77	−0.58	−1.54	1.10	15.53
2	2.0	175.7	269.0	1375	6.19	440.	60	1.314	33	1.715	33	11	12.95	12.83	−19.06	−3.09	−2.58	−0.49	−0.77	−0.57	−1.53	1.10	15.51
3	12.0	175.7	269.0	1375	5.93	440.	60	1.281	33	1.651	16	11	13.27	13.00	−19.34	−3.10	−2.60	−0.49	−0.77	−0.57	−1.53	1.10	15.55
4	20.0	175.7	269.0	1375	5.71	440.	60	1.276	11	1.637	16	11	13.53	13.35	−19.98	−3.10	−2.61	−0.49	−0.77	−0.57	−1.54	1.10	15.58
5	30.0	175.7	269.0	1375	5.47	440.	60	1.279	11	1.625	16	11	13.86	13.84	−20.87	−3.10	−2.62	−0.49	−0.78	−0.57	−1.54	1.09	15.62
6	40.0	175.7	269.0	1375	5.25	440.	60	1.280	11	1.612	16	11	14.19	14.34	−21.75	−3.10	−2.63	−0.49	−0.79	−0.57	−1.55	1.09	15.66
7	50.0	175.7	269.0	1375	5.04	440.	60	1.281	11	1.599	16	11	14.51	14.85	−22.66	−3.10	−2.64	−0.50	−0.80	−0.57	−1.56	1.09	15.69
8	60.0	175.7	269.0	1375	4.83	440.	60	1.282	11	1.586	16	11	14.84	15.36	−23.57	−3.10	−2.65	−0.50	−0.81	−0.57	−1.56	1.09	15.73
9	70.0	175.7	269.0	1375	4.62	440.	60	1.283	11	1.573	16	11	15.17	15.86	−24.47	−3.10	−2.67	−0.50	−0.82	−0.58	−1.57	1.09	15.77
10	80.0	175.7	269.0	1375	4.41	440.	60	1.283	11	1.560	16	11	15.49	16.38	−25.40	−3.11	−2.68	−0.50	−0.83	−0.58	−1.57	1.09	15.81
11	90.0	175.7	269.0	1375	4.19	440.	60	1.284	11	1.549	16	10	15.82	16.91	−26.36	−3.11	−2.69	−0.50	−0.84	−0.58	−1.58	1.09	15.85
12	100.0	175.7	269.0	1375	3.97	440.	60	1.285	11	1.537	16	10	16.15	17.43	−27.32	−3.11	−2.70	−0.50	−0.86	−0.58	−1.58	1.09	15.89
13	110.0	175.7	269.0	1375	3.76	440.	60	1.285	11	1.527	16	10	16.47	17.95	−28.25	−3.12	−2.71	−0.50	−0.87	−0.58	−1.59	1.09	15.93
14	120.0	175.7	269.0	1375	3.56	440.	60	1.285	11	1.517	16	10	16.80	18.45	−29.18	−3.12	−2.72	−0.50	−0.88	−0.58	−1.59	1.09	15.98
15	130.0	175.7	269.0	1375	3.35	440.	60	1.286	11	1.508	16	10	17.12	18.97	−30.12	−3.12	−2.73	−0.50	−0.89	−0.58	−1.60	1.09	16.02
16	140.0	175.7	269.0	1375	3.15	440.	60	1.286	11	1.499	16	10	17.45	19.48	−31.05	−3.13	−2.74	−0.50	−0.90	−0.59	−1.60	1.09	16.06
17	150.0	175.7	269.0	1375	2.94	440.	60	1.286	11	1.491	16	9	17.78	19.99	−32.00	−3.13	−2.75	−0.50	−0.91	−0.59	−1.61	1.09	16.11
18	160.0	175.7	269.0	1375	2.74	440.	60	1.285	11	1.484	16	9	18.10	20.49	−32.92	−3.14	−2.76	−0.50	−0.92	−0.59	−1.62	1.09	16.15
19	170.0	175.7	269.0	1375	2.54	440.	60	1.285	11	1.477	16	9	18.43	20.98	−33.83	−3.14	−2.77	−0.50	−0.93	−0.59	−1.62	1.09	16.20
20	180.0	175.7	269.0	1375	2.35	440.	60	1.285	11	1.471	16	9	18.76	21.48	−34.75	−3.15	−2.78	−0.50	−0.94	−0.59	−1.63	1.09	16.25
21	190.0	175.7	269.0	1375	2.15	440.	60	1.285	11	1.466	11	7	19.08	21.97	−35.67	−3.16	−2.79	−0.50	−0.95	−0.59	−1.63	1.09	16.29
22	200.0	175.7	269.0	1375	1.95	440.	60	1.284	11	1.464	11	7	19.41	22.47	−36.60	−3.16	−2.80	−0.50	−0.96	−0.60	−1.64	1.09	16.34
23	210.0	175.7	269.0	1375	1.76	440.	60	1.284	11	1.461	11	7	19.74	22.95	−37.49	−3.17	−2.81	−0.51	−0.98	−0.60	−1.64	1.08	16.39
24	220.0	175.7	269.0	1375	1.58	440.	60	1.283	11	1.458	11	7	20.06	23.42	−38.38	−3.17	−2.82	−0.51	−0.99	−0.60	−1.65	1.08	16.44
25	230.0	175.7	269.0	1375	1.39	440.	60	1.282	11	1.456	11	7	20.39	23.90	−39.27	−3.18	−2.83	−0.51	−1.00	−0.60	−1.65	1.08	16.48
26	240.0	175.7	269.0	1375	1.20	440.	60	1.281	11	1.453	11	7	20.72	24.37	−40.17	−3.19	−2.84	−0.51	−1.01	−0.60	−1.66	1.08	16.53
27	250.0	175.7	269.0	1375	1.02	440.	60	1.281	11	1.451	11	7	21.04	24.85	−41.06	−3.19	−2.85	−0.51	−1.02	−0.60	−1.66	1.08	16.58
28	260.0	175.7	269.0	1375	0.83	440.	60	1.280	11	1.448	11	7	21.37	25.33	−41.96	−3.20	−2.86	−0.51	−1.03	−0.61	−1.67	1.08	16.63
29	270.0	175.7	269.0	1375	0.65	440.	60	1.279	11	1.446	11	7	21.69	25.79	−42.84	−3.21	−2.87	−0.51	−1.04	−0.61	−1.67	1.08	16.68
30	280.0	175.7	269.0	1375	0.47	440.	60	1.278	11	1.443	11	7	22.02	26.25	−43.70	−3.21	−2.87	−0.51	−1.05	−0.61	−1.68	1.08	16.73
31	290.0	175.7	269.0	1375	0.29	440.	60	1.277	11	1.441	11	7	22.35	26.71	−44.58	−3.22	−2.88	−0.51	−1.06	−0.61	−1.68	1.08	16.78
32	300.0	175.7	269.0	1375	0.12	440.	60	1.275	11	1.438	11	7	22.67	27.18	−45.45	−3.22	−2.89	−0.51	−1.07	−0.61	−1.69	1.08	16.84
33	306.7	175.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.274	11	1.436	11	6	22.89	27.49	−46.04	−3.23	−2.90	−0.52	−1.08	−0.61	−1.69	1.08	16.87
34	310.6	185.4	269.0	1375	0.00	440.	60	1.277	11	1.420	11	17	23.02	27.46	−46.22	−3.23	−2.90	−0.52	−1.09	−0.62	−1.69	1.08	16.87
35	314.9	195.2	269.0	1375	0.00	440.	60	1.280	11	1.478	11	19	23.16	27.46	−46.45	−3.24	−2.91	−0.52	−1.10	−0.63	−1.69	1.08	16.87
36	319.5	205.0	269.0	1375	0.00	440.	60	1.283	11	1.553	16	19	23.31	27.46	−46.71	−3.26	−2.91	−0.52	−1.11	−0.64	−1.69	1.08	16.87
37	324.1	214.7	269.0	1375	0.00	440.	60	1.287	11	1.620	16	20	23.46	27.48	−47.00	−3.28	−2.91	−0.52	−1.13	−0.66	−1.69	1.08	16.88
38	325.0	224.5	269.0	1375	0.06	440.	60	1.291	11	1.686	16	20	23.49	27.35	−47.00	−3.32	−2.90	−0.53	−1.14	−0.67	−1.69	1.08	16.86

Таблица 5. Схема перестановки кассет для сектора симметрии 60° в процессе 17 перегрузки топлива (загрузка 18)

Свежие кассеты сорта H обогащения 3.60%

--> 9 --> 3 --> 38 -->
--> 40 --> 23 -->
--> 51 --> 36 -->

Свежие кассеты сорта G обогащения 3.60%

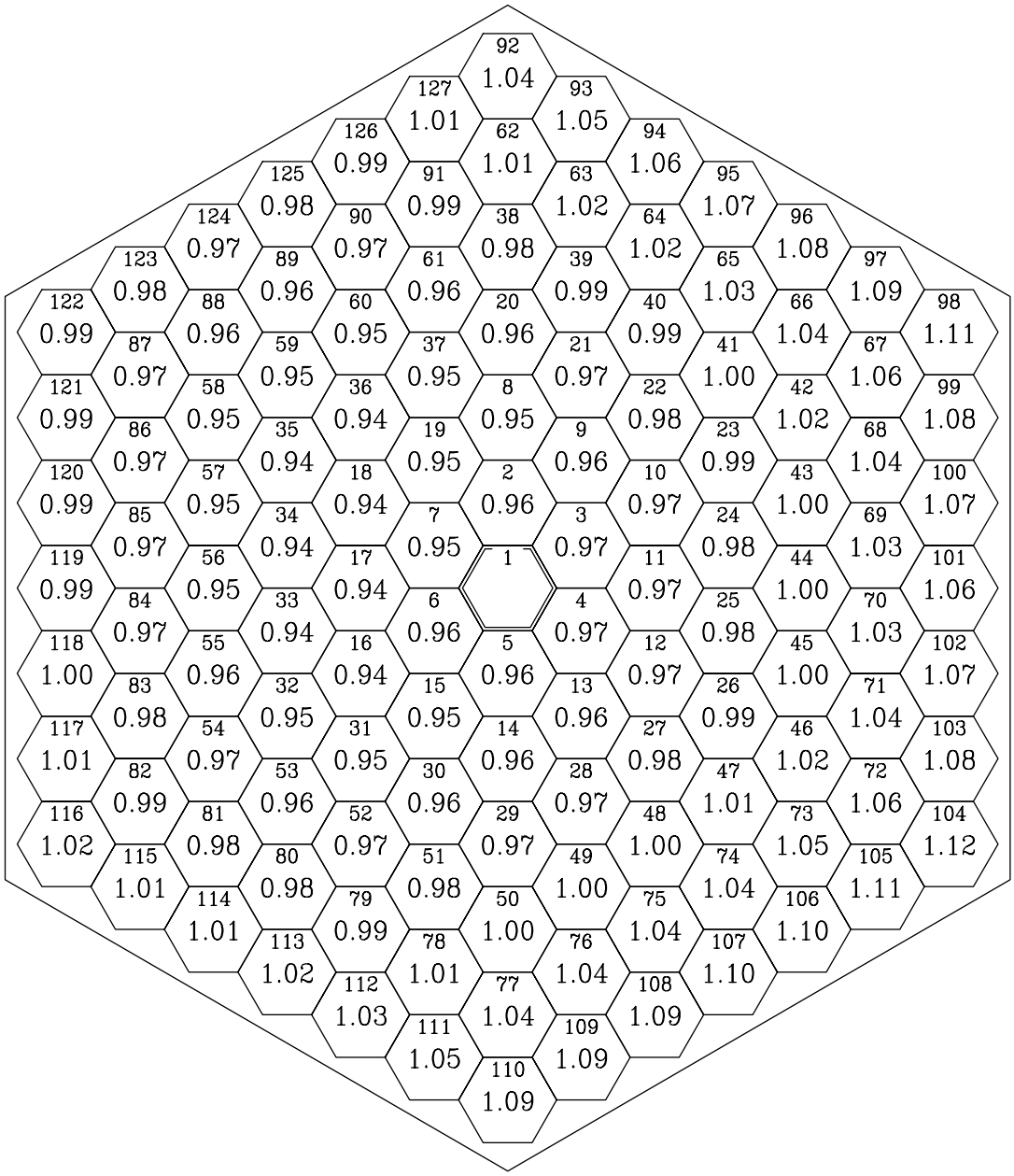
--> 10 -->
--> 11 --> 30 --> 8 --> 19 -->
--> 16 -->
--> 18 --> 14 --> 15 --> 17 --> 4 -->
--> 26 --> 13 --> 24 --> 28 --> 43 --> 59 -->
--> 27 -->
--> 33 --> 31 --> 41 -->
--> 34 -->
--> 39 --> 12 --> 2 --> 6 -->
--> 45 --> 20 --> 46 --> 52 -->
--> 48 -->
--> 50 --> 37 --> 56 -->
--> 54 -->
--> 55 -->
--> 57 --> 35 --> 42 --> 53 --> 47 -->
--> 58 -->

Свежие кассеты сорта S обогащения 2.40%

--> 21 -->

Перестановка кассет

32 --> 22 --> 32
44 --> 29 --> 44



$T_{эфф.}$	0.00	сут.
W	1375.0	МВт
$C^{крит.}_{H_3BO_3}$	6.12	г/кг
Ql	155.1	Вт/см
Номер ТВС	28	
Номер слоя	10	
Номер твэл	104	
Kk_{max}	1.12	

Рис. 7. Потвэльное распределение энерговыделения в ТВС
(загрузка 18)

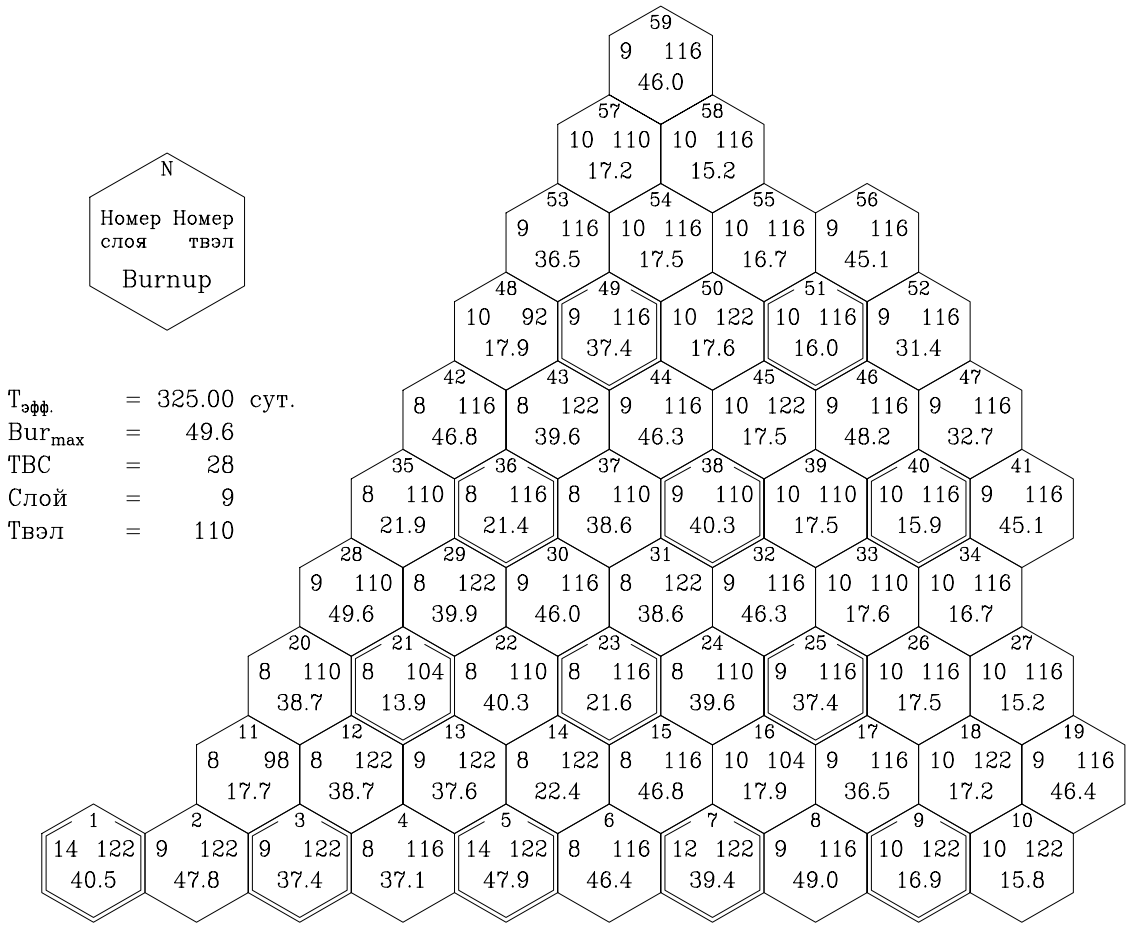


Рис. 8. Максимальные глубины выгорания в топливной таблетке (МВт*сут./кг)
18 - кампания

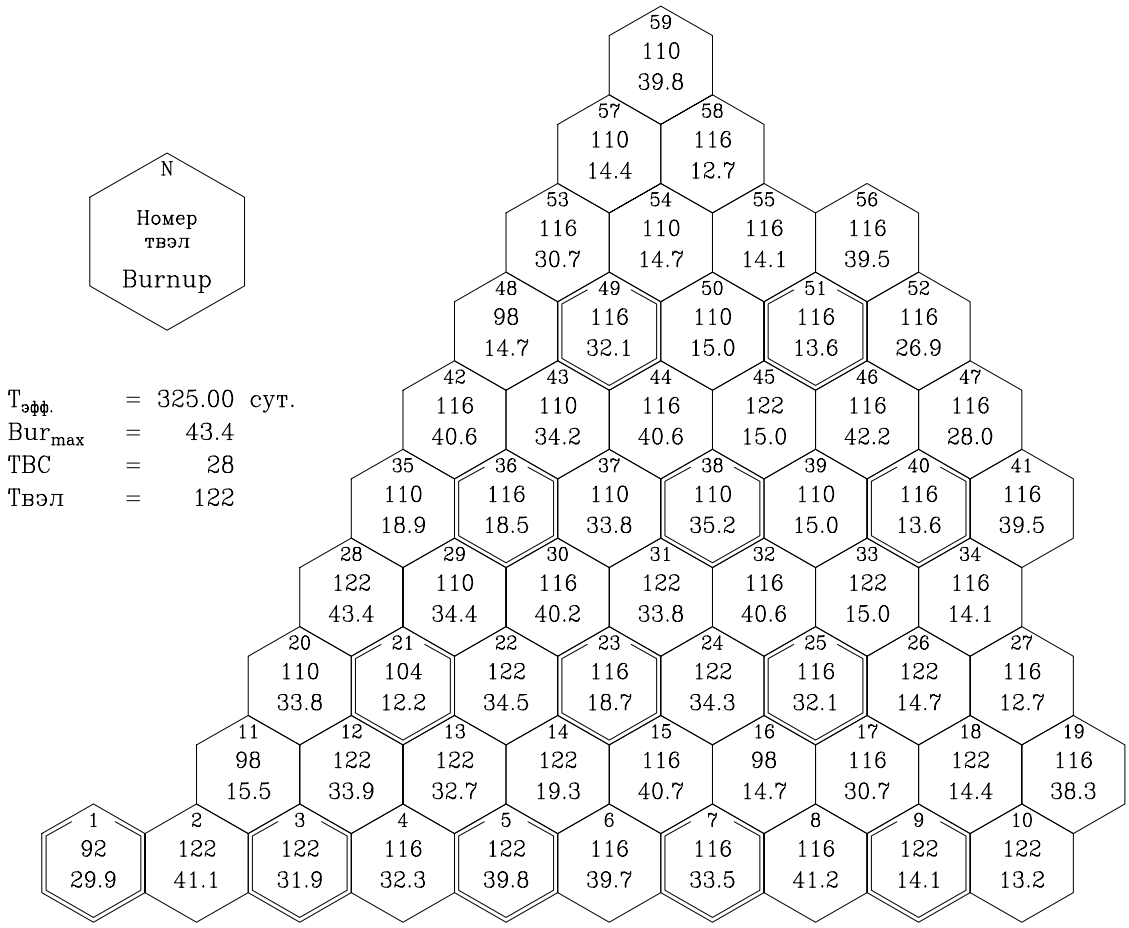


Рис. 9. Максимальные глубины выгорания в твэле (МВт*сут./кг)
18 - кампания

Таблица 6

История выгорания твэла N 6, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.32	–	0.43	1.20	0.52	2.73	0.55	3.78	0.82	4.58
24	0.45	–	0.59	1.66	0.69	3.74	0.74	5.16	1.08	6.23
23	0.57	–	0.74	2.10	0.85	4.69	0.90	6.43	1.29	7.72
22	0.68	–	0.85	2.46	0.97	5.43	1.01	7.38	1.40	8.82
21	0.78	–	0.94	2.76	1.04	6.01	1.08	8.11	1.44	9.63
20	0.87	–	1.01	3.03	1.10	6.49	1.13	8.70	1.44	10.25
19	0.95	–	1.08	3.28	1.15	6.92	1.16	9.22	1.40	10.77
18	1.04	–	1.14	3.52	1.19	7.33	1.20	9.69	1.35	11.22
17	1.12	–	1.19	3.74	1.22	7.68	1.22	10.10	1.29	11.59
16	1.20	–	1.23	3.92	1.24	7.96	1.23	10.42	1.23	11.87
15	1.26	–	1.26	4.08	1.26	8.19	1.24	10.67	1.18	12.09
14	1.31	–	1.29	4.20	1.27	8.37	1.25	10.87	1.14	12.25
13	1.36	–	1.31	4.30	1.27	8.52	1.26	11.03	1.10	12.37
12	1.40	–	1.32	4.38	1.28	8.63	1.26	11.15	1.07	12.47
11	1.43	–	1.33	4.44	1.29	8.71	1.27	11.25	1.05	12.54
10	1.45	–	1.34	4.48	1.29	8.77	1.27	11.32	1.03	12.60
9	1.46	–	1.34	4.50	1.29	8.80	1.28	11.35	1.02	12.62
8	1.46	–	1.34	4.48	1.29	8.77	1.28	11.33	1.01	12.59
7	1.44	–	1.32	4.42	1.29	8.68	1.28	11.23	1.00	12.48
6	1.40	–	1.29	4.30	1.27	8.49	1.27	11.01	0.98	12.24
5	1.32	–	1.24	4.10	1.24	8.15	1.24	10.60	0.96	11.80
4	1.21	–	1.16	3.79	1.17	7.58	1.18	9.91	0.91	11.05
3	1.05	–	1.02	3.31	1.05	6.69	1.07	8.79	0.83	9.83
2	0.83	–	0.82	2.63	0.86	5.37	0.89	7.10	0.68	7.96
1	0.55	–	0.56	1.78	0.60	3.67	0.63	4.89	0.48	5.49

Таблица 7

История выгорания твэла N 6, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.34	4.58	0.45	5.87	0.53	7.46	0.60	10.10	0.97	11.37
24	0.47	6.22	0.61	7.98	0.70	10.12	0.78	13.59	1.25	15.24
23	0.59	7.72	0.75	9.90	0.85	12.50	0.92	16.63	1.44	18.58
22	0.68	8.82	0.85	11.33	0.94	14.25	1.00	18.80	1.53	20.91
21	0.77	9.63	0.93	12.42	1.01	15.58	1.05	20.40	1.54	22.58
20	0.86	10.25	1.00	13.31	1.06	16.67	1.09	21.69	1.50	23.87
19	0.96	10.77	1.07	14.12	1.11	17.67	1.12	22.88	1.43	25.02
18	1.07	11.22	1.15	14.88	1.16	18.66	1.15	24.09	1.35	26.14
17	1.17	11.59	1.21	15.51	1.20	19.46	1.18	25.03	1.27	27.00
16	1.25	11.87	1.26	16.00	1.23	20.06	1.19	25.71	1.19	27.59
15	1.31	12.09	1.29	16.36	1.24	20.49	1.19	26.18	1.13	27.98
14	1.36	12.25	1.31	16.64	1.25	20.81	1.19	26.51	1.08	28.24
13	1.40	12.37	1.32	16.84	1.25	21.04	1.19	26.75	1.04	28.43
12	1.43	12.47	1.33	17.00	1.25	21.22	1.20	26.93	1.01	28.56
11	1.45	12.54	1.33	17.11	1.26	21.34	1.20	27.07	0.99	28.67
10	1.46	12.60	1.34	17.18	1.26	21.42	1.20	27.17	0.98	28.75
9	1.46	12.62	1.34	17.20	1.26	21.45	1.21	27.21	0.97	28.78
8	1.45	12.59	1.33	17.15	1.26	21.39	1.21	27.17	0.97	28.74
7	1.43	12.48	1.32	16.97	1.26	21.19	1.22	26.99	0.97	28.55
6	1.39	12.24	1.30	16.62	1.25	20.79	1.22	26.57	0.97	28.12
5	1.32	11.80	1.26	16.00	1.23	20.06	1.21	25.75	0.96	27.30
4	1.22	11.05	1.19	14.97	1.18	18.82	1.18	24.32	0.93	25.82
3	1.08	9.83	1.07	13.32	1.08	16.82	1.10	21.92	0.87	23.32
2	0.87	7.96	0.88	10.80	0.91	13.73	0.95	18.06	0.75	19.26
1	0.60	5.49	0.62	7.47	0.65	9.55	0.69	12.69	0.55	13.57

Таблица 8

История выгорания твэла N 6, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.48	11.37	0.58	13.01
24	0.63	15.24	0.75	17.39
23	0.75	18.58	0.88	21.12
22	0.83	20.91	0.96	23.70
21	0.88	22.58	1.01	25.54
20	0.93	23.87	1.04	26.96
19	0.98	25.02	1.08	28.24
18	1.04	26.14	1.12	29.52
17	1.09	27.00	1.15	30.49
16	1.13	27.59	1.16	31.16
15	1.16	27.98	1.18	31.62
14	1.19	28.24	1.18	31.93
13	1.21	28.43	1.19	32.16
12	1.24	28.56	1.20	32.34
11	1.26	28.67	1.20	32.49
10	1.29	28.75	1.21	32.61
9	1.31	28.78	1.22	32.69
8	1.33	28.74	1.23	32.69
7	1.35	28.55	1.24	32.53
6	1.35	28.13	1.24	32.11
5	1.34	27.30	1.23	31.24
4	1.30	25.82	1.19	29.64
3	1.21	23.32	1.12	26.88
2	1.03	19.26	0.97	22.32
1	0.75	13.57	0.72	15.82

Таблица 9

История выгорания твэла N 6, в кассете работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.43	13.07	0.53	14.64	0.59	16.46	0.63	18.58
24	0.57	17.47	0.69	19.56	0.76	21.93	0.80	24.66
23	0.69	21.21	0.82	23.71	0.89	26.50	0.92	29.65
22	0.77	23.80	0.90	26.57	0.96	29.62	0.99	33.00
21	0.83	25.65	0.96	28.61	1.00	31.80	1.02	35.31
20	0.88	27.08	0.99	30.18	1.02	33.46	1.03	37.04
19	0.92	28.36	1.01	31.58	1.03	34.91	1.03	38.51
18	0.95	29.64	1.03	32.93	1.03	36.30	1.03	39.90
17	0.98	30.61	1.04	33.97	1.03	37.36	1.03	40.94
16	1.00	31.29	1.04	34.69	1.03	38.08	1.02	41.67
15	1.02	31.74	1.05	35.19	1.03	38.58	1.02	42.15
14	1.03	32.05	1.05	35.52	1.03	38.92	1.02	42.48
13	1.03	32.28	1.05	35.77	1.03	39.17	1.02	42.72
12	1.04	32.46	1.05	35.96	1.03	39.36	1.02	42.92
11	1.04	32.61	1.05	36.12	1.03	39.51	1.02	43.08
10	1.04	32.73	1.05	36.24	1.03	39.64	1.02	43.21
9	1.03	32.81	1.05	36.31	1.04	39.71	1.03	43.31
8	1.02	32.81	1.05	36.28	1.04	39.70	1.04	43.32
7	1.01	32.66	1.05	36.10	1.05	39.52	1.04	43.16
6	0.98	32.23	1.04	35.62	1.04	39.01	1.05	42.65
5	0.94	31.36	1.02	34.64	1.03	37.97	1.04	41.58
4	0.89	29.76	0.97	32.86	1.00	36.08	1.02	39.59
3	0.80	26.99	0.90	29.82	0.93	32.81	0.96	36.11
2	0.67	22.42	0.77	24.82	0.81	27.39	0.85	30.27
1	0.48	15.89	0.56	17.63	0.60	19.52	0.64	21.69

Таблица 10

История выгорания твэла N 16, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.32	–	0.42	1.19	0.51	2.71	0.55	3.76	0.82	4.56
24	0.44	–	0.58	1.65	0.69	3.72	0.73	5.12	1.08	6.18
23	0.57	–	0.73	2.09	0.85	4.66	0.89	6.37	1.29	7.66
22	0.68	–	0.84	2.44	0.96	5.38	1.00	7.31	1.40	8.74
21	0.77	–	0.93	2.74	1.03	5.94	1.07	8.02	1.44	9.53
20	0.86	–	1.00	3.00	1.09	6.42	1.12	8.61	1.43	10.15
19	0.95	–	1.07	3.25	1.14	6.86	1.15	9.13	1.40	10.67
18	1.03	–	1.13	3.49	1.17	7.26	1.18	9.60	1.34	11.12
17	1.11	–	1.18	3.71	1.21	7.61	1.21	10.01	1.28	11.49
16	1.19	–	1.22	3.89	1.23	7.90	1.22	10.33	1.23	11.77
15	1.25	–	1.25	4.04	1.24	8.12	1.23	10.58	1.17	11.99
14	1.30	–	1.28	4.17	1.25	8.30	1.24	10.78	1.13	12.15
13	1.35	–	1.29	4.27	1.26	8.44	1.25	10.93	1.09	12.27
12	1.39	–	1.31	4.34	1.27	8.55	1.25	11.06	1.06	12.36
11	1.42	–	1.32	4.40	1.27	8.64	1.26	11.15	1.04	12.43
10	1.44	–	1.32	4.44	1.28	8.69	1.26	11.21	1.02	12.48
9	1.45	–	1.33	4.46	1.28	8.72	1.27	11.24	1.01	12.50
8	1.44	–	1.32	4.44	1.28	8.69	1.27	11.22	1.00	12.47
7	1.43	–	1.31	4.39	1.28	8.61	1.27	11.13	0.99	12.37
6	1.38	–	1.28	4.27	1.26	8.42	1.26	10.91	0.98	12.13
5	1.31	–	1.23	4.07	1.23	8.08	1.23	10.51	0.95	11.70
4	1.20	–	1.15	3.76	1.16	7.52	1.17	9.83	0.90	10.96
3	1.05	–	1.02	3.29	1.04	6.65	1.06	8.74	0.82	9.76
2	0.82	–	0.82	2.62	0.86	5.34	0.88	7.06	0.68	7.91
1	0.55	–	0.56	1.78	0.60	3.66	0.62	4.87	0.48	5.47

Таблица 11

История выгорания твэла N 16, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.33	4.56	0.44	5.82	0.52	7.38	0.59	9.97	0.96	11.21
24	0.46	6.18	0.60	7.91	0.69	10.00	0.77	13.41	1.24	15.03
23	0.57	7.66	0.73	9.80	0.83	12.34	0.91	16.40	1.43	18.32
22	0.67	8.74	0.83	11.20	0.92	14.06	0.99	18.53	1.51	20.61
21	0.76	9.53	0.91	12.27	0.99	15.37	1.04	20.10	1.52	22.26
20	0.84	10.15	0.98	13.15	1.04	16.45	1.07	21.38	1.48	23.54
19	0.94	10.67	1.05	13.95	1.09	17.45	1.10	22.58	1.42	24.69
18	1.05	11.12	1.13	14.72	1.15	18.44	1.14	23.79	1.34	25.83
17	1.15	11.49	1.19	15.36	1.19	19.25	1.17	24.75	1.25	26.70
16	1.23	11.77	1.24	15.84	1.21	19.85	1.18	25.43	1.18	27.29
15	1.29	11.99	1.27	16.20	1.23	20.28	1.18	25.90	1.12	27.68
14	1.34	12.15	1.29	16.47	1.23	20.59	1.18	26.23	1.07	27.94
13	1.38	12.27	1.30	16.67	1.24	20.82	1.18	26.46	1.03	28.12
12	1.41	12.36	1.31	16.82	1.24	20.98	1.18	26.63	1.00	28.25
11	1.43	12.43	1.31	16.93	1.24	21.10	1.19	26.77	0.98	28.35
10	1.44	12.48	1.32	17.00	1.24	21.18	1.19	26.86	0.97	28.42
9	1.44	12.50	1.32	17.02	1.25	21.20	1.19	26.90	0.96	28.45
8	1.43	12.47	1.31	16.96	1.25	21.14	1.20	26.86	0.96	28.41
7	1.40	12.37	1.30	16.79	1.25	20.95	1.21	26.67	0.96	28.22
6	1.36	12.13	1.28	16.45	1.24	20.55	1.21	26.25	0.96	27.80
5	1.30	11.70	1.24	15.84	1.21	19.83	1.20	25.45	0.95	26.98
4	1.20	10.96	1.17	14.82	1.16	18.61	1.16	24.03	0.92	25.52
3	1.06	9.76	1.05	13.20	1.06	16.64	1.08	21.66	0.86	23.05
2	0.85	7.91	0.87	10.71	0.89	13.59	0.93	17.85	0.74	19.04
1	0.59	5.47	0.61	7.42	0.64	9.46	0.68	12.55	0.54	13.42

Таблица 12

История выгорания твэла N 16, в кассете, работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.47	11.21	0.57	12.82
24	0.61	15.03	0.74	17.14
23	0.73	18.32	0.86	20.81
22	0.81	20.61	0.94	23.35
21	0.86	22.26	0.99	25.16
20	0.91	23.54	1.02	26.57
19	0.96	24.69	1.06	27.86
18	1.02	25.83	1.10	29.15
17	1.07	26.70	1.13	30.14
16	1.11	27.29	1.15	30.82
15	1.14	27.68	1.16	31.27
14	1.17	27.94	1.17	31.58
13	1.20	28.12	1.18	31.81
12	1.22	28.25	1.18	31.99
11	1.25	28.35	1.19	32.13
10	1.27	28.42	1.20	32.25
9	1.30	28.45	1.21	32.32
8	1.32	28.41	1.22	32.31
7	1.33	28.22	1.22	32.16
6	1.33	27.80	1.23	31.74
5	1.32	26.98	1.21	30.88
4	1.28	25.52	1.18	29.30
3	1.19	23.05	1.10	26.57
2	1.02	19.04	0.95	22.06
1	0.74	13.42	0.70	15.63

Таблица 13

История выгорания твэла N 16, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.42	12.88	0.52	14.43	0.58	16.23	0.62	18.32
24	0.56	17.22	0.69	19.28	0.75	21.63	0.80	24.32
23	0.68	20.90	0.81	23.37	0.88	26.13	0.92	29.25
22	0.76	23.45	0.90	26.19	0.95	29.21	0.98	32.57
21	0.82	25.27	0.95	28.20	0.99	31.37	1.01	34.85
20	0.87	26.69	0.98	29.76	1.01	33.02	1.02	36.56
19	0.91	27.98	1.00	31.16	1.02	34.47	1.03	38.04
18	0.94	29.27	1.02	32.54	1.03	35.88	1.02	39.45
17	0.97	30.27	1.03	33.59	1.03	36.95	1.02	40.51
16	0.99	30.94	1.03	34.32	1.03	37.68	1.02	41.24
15	1.00	31.39	1.04	34.81	1.02	38.17	1.01	41.72
14	1.01	31.71	1.04	35.14	1.02	38.51	1.01	42.05
13	1.02	31.93	1.04	35.38	1.02	38.75	1.01	42.29
12	1.03	32.10	1.04	35.57	1.02	38.94	1.01	42.47
11	1.03	32.25	1.04	35.72	1.02	39.09	1.01	42.63
10	1.02	32.37	1.04	35.83	1.03	39.21	1.02	42.76
9	1.02	32.44	1.05	35.90	1.03	39.28	1.02	42.86
8	1.01	32.43	1.05	35.87	1.03	39.27	1.03	42.87
7	1.00	32.28	1.04	35.69	1.04	39.08	1.04	42.70
6	0.97	31.86	1.03	35.21	1.04	38.58	1.04	42.20
5	0.93	31.00	1.01	34.24	1.02	37.55	1.04	41.13
4	0.88	29.41	0.96	32.48	0.99	35.67	1.01	39.16
3	0.79	26.67	0.89	29.48	0.93	32.43	0.95	35.71
2	0.66	22.15	0.76	24.52	0.80	27.06	0.84	29.91
1	0.48	15.70	0.55	17.41	0.60	19.28	0.63	21.41

Таблица 14

История выгорания твэла N 32, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.33	–	0.43	1.22	0.52	2.77	0.56	3.84	0.85	4.65
24	0.45	–	0.59	1.68	0.70	3.79	0.75	5.22	1.11	6.30
23	0.58	–	0.74	2.12	0.86	4.74	0.91	6.49	1.32	7.80
22	0.69	–	0.86	2.48	0.97	5.47	1.01	7.43	1.43	8.89
21	0.78	–	0.94	2.78	1.05	6.04	1.08	8.15	1.47	9.69
20	0.87	–	1.02	3.05	1.11	6.52	1.13	8.74	1.47	10.32
19	0.96	–	1.09	3.31	1.15	6.97	1.17	9.28	1.43	10.85
18	1.05	–	1.15	3.55	1.20	7.38	1.21	9.76	1.37	11.31
17	1.13	–	1.20	3.78	1.23	7.75	1.23	10.19	1.31	11.70
16	1.21	–	1.24	3.96	1.25	8.04	1.25	10.52	1.25	11.99
15	1.27	–	1.28	4.12	1.27	8.28	1.26	10.78	1.20	12.21
14	1.33	–	1.30	4.24	1.28	8.46	1.27	10.98	1.15	12.37
13	1.37	–	1.32	4.34	1.29	8.60	1.27	11.14	1.11	12.50
12	1.41	–	1.33	4.42	1.29	8.71	1.28	11.26	1.08	12.59
11	1.44	–	1.34	4.48	1.30	8.80	1.28	11.35	1.06	12.66
10	1.46	–	1.35	4.52	1.30	8.85	1.28	11.42	1.04	12.71
9	1.47	–	1.35	4.54	1.31	8.88	1.29	11.45	1.03	12.73
8	1.47	–	1.35	4.52	1.31	8.86	1.29	11.43	1.02	12.71
7	1.45	–	1.33	4.47	1.30	8.77	1.29	11.34	1.01	12.60
6	1.41	–	1.31	4.35	1.28	8.58	1.28	11.12	1.00	12.36
5	1.34	–	1.26	4.15	1.25	8.24	1.25	10.72	0.97	11.93
4	1.23	–	1.17	3.84	1.18	7.68	1.19	10.03	0.92	11.18
3	1.07	–	1.04	3.37	1.07	6.80	1.08	8.93	0.84	9.97
2	0.84	–	0.84	2.68	0.88	5.47	0.90	7.23	0.70	8.10
1	0.57	–	0.58	1.83	0.61	3.76	0.64	5.00	0.49	5.61

Таблица 15

История выгорания твэла N 32, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.33	4.65	0.45	5.93	0.52	7.50	0.59	10.11	0.97	11.36
24	0.46	6.30	0.60	8.04	0.69	10.15	0.77	13.58	1.26	15.22
23	0.58	7.80	0.74	9.95	0.83	12.52	0.91	16.60	1.45	18.54
22	0.67	8.89	0.84	11.37	0.93	14.25	0.99	18.74	1.53	20.85
21	0.76	9.69	0.91	12.45	0.99	15.57	1.04	20.33	1.54	22.50
20	0.85	10.32	0.98	13.34	1.04	16.65	1.08	21.61	1.50	23.80
19	0.95	10.85	1.06	14.16	1.10	17.68	1.11	22.84	1.44	24.98
18	1.06	11.31	1.14	14.95	1.16	18.70	1.15	24.10	1.35	26.15
17	1.16	11.70	1.20	15.60	1.20	19.53	1.18	25.09	1.27	27.05
16	1.24	11.99	1.25	16.10	1.22	20.14	1.19	25.78	1.19	27.66
15	1.30	12.21	1.28	16.47	1.24	20.58	1.19	26.26	1.13	28.06
14	1.35	12.37	1.30	16.74	1.24	20.89	1.19	26.59	1.08	28.32
13	1.39	12.50	1.31	16.94	1.25	21.12	1.19	26.82	1.04	28.50
12	1.42	12.59	1.32	17.09	1.25	21.29	1.19	27.00	1.01	28.63
11	1.44	12.66	1.33	17.20	1.25	21.41	1.20	27.13	0.99	28.73
10	1.45	12.71	1.33	17.27	1.25	21.49	1.20	27.22	0.98	28.80
9	1.45	12.73	1.33	17.29	1.26	21.51	1.21	27.26	0.97	28.83
8	1.44	12.71	1.32	17.23	1.26	21.45	1.21	27.21	0.97	28.78
7	1.41	12.60	1.31	17.06	1.26	21.26	1.22	27.03	0.97	28.60
6	1.37	12.36	1.29	16.71	1.25	20.85	1.22	26.61	0.97	28.17
5	1.30	11.93	1.25	16.10	1.22	20.13	1.21	25.80	0.96	27.35
4	1.21	11.18	1.18	15.07	1.17	18.90	1.17	24.38	0.93	25.88
3	1.07	9.97	1.06	13.44	1.07	16.92	1.10	21.99	0.87	23.39
2	0.86	8.10	0.88	10.93	0.90	13.83	0.94	18.14	0.75	19.34
1	0.59	5.61	0.62	7.58	0.65	9.64	0.69	12.76	0.55	13.64

Таблица 16

История выгорания твэла N 32, в кассете, работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.47	11.36	0.57	12.98
24	0.62	15.22	0.74	17.34
23	0.73	18.53	0.87	21.04
22	0.81	20.85	0.94	23.59
21	0.87	22.50	0.99	25.41
20	0.91	23.80	1.03	26.84
19	0.97	24.98	1.07	28.16
18	1.03	26.15	1.11	29.50
17	1.08	27.05	1.14	30.53
16	1.12	27.66	1.16	31.22
15	1.15	28.06	1.17	31.68
14	1.18	28.32	1.18	32.00
13	1.21	28.50	1.19	32.22
12	1.23	28.63	1.19	32.40
11	1.26	28.73	1.20	32.54
10	1.28	28.80	1.21	32.65
9	1.31	28.83	1.22	32.73
8	1.33	28.78	1.23	32.72
7	1.34	28.60	1.24	32.57
6	1.35	28.17	1.24	32.14
5	1.33	27.35	1.23	31.28
4	1.29	25.88	1.19	29.69
3	1.20	23.39	1.12	26.94
2	1.03	19.34	0.96	22.39
1	0.75	13.64	0.71	15.88

Таблица 17

История выгорания твэла N 32, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.43	13.04	0.53	14.61	0.59	16.43	0.63	18.55
24	0.57	17.42	0.70	19.50	0.76	21.88	0.81	24.61
23	0.69	21.13	0.82	23.62	0.89	26.42	0.93	29.58
22	0.77	23.70	0.91	26.47	0.96	29.51	0.99	32.92
21	0.83	25.52	0.96	28.49	1.00	31.69	1.02	35.21
20	0.88	26.96	0.99	30.06	1.02	33.35	1.03	36.94
19	0.92	28.28	1.01	31.49	1.03	34.83	1.04	38.44
18	0.95	29.62	1.03	32.91	1.04	36.29	1.03	39.89
17	0.97	30.65	1.04	34.00	1.04	37.39	1.03	40.99
16	0.99	31.34	1.04	34.74	1.03	38.14	1.03	41.73
15	1.01	31.80	1.05	35.24	1.03	38.63	1.02	42.21
14	1.02	32.11	1.05	35.58	1.03	38.97	1.02	42.55
13	1.03	32.34	1.05	35.82	1.03	39.22	1.02	42.79
12	1.03	32.52	1.05	36.01	1.03	39.40	1.02	42.97
11	1.03	32.66	1.05	36.15	1.03	39.55	1.02	43.13
10	1.03	32.78	1.05	36.27	1.03	39.67	1.03	43.26
9	1.02	32.85	1.05	36.33	1.04	39.74	1.03	43.35
8	1.02	32.84	1.05	36.31	1.04	39.73	1.04	43.35
7	1.00	32.69	1.05	36.13	1.05	39.54	1.05	43.19
6	0.98	32.27	1.04	35.64	1.04	39.04	1.05	42.69
5	0.94	31.40	1.01	34.67	1.03	38.00	1.04	41.62
4	0.88	29.81	0.97	32.91	1.00	36.12	1.02	39.64
3	0.80	27.05	0.90	29.88	0.94	32.86	0.96	36.17
2	0.67	22.49	0.76	24.88	0.81	27.44	0.85	30.33
1	0.48	15.95	0.56	17.68	0.60	19.57	0.64	21.73

Таблица 18

История выгорания твэла N 54, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.34	–	0.45	1.27	0.54	2.88	0.58	4.00	0.89	4.84
24	0.47	–	0.62	1.74	0.73	3.94	0.78	5.42	1.17	6.55
23	0.60	–	0.77	2.20	0.89	4.91	0.94	6.73	1.38	8.09
22	0.71	–	0.89	2.57	1.01	5.66	1.05	7.70	1.50	9.22
21	0.81	–	0.98	2.88	1.09	6.25	1.12	8.44	1.54	10.05
20	0.90	–	1.05	3.15	1.15	6.75	1.18	9.05	1.53	10.70
19	0.99	–	1.13	3.42	1.20	7.22	1.22	9.61	1.49	11.25
18	1.08	–	1.19	3.68	1.24	7.65	1.25	10.12	1.43	11.73
17	1.17	–	1.25	3.92	1.28	8.04	1.28	10.57	1.36	12.15
16	1.25	–	1.29	4.11	1.30	8.35	1.30	10.93	1.30	12.46
15	1.32	–	1.32	4.27	1.32	8.59	1.31	11.20	1.25	12.69
14	1.37	–	1.35	4.40	1.33	8.78	1.32	11.41	1.20	12.86
13	1.42	–	1.37	4.51	1.34	8.93	1.32	11.57	1.16	12.98
12	1.46	–	1.38	4.59	1.34	9.05	1.33	11.70	1.13	13.08
11	1.49	–	1.40	4.65	1.35	9.13	1.33	11.79	1.10	13.16
10	1.51	–	1.40	4.69	1.35	9.19	1.34	11.86	1.08	13.21
9	1.52	–	1.41	4.71	1.36	9.22	1.34	11.90	1.07	13.23
8	1.52	–	1.40	4.70	1.36	9.20	1.34	11.88	1.06	13.20
7	1.50	–	1.39	4.64	1.35	9.11	1.34	11.78	1.05	13.09
6	1.46	–	1.36	4.52	1.34	8.92	1.33	11.56	1.04	12.86
5	1.39	–	1.31	4.32	1.30	8.57	1.30	11.15	1.01	12.41
4	1.28	–	1.22	4.00	1.23	7.99	1.24	10.45	0.96	11.65
3	1.11	–	1.08	3.51	1.11	7.09	1.13	9.31	0.88	10.40
2	0.88	–	0.87	2.80	0.92	5.72	0.94	7.55	0.73	8.46
1	0.60	–	0.60	1.91	0.64	3.94	0.67	5.23	0.52	5.88

Таблица 19

История выгорания твэла N 54, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.34	4.84	0.46	6.15	0.54	7.77	0.61	10.45	1.01	11.74
24	0.47	6.55	0.62	8.34	0.71	10.50	0.79	14.02	1.30	15.71
23	0.59	8.09	0.76	10.30	0.85	12.93	0.93	17.12	1.49	19.11
22	0.69	9.22	0.86	11.76	0.95	14.71	1.02	19.32	1.58	21.48
21	0.78	10.05	0.94	12.87	1.02	16.06	1.07	20.93	1.59	23.17
20	0.87	10.70	1.01	13.79	1.07	17.18	1.10	22.26	1.55	24.50
19	0.97	11.25	1.08	14.64	1.12	18.25	1.14	23.53	1.47	25.73
18	1.08	11.73	1.17	15.46	1.18	19.31	1.18	24.84	1.39	26.95
17	1.19	12.15	1.24	16.15	1.23	20.19	1.21	25.88	1.30	27.90
16	1.27	12.46	1.28	16.67	1.26	20.82	1.22	26.61	1.22	28.53
15	1.33	12.69	1.31	17.05	1.27	21.27	1.22	27.10	1.16	28.94
14	1.38	12.86	1.33	17.34	1.28	21.60	1.22	27.44	1.11	29.21
13	1.42	12.98	1.34	17.54	1.28	21.83	1.22	27.68	1.07	29.39
12	1.45	13.08	1.35	17.70	1.28	22.01	1.22	27.85	1.04	29.52
11	1.47	13.16	1.36	17.81	1.28	22.13	1.23	27.99	1.01	29.63
10	1.48	13.21	1.36	17.88	1.29	22.21	1.23	28.08	1.00	29.70
9	1.48	13.23	1.36	17.90	1.29	22.23	1.23	28.12	0.99	29.73
8	1.47	13.20	1.36	17.84	1.29	22.16	1.24	28.07	0.99	29.68
7	1.45	13.09	1.34	17.67	1.29	21.97	1.25	27.89	0.99	29.49
6	1.40	12.86	1.32	17.32	1.28	21.56	1.25	27.46	0.99	29.06
5	1.34	12.41	1.28	16.69	1.25	20.82	1.24	26.64	0.98	28.22
4	1.24	11.65	1.21	15.64	1.20	19.57	1.20	25.19	0.95	26.73
3	1.09	10.40	1.09	13.96	1.10	17.54	1.13	22.75	0.89	24.19
2	0.88	8.46	0.90	11.37	0.93	14.36	0.97	18.80	0.77	20.03
1	0.61	5.88	0.64	7.91	0.67	10.03	0.71	13.25	0.57	14.16

Таблица 20

История выгорания твэла N 54, в кассете, работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.48	11.74	0.58	13.40
24	0.63	15.71	0.76	17.88
23	0.75	19.11	0.89	21.67
22	0.83	21.48	0.96	24.28
21	0.88	23.17	1.01	26.14
20	0.93	24.50	1.05	27.61
19	0.99	25.73	1.09	28.98
18	1.05	26.95	1.13	30.38
17	1.10	27.90	1.17	31.45
16	1.15	28.53	1.19	32.17
15	1.18	28.94	1.20	32.65
14	1.21	29.21	1.21	32.97
13	1.23	29.39	1.21	33.20
12	1.26	29.52	1.22	33.38
11	1.29	29.63	1.23	33.53
10	1.31	29.70	1.24	33.64
9	1.34	29.73	1.25	33.72
8	1.36	29.68	1.26	33.71
7	1.37	29.49	1.26	33.56
6	1.38	29.06	1.27	33.13
5	1.37	28.22	1.26	32.26
4	1.33	26.73	1.22	30.64
3	1.23	24.19	1.15	27.84
2	1.06	20.03	0.99	23.18
1	0.77	14.16	0.74	16.47

Таблица 21

История выгорания твэла N 54, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.44	13.46	0.55	15.08	0.61	16.96	0.65	19.15
24	0.59	17.96	0.72	20.11	0.79	22.56	0.83	25.37
23	0.71	21.77	0.85	24.33	0.91	27.20	0.95	30.45
22	0.79	24.39	0.93	27.23	0.99	30.36	1.01	33.85
21	0.85	26.25	0.98	29.29	1.03	32.57	1.05	36.18
20	0.90	27.73	1.01	30.91	1.05	34.27	1.06	37.94
19	0.94	29.10	1.04	32.38	1.06	35.80	1.06	39.48
18	0.97	30.50	1.05	33.86	1.06	37.30	1.06	40.98
17	0.99	31.58	1.06	35.00	1.06	38.45	1.05	42.12
16	1.01	32.30	1.06	35.77	1.05	39.22	1.05	42.88
15	1.03	32.77	1.07	36.28	1.05	39.74	1.04	43.38
14	1.04	33.09	1.07	36.62	1.05	40.08	1.04	43.72
13	1.05	33.32	1.07	36.87	1.05	40.33	1.04	43.96
12	1.05	33.50	1.07	37.06	1.05	40.51	1.04	44.15
11	1.05	33.65	1.07	37.21	1.05	40.67	1.04	44.31
10	1.05	33.76	1.07	37.32	1.05	40.79	1.04	44.44
9	1.04	33.84	1.07	37.39	1.06	40.86	1.05	44.53
8	1.03	33.84	1.07	37.37	1.06	40.85	1.06	44.55
7	1.02	33.68	1.07	37.18	1.07	40.67	1.07	44.39
6	0.99	33.25	1.06	36.70	1.06	40.16	1.07	43.88
5	0.96	32.38	1.03	35.71	1.05	39.12	1.06	42.81
4	0.90	30.76	0.99	33.93	1.02	37.21	1.04	40.81
3	0.82	27.95	0.92	30.84	0.96	33.90	0.99	37.28
2	0.69	23.28	0.78	25.73	0.83	28.36	0.87	31.33
1	0.50	16.54	0.58	18.32	0.62	20.27	0.66	22.50

Таблица 22

История выгорания твэла N 82, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.36	–	0.48	1.34	0.58	3.06	0.62	4.25	0.95	5.15
24	0.50	–	0.65	1.85	0.77	4.17	0.83	5.75	1.25	6.95
23	0.63	–	0.81	2.33	0.95	5.20	1.00	7.12	1.48	8.57
22	0.75	–	0.94	2.71	1.07	5.98	1.11	8.14	1.60	9.75
21	0.85	–	1.03	3.03	1.15	6.60	1.19	8.92	1.64	10.62
20	0.94	–	1.11	3.33	1.21	7.13	1.25	9.57	1.63	11.31
19	1.04	–	1.19	3.61	1.27	7.63	1.29	10.16	1.58	11.91
18	1.14	–	1.26	3.89	1.31	8.09	1.33	10.71	1.52	12.43
17	1.23	–	1.32	4.14	1.35	8.52	1.36	11.20	1.45	12.87
16	1.32	–	1.37	4.35	1.38	8.85	1.38	11.59	1.38	13.21
15	1.39	–	1.41	4.53	1.40	9.11	1.39	11.88	1.32	13.46
14	1.45	–	1.43	4.66	1.41	9.31	1.40	12.10	1.27	13.63
13	1.50	–	1.45	4.78	1.42	9.47	1.40	12.27	1.23	13.77
12	1.54	–	1.47	4.86	1.43	9.59	1.41	12.41	1.19	13.87
11	1.57	–	1.48	4.93	1.43	9.69	1.41	12.51	1.17	13.96
10	1.60	–	1.49	4.97	1.44	9.75	1.42	12.59	1.15	14.01
9	1.61	–	1.49	4.99	1.44	9.78	1.42	12.62	1.14	14.04
8	1.61	–	1.49	4.98	1.44	9.76	1.42	12.61	1.13	14.01
7	1.59	–	1.47	4.92	1.44	9.67	1.42	12.51	1.12	13.90
6	1.54	–	1.44	4.80	1.42	9.47	1.41	12.28	1.10	13.65
5	1.47	–	1.39	4.59	1.38	9.11	1.38	11.85	1.07	13.19
4	1.35	–	1.30	4.25	1.31	8.50	1.32	11.11	1.02	12.39
3	1.18	–	1.15	3.74	1.19	7.55	1.21	9.92	0.93	11.08
2	0.94	–	0.93	2.99	0.98	6.11	1.00	8.07	0.78	9.04
1	0.64	–	0.65	2.05	0.69	4.22	0.71	5.60	0.55	6.29

Таблица 23

История выгорания твэла N 82, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.36	5.15	0.48	6.52	0.56	8.22	0.64	11.03	1.06	12.39
24	0.49	6.95	0.65	8.82	0.75	11.09	0.83	14.77	1.36	16.55
23	0.62	8.57	0.79	10.89	0.89	13.63	0.97	18.01	1.56	20.09
22	0.72	9.75	0.89	12.41	0.99	15.49	1.06	20.29	1.65	22.55
21	0.81	10.62	0.98	13.57	1.06	16.90	1.11	21.97	1.66	24.31
20	0.90	11.31	1.05	14.54	1.11	18.07	1.14	23.36	1.61	25.69
19	1.01	11.91	1.13	15.44	1.17	19.20	1.18	24.70	1.53	26.98
18	1.13	12.43	1.22	16.32	1.23	20.33	1.22	26.08	1.44	28.27
17	1.24	12.87	1.29	17.06	1.28	21.26	1.25	27.18	1.35	29.27
16	1.32	13.21	1.33	17.61	1.31	21.93	1.26	27.94	1.27	29.94
15	1.39	13.45	1.37	18.01	1.32	22.41	1.27	28.46	1.20	30.36
14	1.44	13.63	1.39	18.31	1.33	22.75	1.27	28.81	1.15	30.65
13	1.48	13.77	1.40	18.53	1.33	23.00	1.27	29.06	1.10	30.84
12	1.51	13.87	1.41	18.70	1.33	23.18	1.27	29.25	1.07	30.98
11	1.53	13.96	1.41	18.81	1.33	23.31	1.27	29.39	1.05	31.08
10	1.54	14.01	1.42	18.89	1.34	23.39	1.27	29.48	1.03	31.16
9	1.54	14.04	1.42	18.91	1.34	23.41	1.28	29.52	1.03	31.19
8	1.53	14.01	1.41	18.85	1.34	23.35	1.28	29.48	1.03	31.14
7	1.51	13.90	1.40	18.67	1.34	23.15	1.29	29.30	1.03	30.95
6	1.46	13.65	1.38	18.31	1.33	22.73	1.29	28.86	1.03	30.51
5	1.39	13.19	1.33	17.66	1.30	21.97	1.28	28.02	1.02	29.66
4	1.29	12.39	1.26	16.57	1.25	20.67	1.25	26.52	0.99	28.12
3	1.14	11.08	1.14	14.81	1.15	18.56	1.17	23.99	0.93	25.49
2	0.93	9.04	0.95	12.10	0.97	15.23	1.01	19.87	0.81	21.17
1	0.64	6.29	0.67	8.43	0.70	10.67	0.75	14.05	0.59	15.01

Таблица 24

История выгорания твэла N 82, в кассете, работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.50	12.39	0.61	14.12
24	0.66	16.55	0.79	18.81
23	0.78	20.09	0.92	22.75
22	0.86	22.55	1.00	25.46
21	0.91	24.31	1.05	27.39
20	0.97	25.69	1.08	28.91
19	1.02	26.98	1.12	30.35
18	1.09	28.27	1.17	31.81
17	1.14	29.27	1.20	32.95
16	1.19	29.93	1.22	33.71
15	1.22	30.36	1.24	34.20
14	1.25	30.65	1.25	34.53
13	1.28	30.84	1.25	34.77
12	1.30	30.98	1.26	34.96
11	1.33	31.08	1.27	35.11
10	1.36	31.16	1.28	35.24
9	1.38	31.19	1.29	35.31
8	1.41	31.14	1.30	35.31
7	1.42	30.95	1.30	35.16
6	1.43	30.51	1.31	34.73
5	1.42	29.66	1.30	33.84
4	1.38	28.12	1.27	32.19
3	1.29	25.49	1.19	29.30
2	1.11	21.17	1.04	24.47
1	0.82	15.01	0.78	17.45

Таблица 25

История выгорания твэла N 82, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.46	14.19	0.57	15.90	0.64	17.87	0.68	20.17
24	0.62	18.90	0.75	21.15	0.82	23.71	0.86	26.65
23	0.74	22.85	0.88	25.53	0.95	28.52	0.99	31.89
22	0.82	25.57	0.96	28.53	1.02	31.77	1.05	35.38
21	0.89	27.50	1.02	30.66	1.06	34.05	1.08	37.78
20	0.93	29.03	1.05	32.32	1.08	35.80	1.09	39.58
19	0.97	30.47	1.07	33.86	1.09	37.39	1.09	41.18
18	1.00	31.94	1.08	35.41	1.09	38.95	1.08	42.73
17	1.02	33.08	1.09	36.60	1.08	40.15	1.08	43.92
16	1.04	33.83	1.09	37.40	1.08	40.96	1.07	44.71
15	1.06	34.33	1.09	37.93	1.08	41.49	1.07	45.22
14	1.07	34.66	1.10	38.29	1.08	41.84	1.06	45.57
13	1.07	34.90	1.10	38.55	1.07	42.10	1.06	45.82
12	1.08	35.09	1.10	38.74	1.07	42.29	1.06	46.01
11	1.08	35.24	1.10	38.90	1.08	42.45	1.06	46.18
10	1.08	35.36	1.10	39.02	1.08	42.57	1.07	46.31
9	1.07	35.44	1.10	39.09	1.08	42.65	1.07	46.41
8	1.06	35.44	1.10	39.07	1.09	42.64	1.08	46.43
7	1.05	35.29	1.10	38.89	1.09	42.46	1.09	46.27
6	1.02	34.86	1.09	38.40	1.09	41.95	1.09	45.76
5	0.98	33.97	1.06	37.40	1.08	40.90	1.09	44.68
4	0.93	32.31	1.02	35.58	1.05	38.96	1.07	42.65
3	0.85	29.42	0.95	32.42	0.99	35.57	1.01	39.06
2	0.72	24.57	0.82	27.13	0.86	29.87	0.90	32.94
1	0.52	17.52	0.60	19.40	0.65	21.45	0.69	23.79

Таблица 26

История выгорания твэла N116, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 26, 1-го года эксплуатации. (загрузка 15)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=260.77сут.		$T_{эфф.}$=296.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.39	–	0.52	1.46	0.63	3.32	0.68	4.61	1.05	5.60
24	0.53	–	0.71	2.00	0.84	4.52	0.90	6.23	1.37	7.54
23	0.68	–	0.88	2.51	1.03	5.62	1.08	7.70	1.62	9.28
22	0.80	–	1.01	2.92	1.15	6.46	1.21	8.79	1.75	10.55
21	0.91	–	1.12	3.27	1.24	7.12	1.29	9.63	1.79	11.48
20	1.01	–	1.20	3.58	1.31	7.70	1.34	10.33	1.77	12.22
19	1.12	–	1.29	3.89	1.37	8.24	1.39	10.99	1.72	12.87
18	1.22	–	1.36	4.20	1.42	8.75	1.43	11.59	1.65	13.44
17	1.33	–	1.43	4.48	1.47	9.22	1.47	12.13	1.57	13.94
16	1.42	–	1.49	4.71	1.50	9.59	1.49	12.56	1.49	14.31
15	1.49	–	1.53	4.90	1.52	9.88	1.50	12.88	1.43	14.58
14	1.56	–	1.56	5.05	1.53	10.10	1.51	13.12	1.37	14.78
13	1.61	–	1.58	5.17	1.54	10.27	1.52	13.31	1.33	14.93
12	1.66	–	1.60	5.27	1.55	10.41	1.52	13.46	1.29	15.04
11	1.69	–	1.61	5.34	1.56	10.51	1.53	13.57	1.26	15.13
10	1.72	–	1.62	5.39	1.56	10.58	1.53	13.65	1.24	15.20
9	1.73	–	1.62	5.41	1.57	10.62	1.54	13.70	1.23	15.23
8	1.73	–	1.62	5.40	1.57	10.60	1.54	13.69	1.22	15.20
7	1.71	–	1.60	5.34	1.56	10.51	1.54	13.59	1.21	15.09
6	1.67	–	1.57	5.21	1.54	10.30	1.53	13.35	1.19	14.83
5	1.59	–	1.52	4.99	1.50	9.91	1.50	12.89	1.16	14.34
4	1.46	–	1.42	4.63	1.43	9.27	1.43	12.11	1.11	13.49
3	1.28	–	1.26	4.08	1.29	8.24	1.31	10.82	1.02	12.09
2	1.02	–	1.02	3.27	1.07	6.68	1.10	8.83	0.85	9.89
1	0.70	–	0.71	2.25	0.76	4.63	0.78	6.15	0.61	6.91

Таблица 27

История выгорания твэла N116, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 24, 2-го года эксплуатации. (загрузка 16)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла										
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=343.08сут.		$T_{эфф.}$=390.00сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.38	5.60	0.51	7.07	0.60	8.88	0.68	11.89	1.14	13.35
24	0.53	7.54	0.69	9.54	0.80	11.96	0.88	15.89	1.45	17.78
23	0.66	9.28	0.84	11.75	0.95	14.67	1.03	19.32	1.66	21.53
22	0.76	10.55	0.95	13.37	1.05	16.65	1.12	21.73	1.74	24.12
21	0.86	11.48	1.04	14.62	1.12	18.14	1.17	23.50	1.74	25.96
20	0.96	12.22	1.11	15.65	1.17	19.39	1.20	24.96	1.69	27.42
19	1.07	12.88	1.19	16.63	1.23	20.60	1.23	26.39	1.61	28.79
18	1.20	13.44	1.29	17.57	1.30	21.81	1.28	27.85	1.50	30.14
17	1.31	13.94	1.36	18.38	1.35	22.82	1.30	29.03	1.40	31.21
16	1.40	14.31	1.41	18.98	1.37	23.54	1.32	29.84	1.32	31.91
15	1.47	14.58	1.44	19.42	1.39	24.05	1.32	30.39	1.25	32.37
14	1.53	14.78	1.46	19.74	1.39	24.41	1.32	30.76	1.19	32.66
13	1.57	14.93	1.48	19.97	1.40	24.68	1.32	31.02	1.14	32.87
12	1.60	15.04	1.49	20.15	1.40	24.87	1.32	31.22	1.11	33.02
11	1.62	15.13	1.49	20.28	1.40	25.01	1.32	31.37	1.09	33.13
10	1.64	15.20	1.49	20.36	1.40	25.10	1.32	31.47	1.07	33.21
9	1.64	15.23	1.49	20.39	1.40	25.13	1.33	31.52	1.07	33.24
8	1.62	15.20	1.49	20.33	1.41	25.07	1.33	31.48	1.06	33.20
7	1.60	15.09	1.48	20.15	1.40	24.87	1.34	31.29	1.07	33.01
6	1.55	14.83	1.45	19.77	1.40	24.43	1.34	30.85	1.07	32.57
5	1.48	14.34	1.41	19.09	1.37	23.64	1.34	29.98	1.06	31.69
4	1.37	13.49	1.33	17.94	1.32	22.28	1.31	28.43	1.03	30.10
3	1.22	12.09	1.21	16.07	1.22	20.05	1.23	25.79	0.98	27.36
2	0.99	9.89	1.01	13.16	1.04	16.51	1.07	21.45	0.85	22.82
1	0.69	6.91	0.72	9.21	0.75	11.61	0.80	15.24	0.64	16.26

Таблица 28

История выгорания твэла N116, в кассете, работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'. Кассета N 24, 3-го года эксплуатации. (загрузка 17)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла				
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=94.86сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.54	13.35	0.65	15.21
24	0.70	17.78	0.84	20.19
23	0.83	21.53	0.97	24.34
22	0.90	24.12	1.05	27.18
21	0.96	25.96	1.09	29.19
20	1.01	27.42	1.13	30.78
19	1.07	28.79	1.17	32.30
18	1.14	30.14	1.22	33.83
17	1.19	31.21	1.25	35.04
16	1.24	31.91	1.27	35.84
15	1.27	32.37	1.28	36.36
14	1.30	32.67	1.29	36.71
13	1.33	32.87	1.30	36.96
12	1.36	33.02	1.30	37.15
11	1.39	33.13	1.31	37.32
10	1.41	33.21	1.32	37.45
9	1.44	33.25	1.33	37.53
8	1.47	33.20	1.34	37.54
7	1.49	33.01	1.35	37.39
6	1.50	32.57	1.35	36.96
5	1.49	31.69	1.35	36.05
4	1.45	30.10	1.32	34.36
3	1.36	27.36	1.25	31.38
2	1.19	22.82	1.10	26.33
1	0.88	16.26	0.83	18.89

Таблица 29

История выгорания твэла N116, в кассете,
работающей по схеме перегрузок '26-->24-->24-->28'.
Кассета N 28, 4-го года эксплуатации. (загрузка 18)

Распределение энерговыделения и выгорание в "таблетке" твэла								
№ слоя зоны	$T_{эфф.}$=0.00сут.		$T_{эфф.}$=100.00сут.		$T_{эфф.}$=200.00сут.		$T_{эфф.}$=306.73сут.	
	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur	PSI	Bur
25	0.50	15.28	0.62	17.11	0.68	19.23	0.73	21.68
24	0.66	20.28	0.80	22.68	0.87	25.39	0.91	28.49
23	0.78	24.45	0.93	27.27	1.00	30.42	1.03	33.94
22	0.87	27.29	1.01	30.40	1.06	33.79	1.09	37.54
21	0.93	29.31	1.06	32.61	1.10	36.14	1.11	40.00
20	0.97	30.91	1.09	34.34	1.12	37.95	1.12	41.85
19	1.01	32.42	1.10	35.95	1.12	39.60	1.12	43.50
18	1.04	33.96	1.11	37.56	1.12	41.22	1.11	45.11
17	1.06	35.18	1.12	38.82	1.11	42.48	1.10	46.34
16	1.07	35.97	1.12	39.66	1.11	43.31	1.09	47.16
15	1.09	36.49	1.12	40.21	1.11	43.86	1.09	47.69
14	1.10	36.84	1.13	40.58	1.10	44.23	1.09	48.05
13	1.11	37.09	1.13	40.85	1.10	44.50	1.08	48.31
12	1.11	37.29	1.13	41.05	1.10	44.70	1.08	48.51
11	1.11	37.45	1.13	41.22	1.10	44.86	1.09	48.68
10	1.11	37.58	1.13	41.35	1.10	45.00	1.09	48.83
9	1.10	37.67	1.13	41.42	1.11	45.08	1.10	48.93
8	1.09	37.67	1.13	41.41	1.11	45.08	1.11	48.95
7	1.08	37.52	1.13	41.23	1.12	44.90	1.11	48.79
6	1.05	37.09	1.11	40.74	1.12	44.39	1.12	48.29
5	1.02	36.18	1.09	39.73	1.11	43.33	1.11	47.20
4	0.96	34.49	1.05	37.88	1.08	41.36	1.09	45.16
3	0.88	31.50	0.98	34.63	1.02	37.90	1.04	41.50
2	0.75	26.44	0.86	29.13	0.90	32.01	0.94	35.22
1	0.56	18.97	0.65	20.98	0.69	23.17	0.73	25.66

Таблица 30

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 116										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	49.5	314.1	66.7	315.4	80.6	315.9	86.6	315.2	127.4
24	316.3	68.5	319.4	90.6	321.7	107.7	322.6	114.9	324.8	166.6
23	318.3	87.1	321.8	112.7	324.2	131.7	325.2	138.9	327.8	196.8
22	320.0	102.5	323.4	129.8	325.9	148.1	326.5	154.7	328.9	212.6
21	321.1	116.3	324.2	143.0	326.6	159.6	327.0	165.1	328.7	217.8
20	321.6	129.7	324.8	154.4	326.5	168.6	326.7	172.7	327.2	215.9
19	322.3	143.1	324.6	164.7	325.9	175.9	326.1	178.6	325.0	209.4
18	323.0	156.6	324.4	175.1	325.1	182.4	325.2	183.6	322.1	200.4
17	323.1	170.1	324.0	183.4	324.6	187.7	324.4	187.6	318.9	190.5
16	323.3	181.7	323.7	190.4	323.3	192.5	322.8	190.6	315.9	181.9
15	323.2	191.2	322.6	195.9	322.2	194.7	321.3	192.7	313.2	174.1
14	322.3	199.4	321.1	199.5	320.4	196.2	319.8	193.6	310.7	166.7
13	321.7	206.4	319.9	202.3	319.1	197.4	318.3	194.4	308.3	161.2
12	320.7	212.2	318.5	204.5	317.3	198.3	316.5	195.1	305.9	156.8
11	319.4	216.9	316.6	206.2	315.6	199.1	315.0	195.8	304.0	153.4
10	317.8	220.2	314.8	207.4	313.7	199.9	313.1	196.6	301.9	150.9
9	316.1	222.0	313.0	207.9	311.7	200.5	311.2	197.4	300.3	149.7
8	313.9	221.8	311.2	207.5	310.0	200.8	309.5	197.2	298.8	148.3
7	311.6	219.1	308.8	205.6	308.1	200.1	307.6	197.1	297.1	146.9
6	309.1	214.0	306.3	201.6	305.9	197.9	305.6	195.7	295.3	144.9
5	305.6	203.5	303.9	194.0	303.4	192.8	303.2	192.5	293.6	141.4
4	302.1	187.7	300.5	181.3	300.8	182.8	300.7	184.1	291.8	135.4
3	297.4	164.1	296.7	161.4	297.0	166.0	297.6	168.2	289.4	123.7
2	291.9	130.8	291.7	131.3	292.4	136.9	292.7	140.3	286.0	103.6
1	288.3	89.3	288.3	90.8	289.1	96.7	289.6	100.3	283.6	74.0

Таблица 31

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 16										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	40.8	314.1	54.5	315.4	65.6	315.9	70.5	315.2	99.9
24	316.3	57.0	319.4	74.8	321.7	88.5	322.6	94.0	324.8	132.0
23	318.3	73.2	321.8	93.4	324.2	108.2	325.2	114.2	327.8	156.7
22	320.0	86.5	323.4	108.0	325.9	122.3	326.5	127.9	328.9	170.1
21	321.1	98.7	324.2	119.0	326.6	132.4	327.0	136.4	328.7	175.1
20	321.6	110.1	324.8	128.7	326.5	139.3	326.7	142.9	327.2	174.5
19	322.3	120.9	324.6	136.7	325.9	145.5	326.1	147.9	325.0	170.0
18	323.0	132.5	324.4	144.8	325.1	150.2	325.2	152.2	322.1	163.5
17	323.1	142.7	324.0	151.1	324.6	154.8	324.4	154.8	318.9	156.1
16	323.3	152.5	323.7	156.2	323.3	157.4	322.8	156.6	315.9	149.0
15	323.2	160.5	322.6	160.1	322.2	159.2	321.3	158.5	313.2	143.3
14	322.3	167.4	321.1	163.8	320.4	160.5	319.8	159.3	310.7	137.8
13	321.7	173.3	319.9	166.1	319.1	161.4	318.3	159.9	308.3	133.3
12	320.7	178.2	318.5	168.0	317.3	163.0	316.5	160.4	305.9	129.6
11	319.4	181.2	316.6	169.3	315.6	162.9	315.0	161.0	304.0	126.8
10	317.8	183.9	314.8	169.4	313.7	163.5	313.1	161.7	301.9	124.7
9	316.1	185.4	313.0	169.9	311.7	164.0	311.2	162.4	300.3	123.2
8	313.9	185.3	311.2	169.5	310.0	164.2	309.5	162.8	298.8	122.1
7	311.6	183.1	308.8	168.0	308.1	163.6	307.6	162.0	297.1	120.3
6	309.1	177.1	306.3	164.7	305.9	161.8	305.6	160.9	295.3	118.7
5	305.6	168.4	303.9	157.7	303.4	156.9	303.2	157.6	293.6	115.9
4	302.1	154.0	300.5	147.4	300.8	148.7	300.7	150.0	291.8	109.9
3	297.4	134.1	296.7	130.0	297.0	133.9	297.6	136.4	289.4	99.9
2	291.9	105.5	291.7	104.9	292.4	109.8	292.7	112.6	286.0	82.9
1	288.3	71.1	288.3	71.9	289.1	76.9	289.6	79.7	283.6	58.6

Таблица 32

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 32										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	41.7	314.1	55.6	315.4	67.0	315.9	71.9	315.2	102.9
24	316.3	57.9	319.4	75.9	321.7	89.9	322.6	95.9	324.8	135.3
23	318.3	74.3	321.8	95.3	324.2	110.3	325.2	116.5	327.8	160.6
22	320.0	87.8	323.4	109.7	325.9	124.8	326.5	129.8	328.9	174.3
21	321.1	100.1	324.2	120.8	326.6	134.4	327.0	139.2	328.7	179.5
20	321.6	111.7	324.8	130.6	326.5	142.1	326.7	145.0	327.2	178.8
19	322.3	122.7	324.6	139.4	325.9	147.7	326.1	150.1	325.0	173.4
18	323.0	134.4	324.4	147.0	325.1	153.2	325.2	154.4	322.1	166.7
17	323.1	145.5	324.0	154.1	324.6	157.1	324.4	157.9	318.9	159.1
16	323.3	154.7	323.7	159.3	323.3	160.5	322.8	159.7	315.9	151.9
15	323.2	162.9	322.6	163.3	322.2	162.4	321.3	161.6	313.2	146.1
14	322.3	169.9	321.1	166.3	320.4	163.6	319.8	162.4	310.7	140.5
13	321.7	175.8	319.9	168.6	319.1	164.6	318.3	163.0	308.3	135.9
12	320.7	180.8	318.5	170.5	317.3	165.4	316.5	163.6	305.9	132.2
11	319.4	184.8	316.6	171.9	315.6	166.1	315.0	164.2	304.0	129.3
10	317.8	187.6	314.8	172.8	313.7	166.7	313.1	164.9	301.9	127.2
9	316.1	188.2	313.0	173.3	311.7	167.3	311.2	165.6	300.3	125.6
8	313.9	188.0	311.2	172.9	310.0	167.4	309.5	165.2	298.8	124.5
7	311.6	185.8	308.8	171.4	308.1	166.9	307.6	165.2	297.1	123.3
6	309.1	180.7	306.3	167.1	305.9	164.2	305.6	164.0	295.3	121.1
5	305.6	171.8	303.9	160.9	303.4	160.0	303.2	159.9	293.6	118.1
4	302.1	157.1	300.5	150.3	300.8	151.7	300.7	152.9	291.8	112.1
3	297.4	136.7	296.7	133.3	297.0	136.5	297.6	139.1	289.4	101.9
2	291.9	108.1	291.7	107.0	292.4	112.0	292.7	115.4	286.0	85.0
1	288.3	72.9	288.3	73.7	289.1	78.8	289.6	81.7	283.6	60.1

Таблица 33

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 54										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	43.3	314.1	57.8	315.4	69.6	315.9	74.8	315.2	108.0
24	316.3	60.2	319.4	78.9	321.7	93.4	322.6	99.7	324.8	142.0
23	318.3	76.9	321.8	98.6	324.2	114.7	325.2	120.6	327.8	168.5
22	320.0	90.8	323.4	113.5	325.9	129.1	326.5	134.9	328.9	182.0
21	321.1	103.1	324.2	125.6	326.6	139.1	327.0	143.9	328.7	187.3
20	321.6	115.0	324.8	135.1	326.5	147.0	326.7	150.7	327.2	186.5
19	322.3	126.9	324.6	144.2	325.9	153.5	326.1	155.9	325.0	180.9
18	323.0	139.0	324.4	152.7	325.1	159.2	325.2	160.4	322.1	173.9
17	323.1	150.4	324.0	160.1	324.6	163.2	324.4	164.0	318.9	166.0
16	323.3	160.0	323.7	165.5	323.3	166.8	322.8	165.9	315.9	158.5
15	323.2	168.4	322.6	169.6	322.2	168.7	321.3	167.8	313.2	151.7
14	322.3	175.6	321.1	172.8	320.4	170.0	319.8	168.7	310.7	145.9
13	321.7	181.8	319.9	175.2	319.1	171.0	318.3	169.3	308.3	141.1
12	320.7	186.9	318.5	177.1	317.3	171.8	316.5	169.9	305.9	137.2
11	319.4	191.0	316.6	178.6	315.6	172.5	315.0	170.5	304.0	134.3
10	317.8	193.9	314.8	179.6	313.7	173.2	313.1	171.2	301.9	132.0
9	316.1	195.5	313.0	180.0	311.7	173.8	311.2	171.9	300.3	130.4
8	313.9	195.3	311.2	179.7	310.0	173.9	309.5	172.4	298.8	129.2
7	311.6	192.1	308.8	178.0	308.1	173.4	307.6	171.6	297.1	128.0
6	309.1	186.8	306.3	173.7	305.9	171.4	305.6	170.4	295.3	126.3
5	305.6	177.6	303.9	167.2	303.4	166.2	303.2	166.9	293.6	122.7
4	302.1	163.2	300.5	156.2	300.8	157.6	300.7	158.9	291.8	117.0
3	297.4	142.7	296.7	138.5	297.0	142.6	297.6	145.2	289.4	106.4
2	291.9	112.9	291.7	112.3	292.4	117.0	292.7	120.5	286.0	88.7
1	288.3	76.4	288.3	77.4	289.1	82.3	289.6	85.4	283.6	63.0

Таблица 34

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 6										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	41	314.1	54.8	315.4	66.0	315.9	71.2	315.2	99.9
24	316.3	57.3	319.4	75.1	321.7	89.0	322.6	95.0	324.8	132.0
23	318.3	73.6	321.8	94.3	324.2	109.3	325.2	115.4	327.8	156.7
22	320.0	87.4	323.4	109.1	325.9	123.6	326.5	129.2	328.9	170.1
21	321.1	99.6	324.2	120.2	326.6	133.8	327.0	138.5	328.7	176.0
20	321.6	111.2	324.8	130.0	326.5	141.4	326.7	144.3	327.2	175.3
19	322.3	122.1	324.6	138.1	325.9	147.0	326.1	149.4	325.0	170.8
18	323.0	133.8	324.4	146.2	325.1	151.7	325.2	152.9	322.1	164.3
17	323.1	144.1	324.0	152.6	324.6	156.3	324.4	156.4	318.9	157.6
16	323.3	153.2	323.7	157.8	323.3	159.0	322.8	158.2	315.9	150.5
15	323.2	161.3	322.6	161.7	322.2	160.8	321.3	159.3	313.2	144.0
14	322.3	168.2	321.1	164.7	320.4	162.1	319.8	160.1	310.7	138.5
13	321.7	174.1	319.9	167.0	319.1	163.0	318.3	161.5	308.3	133.9
12	320.7	179.1	318.5	168.8	317.3	163.8	316.5	162.0	305.9	130.3
11	319.4	183.0	316.6	170.2	315.6	164.5	315.0	162.6	304.0	127.4
10	317.8	185.7	314.8	171.1	313.7	165.1	313.1	163.3	301.9	125.3
9	316.1	187.3	313.0	171.6	311.7	165.6	311.2	164.0	300.3	123.8
8	313.9	187.1	311.2	171.2	310.0	165.8	309.5	163.6	298.8	122.7
7	311.6	184.0	308.8	169.7	308.1	165.3	307.6	163.6	297.1	121.5
6	309.1	178.9	306.3	165.5	305.9	162.6	305.6	162.4	295.3	119.9
5	305.6	169.3	303.9	159.3	303.4	158.4	303.2	158.4	293.6	116.4
4	302.1	155.5	300.5	148.1	300.8	149.5	300.7	151.5	291.8	110.5
3	297.4	134.7	296.7	131.3	297.0	135.2	297.6	137.0	289.4	100.4
2	291.9	106.0	291.7	105.5	292.4	110.4	292.7	113.7	286.0	83.3
1	288.3	71.1	288.3	71.9	289.1	77.3	289.6	80.1	283.6	58.9

Таблица 35

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 15 ТВС 26 твэл 82										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=260.77		Тэфф=296.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	312.5	45.8	314.1	61.4	315.4	74.0	315.9	79.8	315.2	116.2
24	316.3	63.6	319.4	83.8	321.7	99.2	322.6	105.9	324.8	152.0
23	318.3	80.9	321.8	104.2	324.2	121.3	325.2	128.0	327.8	180.3
22	320.0	95.6	323.4	120.0	325.9	136.5	326.5	142.6	328.9	194.7
21	321.1	108.5	324.2	132.2	326.6	147.7	327.0	152.8	328.7	200.4
20	321.6	121.0	324.8	142.8	326.5	155.3	326.7	159.9	327.2	198.6
19	322.3	133.5	324.6	152.4	325.9	162.2	326.1	165.5	325.0	192.6
18	323.0	146.2	324.4	161.4	325.1	168.2	325.2	170.1	322.1	185.2
17	323.1	158.1	324.0	169.1	324.6	173.2	324.4	173.9	318.9	176.0
16	323.3	168.9	323.7	175.6	323.3	176.9	322.8	175.9	315.9	168.0
15	323.2	177.8	322.6	180.0	322.2	179.7	321.3	177.9	313.2	160.8
14	322.3	185.4	321.1	184.1	320.4	181.1	319.8	178.8	310.7	154.6
13	321.7	192.0	319.9	186.7	319.1	182.2	318.3	179.5	308.3	149.5
12	320.7	197.4	318.5	188.7	317.3	183.1	316.5	180.1	305.9	145.5
11	319.4	201.7	316.6	189.5	315.6	183.8	315.0	180.8	304.0	142.3
10	317.8	204.8	314.8	190.5	313.7	184.5	313.1	181.5	301.9	139.9
9	316.1	206.5	313.0	191.0	311.7	185.1	311.2	182.3	300.3	138.2
8	313.9	205.4	311.2	190.6	310.0	185.3	309.5	182.8	298.8	137.0
7	311.6	202.9	308.8	188.9	308.1	183.9	307.6	182.7	297.1	135.7
6	309.1	197.3	306.3	185.2	305.9	181.9	305.6	180.7	295.3	133.9
5	305.6	188.4	303.9	178.2	303.4	177.2	303.2	177.0	293.6	130.6
4	302.1	173.2	300.5	166.5	300.8	168.0	300.7	169.3	291.8	124.6
3	297.4	151.4	296.7	147.6	297.0	151.9	297.6	154.7	289.4	113.8
2	291.9	120.2	291.7	119.7	292.4	125.3	292.7	128.5	286.0	94.9
1	288.3	81.4	288.3	82.8	289.1	88.1	289.6	91.4	283.6	67.5

Таблица 36

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 116										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	49.1	311.9	65.9	312.7	77.2	313.0	87.5	309.8	125.7
24	315.1	67.4	316.9	88.5	319.0	102.0	319.8	113.0	319.4	159.8
23	317.0	84.3	318.8	107.8	321.4	121.5	321.9	131.9	322.2	182.6
22	318.3	98.0	320.3	121.5	322.6	134.8	322.8	143.0	322.8	192.2
21	319.5	110.3	320.9	132.9	322.9	143.3	322.8	149.5	321.8	191.9
20	320.2	122.5	321.6	142.3	322.5	150.7	322.2	153.5	319.6	186.3
19	321.0	137.3	321.8	152.9	321.8	157.5	321.2	158.4	316.9	176.6
18	322.1	153.5	322.1	164.6	321.3	166.1	320.0	163.8	313.5	165.8
17	323.1	167.8	322.2	174.1	320.3	172.4	318.8	167.3	310.1	154.3
16	323.6	179.7	321.8	180.4	318.9	176.1	317.4	168.4	307.2	145.3
15	323.1	188.7	320.8	185.1	317.6	177.4	315.8	168.9	304.8	137.4
14	322.6	195.4	319.6	187.3	316.2	178.4	314.1	168.9	302.2	131.2
13	321.8	201.1	318.3	189.2	314.6	178.8	312.5	168.8	300.3	126.3
12	320.6	205.3	316.8	190.5	312.8	179.2	310.7	168.9	298.2	122.7
11	319.2	208.2	314.9	191.3	311.2	179.5	309.2	169.1	296.8	119.7
10	317.4	209.8	313.3	191.6	309.7	179.9	307.7	169.7	295.2	118.3
9	315.3	209.9	311.2	191.6	307.8	180.2	306.1	170.5	293.9	117.2
8	313.2	208.1	309.3	190.8	306.2	180.4	304.9	171.4	293.0	117.4
7	310.6	204.3	307.1	189.1	304.5	180.2	303.3	172.2	291.8	117.4
6	307.9	198.5	305.0	186.4	302.8	178.9	301.7	172.5	290.4	117.5
5	304.7	189.4	302.3	180.3	300.8	175.5	299.9	171.4	289.6	116.7
4	300.8	175.6	299.4	171.0	298.4	169.3	297.9	167.3	287.9	113.9
3	296.7	155.9	296.0	155.3	295.6	156.6	295.5	158.2	286.5	107.3
2	291.5	127.3	291.5	129.7	291.7	132.9	292.0	137.7	283.7	93.9
1	288.1	88.3	288.3	92.0	288.8	96.6	289.4	102.4	282.0	70.1

Таблица 37

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 16										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	42.7	311.9	56.7	312.7	66.5	313.0	75.4	309.8	105.6
24	315.1	58.5	316.9	76.5	319.0	88.3	319.8	98.3	319.4	136.7
23	317.0	73.5	318.8	93.7	321.4	106.1	321.9	115.9	322.2	157.6
22	318.3	85.9	320.3	106.6	322.6	117.8	322.8	126.4	322.8	166.7
21	319.5	97.1	320.9	116.6	322.9	126.4	322.8	132.8	321.8	167.9
20	320.2	108.5	321.6	125.0	322.5	133.1	322.2	137.1	319.6	163.8
19	321.0	120.7	321.8	134.6	321.8	139.4	321.2	141.1	316.9	156.0
18	322.1	134.8	322.1	144.7	321.3	146.8	320.0	146.3	313.5	147.3
17	323.1	147.2	322.2	153.0	320.3	152.5	318.8	149.5	310.1	138.4
16	323.6	157.6	321.8	158.5	318.9	155.8	317.4	151.0	307.2	130.4
15	323.1	165.3	320.8	162.6	317.6	156.8	315.8	151.5	304.8	123.9
14	322.6	171.9	319.6	165.2	316.2	157.6	314.1	151.6	302.2	118.3
13	321.8	176.1	318.3	166.9	314.6	158.1	312.5	151.5	300.3	113.9
12	320.6	179.8	316.8	168.1	312.8	158.3	310.7	151.5	298.2	110.6
11	319.2	182.3	314.9	168.8	311.2	159.4	309.2	151.7	296.8	108.4
10	317.4	183.7	313.3	169.1	309.7	159.7	307.7	152.2	295.2	106.6
9	315.3	184.6	311.2	169.0	307.8	160.0	306.1	152.9	293.9	106.1
8	313.2	183.1	309.3	168.4	306.2	160.2	304.9	153.8	293.0	105.7
7	310.6	179.7	307.1	166.8	304.5	160.0	303.3	154.5	291.8	105.7
6	307.9	174.8	305.0	163.8	302.8	158.1	301.7	154.8	290.4	105.8
5	304.7	166.0	302.3	158.4	300.8	155.1	299.9	153.1	289.6	104.6
4	300.8	153.3	299.4	149.7	298.4	148.3	297.9	148.7	287.9	101.6
3	296.7	135.6	296.0	134.7	295.6	136.0	295.5	138.7	286.5	94.9
2	291.5	109.3	291.5	111.0	291.7	114.9	292.0	119.6	283.7	81.5
1	288.1	75.6	288.3	78.4	288.8	82.0	289.4	87.3	282.0	59.6

Таблица 38

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 32										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	42.9	311.9	56.9	312.7	66.8	313.0	75.8	309.8	107.2
24	315.1	59.1	316.9	76.9	319.0	88.7	319.8	98.8	319.4	138.0
23	317.0	73.9	318.8	94.2	321.4	106.6	321.9	117.0	322.2	159.9
22	318.3	86.3	320.3	107.1	322.6	119.0	322.8	127.0	322.8	169.0
21	319.5	97.6	320.9	117.2	322.9	127.1	322.8	133.4	321.8	169.5
20	320.2	108.5	321.6	126.3	322.5	133.8	322.2	137.8	319.6	165.4
19	321.0	121.3	321.8	135.2	321.8	140.1	321.2	142.4	316.9	158.2
18	322.1	135.5	322.1	146.1	321.3	148.2	320.0	147.6	313.5	148.7
17	323.1	148.6	322.2	154.5	320.3	153.9	318.8	150.9	310.1	139.7
16	323.6	158.3	321.8	160.0	318.9	157.2	317.4	152.4	307.2	131.6
15	323.1	166.1	320.8	164.2	317.6	158.2	315.8	152.9	304.8	125.0
14	322.6	172.8	319.6	166.0	316.2	159.1	314.1	152.9	302.2	119.3
13	321.8	177.8	318.3	167.7	314.6	159.5	312.5	152.9	300.3	114.9
12	320.6	181.5	316.8	168.9	312.8	159.8	310.7	152.9	298.2	111.6
11	319.2	184.1	314.9	169.6	311.2	160.1	309.2	153.1	296.8	109.4
10	317.4	185.5	313.3	169.9	309.7	160.5	307.7	153.6	295.2	108.1
9	315.3	185.5	311.2	169.8	307.8	160.8	306.1	154.3	293.9	107.1
8	313.2	184.0	309.3	169.2	306.2	161.0	304.9	155.2	293.0	106.7
7	310.6	180.6	307.1	168.4	304.5	160.8	303.3	155.9	291.8	107.1
6	307.9	175.6	305.0	165.3	302.8	159.6	301.7	156.2	290.4	106.8
5	304.7	166.8	302.3	159.9	300.8	156.6	299.9	154.5	289.6	105.5
4	300.8	154.8	299.4	151.1	298.4	149.7	297.9	150.1	287.9	102.6
3	296.7	136.3	296.0	135.9	295.6	137.3	295.5	140.7	286.5	95.7
2	291.5	110.4	291.5	112.1	291.7	116.0	292.0	120.7	283.7	82.3
1	288.1	76.3	288.3	79.1	288.8	83.2	289.4	88.1	282.0	60.5

Таблица 39

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 54										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	44.0	311.9	58.7	312.7	68.8	313.0	78.1	309.8	110.8
24	315.1	60.5	316.9	79.3	319.0	91.4	319.8	101.8	319.4	142.7
23	317.0	75.7	318.8	97.0	321.4	109.3	321.9	119.9	322.2	164.5
22	318.3	88.0	320.3	109.8	322.6	121.9	322.8	130.1	322.8	173.8
21	319.5	99.5	320.9	120.1	322.9	130.2	322.8	136.6	321.8	175.1
20	320.2	111.2	321.6	128.7	322.5	137.0	322.2	141.0	319.6	170.8
19	321.0	124.2	321.8	138.5	321.8	143.4	321.2	145.7	316.9	162.6
18	322.1	139.3	322.1	149.5	321.3	151.6	320.0	151.0	313.5	152.8
17	323.1	152.2	322.2	158.1	320.3	157.4	318.8	154.3	310.1	143.5
16	323.6	162.2	321.8	163.8	318.9	160.8	317.4	155.9	307.2	135.2
15	323.1	171.0	320.8	168.0	317.6	162.7	315.8	156.4	304.8	127.8
14	322.6	176.9	319.6	170.7	316.2	163.5	314.1	157.1	302.2	122.0
13	321.8	182.1	318.3	172.5	314.6	164.0	312.5	157.0	300.3	117.5
12	320.6	185.9	316.8	173.7	312.8	164.3	310.7	157.1	298.2	114.2
11	319.2	188.6	314.9	174.4	311.2	164.6	309.2	157.3	296.8	111.8
10	317.4	190.0	313.3	174.7	309.7	164.9	307.7	157.8	295.2	110.5
9	315.3	190.1	311.2	174.7	307.8	165.3	306.1	158.5	293.9	109.5
8	313.2	188.5	309.3	174.0	306.2	165.5	304.9	158.7	293.0	109.6
7	310.6	185.0	307.1	172.4	304.5	165.2	303.3	159.5	291.8	109.6
6	307.9	179.9	305.0	169.2	302.8	164.0	301.7	159.7	290.4	109.2
5	304.7	170.9	302.3	163.7	300.8	160.2	299.9	158.7	289.6	108.4
4	300.8	158.5	299.4	154.7	298.4	153.9	297.9	154.3	287.9	105.4
3	296.7	140.2	296.0	139.8	295.6	141.1	295.5	143.9	286.5	98.4
2	291.5	113.6	291.5	115.8	291.7	119.2	292.0	124.1	283.7	85.0
1	288.1	78.5	288.3	81.4	288.8	85.5	289.4	91.0	282.0	62.2

Таблица 40

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 6										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	43.3	311.9	57.8	312.7	67.8	313.0	76.9	309.8	107.2
24	315.1	59.7	316.9	78.1	319.0	90.0	319.8	100.3	319.4	138.0
23	317.0	75.0	318.8	95.6	321.4	108.2	321.9	118.2	322.2	159.2
22	318.3	87.6	320.3	108.7	322.6	120.2	322.8	128.8	322.8	168.2
21	319.5	99.0	320.9	119.0	322.9	128.9	322.8	134.7	321.8	169.5
20	320.2	110.6	321.6	127.5	322.5	135.7	322.2	139.1	319.6	165.4
19	321.0	123.1	321.8	137.2	321.8	142.1	321.2	143.1	316.9	157.5
18	322.1	137.4	322.1	147.5	321.3	148.9	320.0	148.3	313.5	148.7
17	323.1	150.0	322.2	155.2	320.3	154.6	318.8	150.9	310.1	139.7
16	323.6	159.9	321.8	160.7	318.9	157.2	317.4	152.4	307.2	131.6
15	323.1	167.7	320.8	164.9	317.6	159.0	315.8	152.9	304.8	125.0
14	322.6	174.4	319.6	167.6	316.2	159.8	314.1	152.9	302.2	119.3
13	321.8	179.5	318.3	169.3	314.6	160.3	312.5	152.9	300.3	114.9
12	320.6	183.3	316.8	170.5	312.8	160.6	310.7	152.9	298.2	111.6
11	319.2	185.9	314.9	171.2	311.2	160.9	309.2	153.1	296.8	109.4
10	317.4	187.3	313.3	171.5	309.7	161.2	307.7	153.6	295.2	108.1
9	315.3	187.3	311.2	171.4	307.8	161.5	306.1	155.0	293.9	107.1
8	313.2	185.8	309.3	170.8	306.2	161.7	304.9	155.9	293.0	106.7
7	310.6	183.2	307.1	169.2	304.5	161.5	303.3	156.6	291.8	106.7
6	307.9	177.3	305.0	166.1	302.8	160.3	301.7	156.2	290.4	106.8
5	304.7	169.3	302.3	160.7	300.8	157.3	299.9	155.2	289.6	105.5
4	300.8	156.3	299.4	151.8	298.4	151.1	297.9	150.8	287.9	102.6
3	296.7	137.6	296.0	137.2	295.6	138.6	295.5	140.7	286.5	95.7
2	291.5	111.4	291.5	113.1	291.7	116.5	292.0	121.3	283.7	82.7
1	288.1	76.7	288.3	79.5	288.8	83.6	289.4	88.9	282.0	60.8

Таблица 41

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 16 ТВС 24 твэл 82										
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=343.08		Тэфф=390.00	
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql
25	311.5	46.1	311.9	61.6	312.7	72.2	313.0	81.8	309.8	117.0
24	315.1	63.2	316.9	82.7	319.0	95.4	319.8	106.2	319.4	149.9
23	317.0	79.1	318.8	101.2	321.4	114.6	321.9	125.0	322.2	172.8
22	318.3	91.9	320.3	114.6	322.6	127.2	322.8	135.6	322.8	181.8
21	319.5	103.9	320.9	124.8	322.9	135.8	322.8	141.8	321.8	182.3
20	320.2	115.5	321.6	134.3	322.5	142.2	322.2	146.3	319.6	177.8
19	321.0	129.0	321.8	144.4	321.8	149.4	321.2	151.1	316.9	169.2
18	322.1	145.1	322.1	155.7	321.3	157.8	320.0	156.4	313.5	158.3
17	323.1	158.6	322.2	164.6	320.3	163.9	318.8	160.5	310.1	148.6
16	323.6	169.0	321.8	171.3	318.9	167.4	317.4	162.1	307.2	139.4
15	323.1	178.2	320.8	175.0	317.6	169.3	315.8	162.0	304.8	132.3
14	322.6	184.5	319.6	177.8	316.2	170.2	314.1	162.0	302.2	126.3
13	321.8	189.9	318.3	179.6	314.6	170.7	312.5	161.9	300.3	121.6
12	320.6	193.9	316.8	180.9	312.8	170.2	310.7	161.9	298.2	118.2
11	319.2	196.6	314.9	181.6	311.2	170.6	309.2	162.2	296.8	115.8
10	317.4	198.1	313.3	181.2	309.7	170.9	307.7	162.7	295.2	113.9
9	315.3	198.2	311.2	181.1	307.8	171.2	306.1	163.4	293.9	113.3
8	313.2	196.5	309.3	181.2	306.2	171.5	304.9	164.3	293.0	113.0
7	310.6	192.9	307.1	179.5	304.5	171.2	303.3	165.1	291.8	113.5
6	307.9	187.5	305.0	176.2	302.8	169.9	301.7	165.4	290.4	113.1
5	304.7	178.1	302.3	170.5	300.8	166.8	299.9	164.3	289.6	112.3
4	300.8	165.2	299.4	161.1	298.4	160.2	297.9	160.5	287.9	109.2
3	296.7	146.1	296.0	146.3	295.6	147.6	295.5	150.4	286.5	102.4
2	291.5	118.8	291.5	121.1	291.7	124.7	292.0	129.8	283.7	88.9
1	288.1	82.1	288.3	85.9	288.8	89.9	289.4	95.7	282.0	65.7

Таблица 42

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 116							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	69.2	311.7	83.8	312.1	87.4	15.3
24	317.1	89.7	318.4	107.6	318.6	112.3	20.3
23	318.7	106.0	320.4	124.5	320.6	130.3	24.4
22	319.5	116.0	320.9	134.6	321.7	141.5	27.2
21	319.9	122.9	321.1	140.2	321.5	149.4	29.3
20	319.9	129.4	320.4	144.9	321.3	156.4	30.9
19	319.2	137.1	319.4	149.3	320.3	163.8	32.4
18	319.0	145.9	318.8	156.0	319.5	167.3	33.9
17	318.2	152.9	317.7	159.7	317.9	167.6	35.2
16	317.4	158.2	316.4	162.2	316.6	167.1	36.0
15	316.5	162.9	315.1	164.0	314.8	166.2	36.5
14	315.6	166.9	313.8	165.1	313.2	165.2	36.8
13	314.7	170.6	312.4	166.0	311.7	164.5	37.0
12	313.6	174.1	310.8	166.8	310.0	164.0	37.2
11	312.5	177.6	309.5	167.8	308.3	163.8	37.4
10	311.3	181.1	308.0	168.9	306.6	164.6	37.6
9	309.7	185.1	306.5	170.8	305.2	165.0	37.7
8	308.4	188.0	305.0	172.0	303.4	165.6	37.7
7	306.9	190.2	303.4	173.0	301.9	166.0	37.6
6	305.1	191.9	301.7	173.3	300.5	166.0	37.1
5	303.6	190.6	300.0	172.9	298.6	165.3	36.2
4	301.2	186.2	298.0	169.1	296.9	161.5	34.5
3	298.1	174.5	295.5	160.4	294.6	153.1	31.5
2	294.3	151.8	292.1	140.9	291.2	134.5	26.4
1	291.1	113.2	289.5	107.0	288.6	101.9	19.0

Таблица 43

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 16							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	59.7	311.7	72.4	312.1	75.2	12.9
24	317.1	78.7	318.4	94.0	318.6	98.2	17.2
23	318.7	93.4	320.4	110.9	320.6	115.6	20.9
22	319.5	103.8	320.9	120.6	321.7	126.8	23.5
21	319.9	110.5	321.1	126.8	321.5	134.7	25.2
20	319.9	117.0	320.4	131.2	321.3	141.3	26.6
19	319.2	123.6	319.4	136.0	320.3	147.7	27.9
18	319.0	131.2	318.8	141.2	319.5	151.0	29.3
17	318.2	137.8	317.7	145.3	317.9	151.8	30.2
16	317.4	142.6	316.4	147.7	316.6	151.4	30.9
15	316.5	146.8	315.1	149.3	314.8	151.3	31.5
14	315.6	150.4	313.8	150.3	313.2	150.4	31.7
13	314.7	153.7	312.4	151.1	311.7	149.7	31.9
12	313.6	156.9	310.8	151.8	310.0	149.3	32.1
11	312.5	160.1	309.5	152.7	308.3	149.1	32.3
10	311.3	163.2	308.0	153.7	306.6	149.2	32.4
9	309.7	166.1	306.5	154.8	305.2	149.6	32.5
8	308.4	168.7	305.0	155.9	303.4	150.1	32.4
7	306.9	170.7	303.4	156.9	301.9	150.5	32.3
6	305.1	170.8	301.7	157.1	300.5	150.5	31.9
5	303.6	169.6	300.0	155.4	298.6	148.6	31
4	301.2	164.3	298.0	151.3	296.9	144.5	29.4
3	298.1	152.5	295.5	141.6	294.6	135.2	26.7
2	294.3	130.3	292.1	122.2	291.2	116.6	22.2
1	291.1	94.9	289.5	90.2	288.6	86.3	15.7

Таблица 44

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 32							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	60.0	311.7	72.8	312.1	75.6	13.1
24	317.1	79.1	318.4	94.5	318.6	98.7	17.4
23	318.7	93.9	320.4	110.9	320.6	116.2	21.1
22	319.5	103.8	320.9	121.2	321.7	127.5	23.7
21	319.9	111.0	321.1	127.4	321.5	135.3	25.5
20	319.9	117.0	320.4	131.8	321.3	141.9	27.0
19	319.2	124.2	319.4	136.7	320.3	149.0	28.2
18	319.0	131.8	318.8	142.4	319.5	152.4	29.6
17	318.2	138.4	317.7	146.6	317.9	153.2	30.7
16	317.4	143.3	316.4	149.0	316.6	152.8	31.4
15	316.5	147.5	315.1	150.6	314.8	152.6	31.8
14	315.6	151.1	313.8	151.6	313.2	151.8	32.2
13	314.7	154.4	312.4	152.4	311.7	151.0	32.4
12	313.6	157.6	310.8	153.2	310.0	150.6	32.6
11	312.5	160.8	309.5	154.1	308.3	150.4	32.7
10	311.3	164.7	308.0	155.1	306.6	150.6	32.7
9	309.7	167.6	306.5	156.2	305.2	150.9	32.8
8	308.4	170.3	305.0	157.3	303.4	151.5	32.8
7	306.9	172.3	303.4	158.3	301.9	151.9	32.7
6	305.1	172.3	301.7	158.5	300.5	151.8	32.2
5	303.6	171.1	300.0	156.8	298.6	150.6	31.4
4	301.2	165.8	298.0	152.6	296.9	145.8	29.8
3	298.1	153.9	295.5	142.9	294.6	136.4	27.1
2	294.3	131.5	292.1	123.9	291.2	118.3	22.5
1	291.1	95.8	289.5	91.1	288.6	87.1	16.0

Таблица 45

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 54							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	61.5	311.7	74.6	312.1	77.9	13.4
24	317.1	80.6	318.4	96.8	318.6	101.1	18.0
23	318.7	95.7	320.4	113.6	320.6	119.0	21.8
22	319.5	105.8	320.9	123.6	321.7	129.9	24.4
21	319.9	113.2	321.1	129.8	321.5	137.9	26.2
20	319.9	119.3	320.4	134.3	321.3	145.2	27.7
19	319.2	126.5	319.4	139.2	320.3	151.7	29.2
18	319.0	134.9	318.8	145.0	319.5	155.8	30.4
17	318.2	141.6	317.7	149.2	317.9	156.6	31.5
16	317.4	146.5	316.4	152.3	316.6	156.2	32.2
15	316.5	150.8	315.1	153.3	314.8	155.3	32.8
14	315.6	154.5	313.8	155.0	313.2	155.1	33.1
13	314.7	157.9	312.4	155.8	311.7	154.4	33.3
12	313.6	161.2	310.8	156.6	310.0	153.9	33.5
11	312.5	165.2	309.5	157.5	308.3	153.8	33.6
10	311.3	168.4	308.0	158.5	306.6	153.9	33.8
9	309.7	171.4	306.5	159.7	305.2	154.3	33.9
8	308.4	174.1	305.0	160.8	303.4	154.8	33.9
7	306.9	176.2	303.4	161.8	301.9	155.2	33.6
6	305.1	177.0	301.7	162.1	300.5	155.2	33.2
5	303.6	175.0	300.0	161.0	298.6	153.9	32.4
4	301.2	170.3	298.0	156.8	296.9	149.7	30.8
3	298.1	158.1	295.5	146.8	294.6	140.1	28.0
2	294.3	135.8	292.1	127.3	291.2	121.5	23.2
1	291.1	99.0	289.5	94.1	288.6	90.0	16.5

Таблица 46

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 6							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	61.2	311.7	74.3	312.1	77.1	13.1
24	317.1	80.6	318.4	96.4	318.6	100.2	17.5
23	318.7	95.7	320.4	113.1	320.6	117.9	21.2
22	319.5	105.8	320.9	123.0	321.7	129.3	23.8
21	319.9	113.2	321.1	129.2	321.5	137.2	25.6
20	319.9	119.3	320.4	133.7	321.3	143.2	27.0
19	319.2	125.9	319.4	137.9	320.3	149.7	28.4
18	319.0	133.0	318.8	143.1	319.5	152.4	29.6
17	318.2	139.7	317.7	146.6	317.9	153.2	30.7
16	317.4	144.6	316.4	149.0	316.6	153.5	31.4
15	316.5	148.2	315.1	150.6	314.8	152.6	31.8
14	315.6	151.8	313.8	151.6	313.2	151.8	32.0
13	314.7	155.1	312.4	152.4	311.7	151.0	32.2
12	313.6	159.1	310.8	153.2	310.0	150.6	32.4
11	312.5	162.3	309.5	154.1	308.3	151.1	32.6
10	311.3	165.4	308.0	155.1	306.6	151.2	32.7
9	309.7	168.4	306.5	156.2	305.2	151.6	32.8
8	308.4	171.1	305.0	157.3	303.4	152.1	32.8
7	306.9	172.3	303.4	158.3	301.9	152.5	32.7
6	305.1	173.1	301.7	158.5	300.5	151.8	32.2
5	303.6	171.9	300.0	157.5	298.6	150.6	31.4
4	301.2	166.5	298.0	152.6	296.9	146.4	29.8
3	298.1	154.6	295.5	143.5	294.6	137.1	27.0
2	294.3	132.1	292.1	123.9	291.2	118.3	22.4
1	291.1	96.7	289.5	91.5	288.6	87.5	15.9

Таблица 47

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 17 ТВС 24 твэл 82							
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=94.86		Тэфф=98.0		
	Темп. оболоч.	Ql	Темп. оболоч.	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	311.6	64.6	311.7	78.3	312.1	81.7	14.2
24	317.1	84.6	318.4	101.5	318.6	105.5	18.9
23	318.7	99.9	320.4	118.0	320.6	123.5	22.9
22	319.5	109.9	320.9	128.2	321.7	134.8	25.5
21	319.9	117.5	321.1	134.1	321.5	143.0	27.5
20	319.9	123.8	320.4	138.7	321.3	149.8	29.1
19	319.2	130.6	319.4	143.6	320.3	157.1	30.5
18	319.0	139.8	318.8	150.2	319.5	161.2	32.0
17	318.2	146.6	317.7	154.4	317.9	162.1	33.1
16	317.4	151.7	316.4	156.9	316.6	161.7	33.8
15	316.5	156.2	315.1	158.6	314.8	160.8	34.4
14	315.6	160.0	313.8	159.7	313.2	159.9	34.7
13	314.7	163.5	312.4	160.5	311.7	159.1	34.9
12	313.6	166.9	310.8	161.4	310.0	158.6	35.1
11	312.5	170.3	309.5	162.3	308.3	158.5	35.3
10	311.3	174.3	308.0	163.4	306.6	158.6	35.4
9	309.7	177.5	306.5	164.5	305.2	159.7	35.4
8	308.4	180.3	305.0	166.4	303.4	160.2	35.4
7	306.9	182.4	303.4	167.4	301.9	160.6	35.3
6	305.1	183.3	301.7	167.7	300.5	160.6	34.9
5	303.6	182.0	300.0	166.6	298.6	159.3	33.9
4	301.2	177.1	298.0	162.2	296.9	154.9	32.3
3	298.1	165.2	295.5	152.6	294.6	145.7	29.4
2	294.3	142.6	292.1	133.0	291.2	126.9	24.5
1	291.1	104.9	289.5	99.3	288.6	94.9	17.5

Таблица 48

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 116											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	64.1	308.0	78.8	308.2	87.7	308.5	93.1	309.8	119.5	22.2
24	310.9	84.1	314.3	102.1	314.9	111.2	315.3	116.3	318.5	149.7	29.1
23	312.5	100.3	316.0	118.8	316.5	127.5	316.7	131.8	320.4	168.9	34.6
22	313.7	111.2	317.0	129.3	317.0	136.3	317.0	139.2	321.0	177.1	38.3
21	313.9	118.9	316.9	135.7	317.0	140.9	316.6	142.4	320.3	178.4	40.7
20	313.9	124.6	316.3	139.5	316.0	143.3	315.9	143.1	318.7	175.5	42.6
19	313.3	129.3	315.5	141.3	314.7	143.4	314.4	142.9	316.1	168.6	44.2
18	312.5	132.9	314.0	143.0	313.4	143.1	312.9	142.1	313.7	160.4	45.8
17	312.0	135.2	313.0	143.5	312.0	142.3	311.4	140.7	311.0	151.9	47.0
16	310.8	137.7	311.6	144.0	310.6	142.3	309.9	140.1	308.4	144.3	47.9
15	309.9	139.7	310.2	144.3	309.3	141.9	308.6	139.7	306.2	137.8	48.2
14	308.8	141.2	308.9	144.5	307.9	141.0	307.0	139.4	303.8	132.4	48.6
13	307.4	142.2	307.5	144.6	306.3	140.9	305.8	139.2	302.0	128.0	48.8
12	306.0	142.1	306.1	144.4	304.7	140.8	304.2	139.2	299.9	124.5	49.0
11	304.4	142.6	304.5	144.4	303.5	140.9	303.0	139.5	298.5	122.0	49.2
10	303.1	142.1	302.9	144.4	301.9	141.3	301.4	140.0	297.0	120.2	49.3
9	301.3	141.1	301.4	145.0	300.8	141.8	300.3	140.8	295.7	119.7	49.6
8	299.5	140.0	299.9	144.8	299.4	142.4	299.0	141.8	294.1	119.3	49.6
7	297.7	138.2	298.4	144.3	298.2	142.9	297.7	142.8	293.1	119.2	49.4
6	295.8	134.6	296.9	142.7	296.5	143.2	296.6	143.3	292.0	119.0	48.9
5	293.9	130.2	295.0	139.8	295.2	141.8	295.0	142.8	290.5	118.8	47.8
4	291.9	123.3	293.4	135.0	293.4	138.4	293.3	139.9	289.6	116.6	45.8
3	289.1	112.8	290.8	126.2	291.5	130.7	291.6	133.6	287.7	111.2	42.1
2	286.4	96.8	287.9	109.9	288.4	116.0	289.2	120.1	285.8	99.7	35.7
1	283.7	71.5	285.8	82.9	286.5	89.0	286.9	93.6	283.6	78.2	26.0

Таблица 49

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 16											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	53.8	308.0	66.9	308.2	74.5	308.5	79.6	309.8	102.7	18.7
24	310.9	72.3	314.3	87.9	314.9	96.8	315.3	101.8	318.5	131.2	24.8
23	312.5	87.3	316.0	104.2	316.5	112.5	316.7	117.1	320.4	150.8	29.8
22	313.7	97.8	317.0	114.5	317.0	122.1	317.0	125.4	321.0	161.0	33.3
21	313.9	105.5	316.9	121.4	317.0	127.3	316.6	129.5	320.3	163.8	35.6
20	313.9	111.6	316.3	125.9	316.0	129.6	315.9	131.2	318.7	161.1	37.3
19	313.3	116.9	315.5	128.8	314.7	130.8	314.4	131.8	316.1	156.2	38.7
18	312.5	120.8	314.0	130.3	313.4	131.8	312.9	131.6	313.7	148.6	40.1
17	312.0	124.0	313.0	132.0	312.0	131.7	311.4	130.9	311.0	141.3	41.2
16	310.8	126.3	311.6	132.4	310.6	131.8	309.9	130.3	308.4	134.3	41.9
15	309.9	128.7	310.2	133.3	309.3	131.3	308.6	130.0	306.2	128.2	42.2
14	308.8	130.1	308.9	133.5	307.9	131.1	307.0	129.6	303.8	123.7	42.5
13	307.4	131.0	307.5	133.6	306.3	130.9	305.8	129.5	302.0	119.6	42.8
12	306.0	131.5	306.1	133.4	304.7	130.9	304.2	129.5	299.9	116.4	43.1
11	304.4	131.4	304.5	134.0	303.5	131.0	303.0	129.8	298.5	114.0	43.3
10	303.1	131.6	302.9	134.0	301.9	131.3	301.4	130.3	297.0	112.3	43.4
9	301.3	130.6	301.4	134.0	300.8	131.8	300.3	131.0	295.7	111.4	43.4
8	299.5	129.7	299.9	133.8	299.4	132.3	299.0	131.9	294.1	111.0	43.4
7	297.7	127.5	298.4	133.4	298.2	133.4	297.7	132.9	293.1	110.9	43.3
6	295.8	124.1	296.9	132.0	296.5	132.6	296.6	133.3	292.0	110.8	42.7
5	293.9	119.5	295.0	129.2	295.2	131.3	295.0	132.9	290.5	110.1	41.7
4	291.9	112.2	293.4	123.7	293.4	126.9	293.3	129.6	289.6	107.6	39.7
3	289.1	101.7	290.8	113.5	291.5	118.8	291.6	122.6	287.7	101.7	36.2
2	286.4	85.0	287.9	97.1	288.4	102.6	289.2	107.3	285.8	89.1	30.3
1	283.7	61.1	285.8	70.6	286.5	76.3	286.9	80.9	283.6	67.1	21.8

Таблица 50

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 32											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	54.6	308.0	67.5	308.2	75.6	308.5	80.7	309.8	103.7	18.9
24	310.9	73.0	314.3	89.1	314.9	97.7	315.3	103.3	318.5	132.5	25.1
23	312.5	88.2	316.0	105.7	316.5	114.1	316.7	118.7	320.4	152.9	30.1
22	313.7	98.7	317.0	116.2	317.0	123.2	317.0	127.1	321.0	162.5	33.6
21	313.9	106.5	316.9	122.5	317.0	128.5	316.6	131.2	320.3	165.2	35.9
20	313.9	112.7	316.3	127.1	316.0	131.3	315.9	132.4	318.7	162.6	37.6
19	313.3	117.5	315.5	130.0	314.7	132.6	314.4	132.9	316.1	157.5	39.0
18	312.5	121.4	314.0	131.5	313.4	133.0	312.9	132.8	313.7	149.9	40.5
17	312.0	124.6	313.0	132.6	312.0	132.9	311.4	132.1	311.0	142.5	41.5
16	310.8	127.5	311.6	133.6	310.6	132.3	309.9	131.5	308.4	135.5	42.3
15	309.9	129.3	310.2	133.9	309.3	132.5	308.6	131.1	306.2	129.3	42.8
14	308.8	130.7	308.9	134.7	307.9	132.3	307.0	130.8	303.8	124.8	43.1
13	307.4	131.6	307.5	134.8	306.3	132.1	305.8	130.6	302.0	120.6	43.3
12	306.0	132.1	306.1	134.7	304.7	132.0	304.2	130.7	299.9	117.4	43.5
11	304.4	132.1	304.5	134.6	303.5	132.2	303.0	130.9	298.5	115.0	43.7
10	303.1	132.2	302.9	134.6	301.9	132.5	301.4	131.4	297.0	113.3	43.8
9	301.3	131.2	301.4	135.2	300.8	133.0	300.3	132.2	295.7	112.3	43.8
8	299.5	130.3	299.9	135.1	299.4	133.5	299.0	133.1	294.1	111.9	43.8
7	297.7	128.1	298.4	134.6	298.2	134.0	297.7	134.0	293.1	111.9	43.7
6	295.8	125.3	296.9	133.2	296.5	133.8	296.6	134.5	292.0	112.2	43.3
5	293.9	120.1	295.0	129.8	295.2	132.5	295.0	134.1	290.5	111.0	42.1
4	291.9	113.2	293.4	124.2	293.4	128.1	293.3	130.7	289.6	108.6	40.1
3	289.1	102.2	290.8	114.6	291.5	119.9	291.6	123.7	287.7	102.6	36.7
2	286.4	85.8	287.9	98.0	288.4	104.0	289.2	108.3	285.8	89.9	30.7
1	283.7	61.7	285.8	71.7	286.5	77.4	286.9	81.7	283.6	68.1	22.1

Таблица 51

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 54											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	56.5	308.0	69.9	308.2	77.8	308.5	83.4	309.8	107.1	19.6
24	310.9	75.5	314.3	91.7	314.9	101.0	315.3	106.2	318.5	136.8	25.9
23	312.5	90.8	316.0	108.2	316.5	117.3	316.7	122.0	320.4	156.4	31.1
22	313.7	101.6	317.0	118.9	317.0	126.6	317.0	130.0	321.0	166.1	34.5
21	313.9	109.6	316.9	126.0	317.0	131.5	316.6	134.2	320.3	168.9	36.9
20	313.9	115.4	316.3	130.1	316.0	134.3	315.9	135.4	318.7	166.2	38.7
19	313.3	120.3	315.5	133.0	314.7	135.0	314.4	135.9	316.1	160.3	40.1
18	312.5	124.2	314.0	134.5	313.4	135.4	312.9	135.1	313.7	153.2	41.6
17	312.0	126.9	313.0	135.7	312.0	135.3	311.4	134.4	311.0	145.0	42.7
16	310.8	129.9	311.6	136.1	310.6	135.3	309.9	133.8	308.4	137.8	43.5
15	309.9	131.8	310.2	136.4	309.3	134.8	308.6	133.4	306.2	132.2	44.0
14	308.8	133.2	308.9	137.2	307.9	134.6	307.0	133.1	303.8	126.9	44.3
13	307.4	134.1	307.5	137.2	306.3	134.4	305.8	132.9	302.0	122.7	44.5
12	306.0	134.6	306.1	137.1	304.7	134.4	304.2	132.9	299.9	119.4	44.7
11	304.4	134.6	304.5	137.1	303.5	134.5	303.0	133.2	298.5	117.0	44.8
10	303.1	134.1	302.9	137.7	301.9	134.8	301.4	133.7	297.0	115.3	45.0
9	301.3	133.7	301.4	137.7	300.8	135.3	300.3	134.5	295.7	114.3	45.0
8	299.5	132.1	299.9	137.5	299.4	135.9	299.0	135.4	294.1	113.9	45.0
7	297.7	130.4	298.4	137.0	298.2	136.9	297.7	136.4	293.1	114.3	44.9
6	295.8	127.1	296.9	135.5	296.5	136.1	296.6	136.9	292.0	114.2	44.4
5	293.9	122.3	295.0	132.7	295.2	134.8	295.0	136.4	290.5	113.5	43.4
4	291.9	115.4	293.4	127.1	293.4	130.9	293.3	133.6	289.6	110.9	41.4
3	289.1	104.6	290.8	117.2	291.5	122.6	291.6	126.5	287.7	104.9	37.9
2	286.4	88.3	287.9	100.3	288.4	106.4	289.2	111.2	285.8	92.4	31.7
1	283.7	63.5	285.8	73.7	286.5	79.6	286.9	84.4	283.6	70.3	22.8

Таблица 52

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 6											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	54.6	308.0	67.5	308.2	75.6	308.5	80.7	309.8	103.7	19.0
24	310.9	73.0	314.3	89.1	314.9	97.7	315.3	102.8	318.5	132.5	25.2
23	312.5	88.2	316.0	105.2	316.5	113.6	316.7	118.2	320.4	152.2	30.3
22	313.7	98.7	317.0	115.6	317.0	123.2	317.0	126.5	321.0	161.8	33.6
21	313.9	107.0	316.9	122.5	317.0	127.9	316.6	130.0	320.3	164.5	35.9
20	313.9	113.2	316.3	127.1	316.0	130.7	315.9	131.8	318.7	162.6	37.6
19	313.3	118.0	315.5	130.0	314.7	132.0	314.4	132.4	316.1	156.9	39.2
18	312.5	121.9	314.0	131.5	313.4	132.4	312.9	132.2	313.7	149.3	40.5
17	312.0	125.2	313.0	132.6	312.0	132.3	311.4	131.5	311.0	141.9	41.5
16	310.8	128.1	311.6	133.6	310.6	132.3	309.9	130.9	308.4	134.9	42.3
15	309.9	129.9	310.2	134.5	309.3	131.9	308.6	130.5	306.2	129.3	42.8
14	308.8	131.3	308.9	134.7	307.9	131.7	307.0	130.2	303.8	124.2	43.1
13	307.4	132.9	307.5	134.8	306.3	131.5	305.8	130.1	302.0	120.1	43.3
12	306.0	133.3	306.1	134.7	304.7	131.5	304.2	130.1	299.9	116.9	43.5
11	304.4	133.3	304.5	135.2	303.5	131.6	303.0	130.3	298.5	114.5	43.7
10	303.1	132.8	302.9	135.3	301.9	132.5	301.4	130.8	297.0	112.8	43.8
9	301.3	131.8	301.4	135.2	300.8	133.0	300.3	131.6	295.7	111.9	43.8
8	299.5	130.9	299.9	135.1	299.4	133.5	299.0	132.5	294.1	111.5	43.8
7	297.7	129.2	298.4	134.6	298.2	134.0	297.7	134.0	293.1	111.4	43.7
6	295.8	125.9	296.9	133.2	296.5	133.8	296.6	133.9	292.0	111.3	43.3
5	293.9	120.6	295.0	130.4	295.2	131.9	295.0	133.5	290.5	110.6	42.1
4	291.9	113.8	293.4	124.8	293.4	128.1	293.3	130.1	289.6	108.1	40.1
3	289.1	103.1	290.8	115.1	291.5	119.9	291.6	123.2	287.7	102.1	36.7
2	286.4	86.2	287.9	98.0	288.4	104.0	289.2	108.3	285.8	89.9	30.7
1	283.7	62.0	285.8	72.0	286.5	77.4	286.9	82.1	283.6	68.1	22.0

Таблица 53

Изменение температуры оболочки и линейной нагрузки в течение кампании (К)

К 18 ТВС 28 твэл 82											
№ слоя зоны	Тэфф=0.0		Тэфф=100.0		Тэфф=200.0		Тэфф=306.73		Тэфф=325.0		
	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Темп. обол..	Ql	Bur
25	305.4	59.5	308.0	73.5	308.2	81.8	308.5	87.7	309.8	112.6	20.6
24	310.9	79.1	314.3	96.0	314.9	105.1	315.3	111.0	318.5	142.3	27.2
23	312.5	94.7	316.0	113.3	316.5	121.6	316.7	126.4	320.4	161.9	32.5
22	313.7	105.5	317.0	123.3	317.0	131.2	317.0	134.6	321.0	171.2	36.1
21	313.9	113.7	316.9	130.0	317.0	136.2	316.6	138.3	320.3	173.3	38.4
20	313.9	119.7	316.3	134.2	316.0	138.5	315.9	139.5	318.7	170.5	40.2
19	313.3	124.2	315.5	137.2	314.7	139.2	314.4	139.4	316.1	164.5	41.9
18	312.5	127.7	314.0	138.1	313.4	139.5	312.9	138.6	313.7	156.5	43.5
17	312.0	131.1	313.0	139.3	312.0	138.8	311.4	137.8	311.0	148.8	44.6
16	310.8	133.5	311.6	139.7	310.6	138.8	309.9	137.2	308.4	141.4	45.4
15	309.9	135.4	310.2	140.0	309.3	138.3	308.6	136.8	306.2	135.0	45.9
14	308.8	136.9	308.9	140.8	307.9	138.1	307.0	135.9	303.8	129.7	46.2
13	307.4	137.9	307.5	140.9	306.3	137.9	305.8	135.8	302.0	125.4	46.5
12	306.0	138.3	306.1	140.7	304.7	137.9	304.2	135.8	299.9	122.0	46.7
11	304.4	138.3	304.5	140.7	303.5	138.0	303.0	136.1	298.5	119.5	46.8
10	303.1	137.8	302.9	140.7	301.9	138.3	301.4	136.6	297.0	117.8	46.9
9	301.3	137.4	301.4	141.3	300.8	138.8	300.3	137.9	295.7	116.7	47.0
8	299.5	135.8	299.9	141.1	299.4	139.4	299.0	138.9	294.1	116.8	47.0
7	297.7	134.0	298.4	140.6	298.2	139.9	297.7	139.9	293.1	116.8	46.8
6	295.8	130.6	296.9	139.1	296.5	139.7	296.6	140.4	292.0	116.6	46.4
5	293.9	126.2	295.0	136.2	295.2	138.3	295.0	139.9	290.5	115.9	45.2
4	291.9	119.1	293.4	131.0	293.4	134.4	293.3	137.1	289.6	113.8	43.2
3	289.1	108.4	290.8	121.4	291.5	126.4	291.6	129.8	287.7	108.0	39.6
2	286.4	91.9	287.9	104.4	288.4	110.7	289.2	115.2	285.8	95.6	33.4
1	283.7	66.7	285.8	77.5	286.5	83.6	286.9	88.6	283.6	73.8	24.2

Таблица 54

Результаты расчета флюенса в оболочках твэл в энергетическом интервале 10.5 МэВ-0.8 МэВ (n/см^2)

Кампания 15 ТВС 26

твэл №	6	16	32	54	82	116
			Тэфф=0.0			
25	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
24	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
23	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
22	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
21	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
20	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
19	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
18	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
17	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
16	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
15	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
14	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
13	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
12	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
11	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
10	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
9	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
8	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
			Тэфф=100			
25	2.47039E+20	2.50327E+20	2.52019E+20	2.52257E+20	2.50851E+20	2.47492E+20
24	3.47071E+20	3.51222E+20	3.53163E+20	3.53029E+20	3.50619E+20	3.45531E+20
23	4.46430E+20	4.51125E+20	4.52933E+20	4.52115E+20	4.48282E+20	4.41133E+20
22	5.27751E+20	5.32739E+20	5.34266E+20	5.32586E+20	5.26834E+20	5.17672E+20
21	5.94503E+20	5.99721E+20	6.01040E+20	5.98747E+20	5.91865E+20	5.81027E+20
20	6.52888E+20	6.58620E+20	6.60006E+20	6.57423E+20	6.50495E+20	6.37835E+20
19	7.10524E+20	7.17165E+20	7.19082E+20	7.16138E+20	7.09223E+20	6.96626E+20
18	7.58788E+20	7.66173E+20	7.68659E+20	7.66758E+20	7.59885E+20	7.46577E+20
17	8.03626E+20	8.12370E+20	8.15775E+20	8.14072E+20	8.07495E+20	7.95036E+20
16	8.41639E+20	8.50876E+20	8.54846E+20	8.54036E+20	8.47635E+20	8.34508E+20
15	8.72458E+20	8.82281E+20	8.86395E+20	8.85640E+20	8.79175E+20	8.65657E+20
14	8.96745E+20	9.06926E+20	9.11068E+20	9.10205E+20	9.03388E+20	8.89756E+20
13	9.15452E+20	9.25846E+20	9.30074E+20	9.29105E+20	9.22059E+20	9.08053E+20
12	9.29450E+20	9.39912E+20	9.44115E+20	9.43131E+20	9.36067E+20	9.21581E+20
11	9.39071E+20	9.49550E+20	9.53796E+20	9.52712E+20	9.45485E+20	9.30760E+20
10	9.43780E+20	9.54404E+20	9.58671E+20	9.57854E+20	9.50227E+20	9.35517E+20
9	9.43428E+20	9.54047E+20	9.58948E+20	9.57859E+20	9.50144E+20	9.35260E+20
8	9.36049E+20	9.46765E+20	9.51267E+20	9.50997E+20	9.43523E+20	9.28755E+20
7	9.19416E+20	9.30205E+20	9.34892E+20	9.34803E+20	9.27994E+20	9.13580E+20
6	8.90086E+20	9.00954E+20	9.05747E+20	9.05404E+20	8.99842E+20	8.86406E+20
5	8.42115E+20	8.53041E+20	8.58302E+20	8.58707E+20	8.53122E+20	8.41953E+20
4	7.69039E+20	7.79829E+20	7.85372E+20	7.87367E+20	7.83302E+20	7.72882E+20
3	6.62878E+20	6.73130E+20	6.78988E+20	6.81726E+20	6.79243E+20	6.72175E+20
2	5.15025E+20	5.24026E+20	5.30257E+20	5.32878E+20	5.31988E+20	5.27685E+20
1	3.40823E+20	3.47329E+20	3.51742E+20	3.54161E+20	3.54324E+20	3.51676E+20

Тэфф=200

25	5.65983E+20	5.72976E+20	5.76364E+20	5.76746E+20	5.72703E+20	5.64180E+20
24	7.85990E+20	7.94716E+20	7.98509E+20	7.97144E+20	7.91149E+20	7.78554E+20
23	9.96866E+20	1.00765E+21	1.01044E+21	1.00765E+21	9.98311E+20	9.80977E+20
22	1.16171E+21	1.17169E+21	1.17450E+21	1.17012E+21	1.15756E+21	1.13624E+21
21	1.29071E+21	1.30080E+21	1.30329E+21	1.29744E+21	1.28248E+21	1.25781E+21
20	1.39709E+21	1.40816E+21	1.41085E+21	1.40411E+21	1.38859E+21	1.36134E+21
19	1.49758E+21	1.51044E+21	1.51347E+21	1.50697E+21	1.49151E+21	1.46421E+21
18	1.58026E+21	1.59413E+21	1.59855E+21	1.59367E+21	1.57828E+21	1.54977E+21
17	1.65302E+21	1.66959E+21	1.67533E+21	1.67135E+21	1.65685E+21	1.62992E+21
16	1.71230E+21	1.72947E+21	1.73673E+21	1.73392E+21	1.72006E+21	1.69234E+21
15	1.75801E+21	1.77631E+21	1.78359E+21	1.78105E+21	1.76699E+21	1.73888E+21
14	1.79234E+21	1.81133E+21	1.81875E+21	1.81564E+21	1.80149E+21	1.77300E+21
13	1.81807E+21	1.83698E+21	1.84451E+21	1.84136E+21	1.82665E+21	1.79758E+21
12	1.83627E+21	1.85537E+21	1.86298E+21	1.85962E+21	1.84494E+21	1.81523E+21
11	1.84864E+21	1.86769E+21	1.87517E+21	1.87197E+21	1.85666E+21	1.82675E+21
10	1.85439E+21	1.87350E+21	1.88118E+21	1.87796E+21	1.86243E+21	1.83225E+21
9	1.85276E+21	1.87185E+21	1.88006E+21	1.87685E+21	1.86097E+21	1.83064E+21
8	1.84046E+21	1.85978E+21	1.86775E+21	1.86545E+21	1.84985E+21	1.81972E+21
7	1.81337E+21	1.83292E+21	1.84095E+21	1.83920E+21	1.82437E+21	1.79504E+21
6	1.76435E+21	1.78421E+21	1.79219E+21	1.79066E+21	1.77759E+21	1.74991E+21
5	1.68100E+21	1.70122E+21	1.71027E+21	1.70963E+21	1.69750E+21	1.67291E+21
4	1.54957E+21	1.56984E+21	1.57953E+21	1.58132E+21	1.57163E+21	1.54942E+21
3	1.35043E+21	1.37004E+21	1.38056E+21	1.38380E+21	1.37744E+21	1.36082E+21
2	1.06215E+21	1.07950E+21	1.09032E+21	1.09461E+21	1.09165E+21	1.08083E+21
1	7.07193E+20	7.19691E+20	7.27909E+20	7.32732E+20	7.32664E+20	7.26755E+20

Тэфф=260.77

25	7.84121E+20	7.93361E+20	7.97981E+20	7.98132E+20	7.92149E+20	7.80258E+20
24	1.08444E+21	1.09586E+21	1.10088E+21	1.09858E+21	1.08999E+21	1.07229E+21
23	1.36668E+21	1.38068E+21	1.38451E+21	1.37989E+21	1.36694E+21	1.34250E+21
22	1.58096E+21	1.59379E+21	1.59746E+21	1.59074E+21	1.57347E+21	1.54399E+21
21	1.74357E+21	1.75671E+21	1.75957E+21	1.75149E+21	1.73094E+21	1.69708E+21
20	1.87370E+21	1.88818E+21	1.89107E+21	1.88202E+21	1.86048E+21	1.82355E+21
19	1.99396E+21	2.00994E+21	2.01398E+21	2.00532E+21	1.98396E+21	1.94720E+21
18	2.09173E+21	2.10950E+21	2.11475E+21	2.10789E+21	2.08669E+21	2.04893E+21
17	2.17590E+21	2.19647E+21	2.20402E+21	2.19857E+21	2.17863E+21	2.14274E+21
16	2.24301E+21	2.26486E+21	2.27373E+21	2.26962E+21	2.25058E+21	2.21425E+21
15	2.29347E+21	2.31624E+21	2.32553E+21	2.32199E+21	2.30253E+21	2.26584E+21
14	2.33042E+21	2.35400E+21	2.36343E+21	2.35939E+21	2.33985E+21	2.30256E+21
13	2.35774E+21	2.38115E+21	2.39069E+21	2.38660E+21	2.36638E+21	2.32843E+21
12	2.37679E+21	2.40038E+21	2.41000E+21	2.40565E+21	2.38526E+21	2.34678E+21
11	2.38981E+21	2.41329E+21	2.42274E+21	2.41859E+21	2.39764E+21	2.35872E+21
10	2.39597E+21	2.41975E+21	2.42921E+21	2.42483E+21	2.40382E+21	2.36457E+21
9	2.39420E+21	2.41773E+21	2.42811E+21	2.42350E+21	2.40205E+21	2.36283E+21
8	2.38053E+21	2.40462E+21	2.41448E+21	2.41058E+21	2.38994E+21	2.35095E+21
7	2.34972E+21	2.37371E+21	2.38412E+21	2.38073E+21	2.36126E+21	2.32278E+21
6	2.29247E+21	2.31697E+21	2.32734E+21	2.32403E+21	2.30682E+21	2.26995E+21
5	2.19245E+21	2.21757E+21	2.22897E+21	2.22728E+21	2.21081E+21	2.17789E+21
4	2.03103E+21	2.05644E+21	2.06797E+21	2.06954E+21	2.05624E+21	2.02634E+21
3	1.78070E+21	1.80554E+21	1.81839E+21	1.82164E+21	1.81222E+21	1.78944E+21
2	1.41019E+21	1.43243E+21	1.44545E+21	1.45033E+21	1.44572E+21	1.43013E+21
1	9.44581E+20	9.60742E+20	9.71001E+20	9.76721E+20	9.75904E+20	9.67188E+20

Тэфф=296.0

25	9.41028E+20	9.52299E+20	9.57934E+20	9.58389E+20	9.51572E+20	9.37483E+20
24	1.29823E+21	1.31215E+21	1.31867E+21	1.31629E+21	1.30638E+21	1.28557E+21
23	1.62955E+21	1.64640E+21	1.65129E+21	1.64688E+21	1.63207E+21	1.60388E+21
22	1.87538E+21	1.89169E+21	1.89659E+21	1.88988E+21	1.87031E+21	1.83696E+21
21	2.05706E+21	2.07356E+21	2.07813E+21	2.06978E+21	2.04693E+21	2.00837E+21
20	2.19666E+21	2.21449E+21	2.21895E+21	2.20961E+21	2.18563E+21	2.14403E+21
19	2.31954E+21	2.33925E+21	2.34463E+21	2.33544E+21	2.31171E+21	2.27028E+21
18	2.41619E+21	2.43671E+21	2.44371E+21	2.43648E+21	2.41269E+21	2.37001E+21
17	2.49555E+21	2.51914E+21	2.52757E+21	2.52155E+21	2.49965E+21	2.45848E+21
16	2.55613E+21	2.58078E+21	2.59088E+21	2.58620E+21	2.56451E+21	2.52310E+21
15	2.59947E+21	2.62503E+21	2.63531E+21	2.63105E+21	2.60899E+21	2.56739E+21
14	2.62955E+21	2.65592E+21	2.66631E+21	2.66175E+21	2.63944E+21	2.59710E+21
13	2.65100E+21	2.67707E+21	2.68755E+21	2.68269E+21	2.65995E+21	2.61702E+21
12	2.66508E+21	2.69128E+21	2.70182E+21	2.69668E+21	2.67382E+21	2.63040E+21
11	2.67413E+21	2.70016E+21	2.71047E+21	2.70583E+21	2.68186E+21	2.63830E+21
10	2.67716E+21	2.70348E+21	2.71381E+21	2.70890E+21	2.68516E+21	2.64104E+21
9	2.67282E+21	2.69884E+21	2.71017E+21	2.70502E+21	2.68107E+21	2.63702E+21
8	2.65675E+21	2.68338E+21	2.69414E+21	2.68978E+21	2.66674E+21	2.62295E+21
7	2.62322E+21	2.64976E+21	2.66113E+21	2.65709E+21	2.63535E+21	2.59238E+21
6	2.56103E+21	2.58817E+21	2.59976E+21	2.59606E+21	2.57682E+21	2.53513E+21
5	2.45280E+21	2.48067E+21	2.49343E+21	2.49154E+21	2.47288E+21	2.43532E+21
4	2.27689E+21	2.30517E+21	2.31810E+21	2.31942E+21	2.30407E+21	2.27053E+21
3	2.00174E+21	2.02929E+21	2.04354E+21	2.04643E+21	2.03584E+21	2.01002E+21
2	1.59029E+21	1.61492E+21	1.62915E+21	1.63450E+21	1.62915E+21	1.61110E+21
1	1.06847E+21	1.08635E+21	1.09775E+21	1.10402E+21	1.10278E+21	1.09272E+21

Таблица 55

Результаты расчета флюенса в оболочках твэл в энергетическом интервале 10.5 МэВ-0.8 МэВ (n/см^2)

Кампания 16 ТВС 24

твэл №	6	16	32	54	82	116
			Тэфф=0.0			
25	9.41028E+20	9.52299E+20	9.57934E+20	9.58389E+20	9.51572E+20	9.37483E+20
24	1.29823E+21	1.31215E+21	1.31867E+21	1.31629E+21	1.30638E+21	1.28557E+21
23	1.62955E+21	1.64640E+21	1.65129E+21	1.64688E+21	1.63207E+21	1.60388E+21
22	1.87538E+21	1.89169E+21	1.89659E+21	1.88988E+21	1.87031E+21	1.83696E+21
21	2.05706E+21	2.07356E+21	2.07813E+21	2.06978E+21	2.04693E+21	2.00837E+21
20	2.19666E+21	2.21449E+21	2.21895E+21	2.20961E+21	2.18563E+21	2.14403E+21
19	2.31954E+21	2.33925E+21	2.34463E+21	2.33544E+21	2.31171E+21	2.27028E+21
18	2.41619E+21	2.43671E+21	2.44371E+21	2.43648E+21	2.41269E+21	2.37001E+21
17	2.49555E+21	2.51914E+21	2.52757E+21	2.52155E+21	2.49965E+21	2.45848E+21
16	2.55613E+21	2.58078E+21	2.59088E+21	2.58620E+21	2.56451E+21	2.52310E+21
15	2.59947E+21	2.62503E+21	2.63531E+21	2.63105E+21	2.60899E+21	2.56739E+21
14	2.62955E+21	2.65592E+21	2.66631E+21	2.66175E+21	2.63944E+21	2.59710E+21
13	2.65100E+21	2.67707E+21	2.68755E+21	2.68269E+21	2.65995E+21	2.61702E+21
12	2.66508E+21	2.69128E+21	2.70182E+21	2.69668E+21	2.67382E+21	2.63040E+21
11	2.67413E+21	2.70016E+21	2.71047E+21	2.70583E+21	2.68186E+21	2.63830E+21
10	2.67716E+21	2.70348E+21	2.71381E+21	2.70890E+21	2.68516E+21	2.64104E+21
9	2.67282E+21	2.69884E+21	2.71017E+21	2.70502E+21	2.68107E+21	2.63702E+21
8	2.65675E+21	2.68338E+21	2.69414E+21	2.68978E+21	2.66674E+21	2.62295E+21
7	2.62322E+21	2.64976E+21	2.66113E+21	2.65709E+21	2.63535E+21	2.59238E+21
6	2.56103E+21	2.58817E+21	2.59976E+21	2.59606E+21	2.57682E+21	2.53513E+21
5	2.45280E+21	2.48067E+21	2.49343E+21	2.49154E+21	2.47288E+21	2.43532E+21
4	2.27689E+21	2.30517E+21	2.31810E+21	2.31942E+21	2.30407E+21	2.27053E+21
3	2.00174E+21	2.02929E+21	2.04354E+21	2.04643E+21	2.03584E+21	2.01002E+21
2	1.59029E+21	1.61492E+21	1.62915E+21	1.63450E+21	1.62915E+21	1.61110E+21
1	1.06847E+21	1.08635E+21	1.09775E+21	1.10402E+21	1.10278E+21	1.09272E+21
			Тэфф=100			
25	1.21187E+21	1.22371E+21	1.22875E+21	1.22779E+21	1.21865E+21	1.20106E+21
24	1.67367E+21	1.68822E+21	1.69374E+21	1.68917E+21	1.67574E+21	1.64982E+21
23	2.10215E+21	2.11942E+21	2.12258E+21	2.11500E+21	2.09529E+21	2.06015E+21
22	2.42495E+21	2.44132E+21	2.44382E+21	2.43299E+21	2.40723E+21	2.36531E+21
21	2.67151E+21	2.68782E+21	2.68942E+21	2.67615E+21	2.64589E+21	2.59756E+21
20	2.87222E+21	2.88985E+21	2.89097E+21	2.87610E+21	2.84397E+21	2.79136E+21
19	3.06156E+21	3.08164E+21	3.08401E+21	3.06911E+21	3.03688E+21	2.98373E+21
18	3.23012E+21	3.25273E+21	3.25764E+21	3.24526E+21	3.21272E+21	3.15726E+21
17	3.36992E+21	3.39662E+21	3.40358E+21	3.39281E+21	3.36211E+21	3.30774E+21
16	3.47574E+21	3.50383E+21	3.51276E+21	3.50309E+21	3.47233E+21	3.41694E+21
15	3.55184E+21	3.58088E+21	3.59013E+21	3.58051E+21	3.54906E+21	3.49280E+21
14	3.60541E+21	3.63524E+21	3.64448E+21	3.63424E+21	3.60211E+21	3.54475E+21
13	3.64329E+21	3.67278E+21	3.68189E+21	3.67116E+21	3.63824E+21	3.57994E+21
12	3.66815E+21	3.69772E+21	3.70667E+21	3.69549E+21	3.66214E+21	3.60299E+21
11	3.68352E+21	3.71274E+21	3.72126E+21	3.71044E+21	3.67562E+21	3.61602E+21
10	3.68826E+21	3.71757E+21	3.72589E+21	3.71471E+21	3.67989E+21	3.61950E+21
9	3.68072E+21	3.70962E+21	3.71897E+21	3.70735E+21	3.67205E+21	3.61159E+21
8	3.65560E+21	3.68499E+21	3.69357E+21	3.68271E+21	3.64833E+21	3.58818E+21
7	3.60473E+21	3.63389E+21	3.64313E+21	3.63260E+21	3.59972E+21	3.54047E+21
6	3.51362E+21	3.54348E+21	3.55301E+21	3.54320E+21	3.51314E+21	3.45575E+21
5	3.35999E+21	3.39072E+21	3.40178E+21	3.39425E+21	3.36565E+21	3.31341E+21
4	3.11544E+21	3.14686E+21	3.15872E+21	3.15516E+21	3.13113E+21	3.08419E+21
3	2.73879E+21	2.76975E+21	2.78342E+21	2.78275E+21	2.76504E+21	2.72804E+21
2	2.18023E+21	2.20817E+21	2.22251E+21	2.22572E+21	2.21525E+21	2.18895E+21
1	1.46832E+21	1.48883E+21	1.50071E+21	1.50595E+21	1.50176E+21	1.48654E+21

Тэфф=200

25	1.54633E+21	1.55850E+21	1.56258E+21	1.55933E+21	1.54695E+21	1.52468E+21
24	2.13051E+21	2.14542E+21	2.14931E+21	2.14125E+21	2.12313E+21	2.09047E+21
23	2.66548E+21	2.68295E+21	2.68333E+21	2.67124E+21	2.64528E+21	2.60092E+21
22	3.06440E+21	3.08059E+21	3.07926E+21	3.06315E+21	3.02936E+21	2.97686E+21
21	3.36761E+21	3.38320E+21	3.38065E+21	3.36129E+21	3.32185E+21	3.26166E+21
20	3.61601E+21	3.63271E+21	3.62960E+21	3.60806E+21	3.56612E+21	3.50082E+21
19	3.85517E+21	3.87457E+21	3.87328E+21	3.85181E+21	3.80957E+21	3.74327E+21
18	4.07573E+21	4.09920E+21	4.10161E+21	4.08324E+21	4.04077E+21	3.97138E+21
17	4.25603E+21	4.28466E+21	4.28979E+21	4.27369E+21	4.23337E+21	4.16493E+21
16	4.38811E+21	4.41854E+21	4.42576E+21	4.41059E+21	4.37046E+21	4.30068E+21
15	4.47963E+21	4.51131E+21	4.51862E+21	4.50342E+21	4.46245E+21	4.39154E+21
14	4.54194E+21	4.57453E+21	4.58172E+21	4.56565E+21	4.52372E+21	4.45176E+21
13	4.58455E+21	4.61691E+21	4.62395E+21	4.60708E+21	4.56411E+21	4.49104E+21
12	4.61191E+21	4.64427E+21	4.65096E+21	4.63391E+21	4.58991E+21	4.51557E+21
11	4.62826E+21	4.66008E+21	4.66653E+21	4.64955E+21	4.60437E+21	4.52938E+21
10	4.63305E+21	4.66497E+21	4.67104E+21	4.65359E+21	4.60823E+21	4.53226E+21
9	4.62436E+21	4.65558E+21	4.66267E+21	4.64481E+21	4.59870E+21	4.52268E+21
8	4.59560E+21	4.62721E+21	4.63337E+21	4.61619E+21	4.57114E+21	4.49521E+21
7	4.53620E+21	4.56765E+21	4.57431E+21	4.55761E+21	4.51397E+21	4.43908E+21
6	4.42852E+21	4.46064E+21	4.46781E+21	4.45157E+21	4.41113E+21	4.33828E+21
5	4.24456E+21	4.27756E+21	4.28643E+21	4.27287E+21	4.23405E+21	4.16732E+21
4	3.94755E+21	3.98127E+21	3.99140E+21	3.98266E+21	3.94968E+21	3.88911E+21
3	3.48438E+21	3.51777E+21	3.53057E+21	3.52571E+21	3.50020E+21	3.45114E+21
2	2.78811E+21	2.81923E+21	2.83299E+21	2.83350E+21	2.81728E+21	2.78188E+21
1	1.88669E+21	1.90972E+21	1.92161E+21	1.92554E+21	1.91777E+21	1.89682E+21

Тэфф=343.08

25	2.09943E+21	2.11208E+21	2.11324E+21	2.10614E+21	2.08742E+21	2.05672E+21
24	2.87557E+21	2.89027E+21	2.89040E+21	2.87617E+21	2.84943E+21	2.80460E+21
23	3.56875E+21	3.58426E+21	3.58014E+21	3.56021E+21	3.52260E+21	3.46355E+21
22	4.06963E+21	4.08291E+21	4.07609E+21	4.05117E+21	4.00449E+21	3.93427E+21
21	4.43957E+21	4.45300E+21	4.44345E+21	4.41414E+21	4.36067E+21	4.28184E+21
20	4.73791E+21	4.75323E+21	4.74312E+21	4.71017E+21	4.65379E+21	4.56900E+21
19	5.02792E+21	5.04683E+21	5.03910E+21	5.00691E+21	4.95001E+21	4.86418E+21
18	5.30091E+21	5.32628E+21	5.32388E+21	5.29557E+21	5.23874E+21	5.14962E+21
17	5.51987E+21	5.55212E+21	5.55308E+21	5.52766E+21	5.47381E+21	5.38579E+21
16	5.67289E+21	5.70738E+21	5.71134E+21	5.68728E+21	5.63299E+21	5.54300E+21
15	5.77333E+21	5.80922E+21	5.81355E+21	5.78988E+21	5.73432E+21	5.64294E+21
14	5.83828E+21	5.87509E+21	5.87979E+21	5.85528E+21	5.79816E+21	5.70612E+21
13	5.88076E+21	5.91735E+21	5.92209E+21	5.89684E+21	5.83904E+21	5.74513E+21
12	5.90752E+21	5.94397E+21	5.94810E+21	5.92313E+21	5.86475E+21	5.76983E+21
11	5.92391E+21	5.95956E+21	5.96346E+21	5.93829E+21	5.87873E+21	5.78322E+21
10	5.92977E+21	5.96539E+21	5.96865E+21	5.94289E+21	5.88320E+21	5.78611E+21
9	5.92287E+21	5.95755E+21	5.96183E+21	5.93551E+21	5.87466E+21	5.77736E+21
8	5.89522E+21	5.93016E+21	5.93324E+21	5.90747E+21	5.84767E+21	5.75018E+21
7	5.83327E+21	5.86805E+21	5.87150E+21	5.84622E+21	5.78773E+21	5.69120E+21
6	5.71468E+21	5.75022E+21	5.75434E+21	5.72947E+21	5.67443E+21	5.58013E+21
5	5.50316E+21	5.53977E+21	5.54590E+21	5.52415E+21	5.47087E+21	5.38304E+21
4	5.14886E+21	5.18648E+21	5.19347E+21	5.17637E+21	5.12986E+21	5.04985E+21
3	4.57874E+21	4.61543E+21	4.62511E+21	4.61403E+21	4.57752E+21	4.51105E+21
2	3.69599E+21	3.72934E+21	3.74274E+21	3.73896E+21	3.71347E+21	3.66386E+21
1	2.52067E+21	2.54657E+21	2.55854E+21	2.55937E+21	2.54596E+21	2.51570E+21

Тэфф=390

25	2.35191E+21	2.36527E+21	2.36644E+21	2.35811E+21	2.33735E+21	2.30347E+21
24	3.21327E+21	3.22927E+21	3.22842E+21	3.21279E+21	3.18302E+21	3.13325E+21
23	3.97463E+21	3.99148E+21	3.98663E+21	3.96438E+21	3.92317E+21	3.85814E+21
22	4.51643E+21	4.53117E+21	4.52354E+21	4.49648E+21	4.44508E+21	4.36842E+21
21	4.90754E+21	4.92263E+21	4.91227E+21	4.88055E+21	4.82221E+21	4.73691E+21
20	5.21196E+21	5.22919E+21	5.21846E+21	5.18350E+21	5.12198E+21	5.03063E+21
19	5.49735E+21	5.51862E+21	5.51082E+21	5.47621E+21	5.41419E+21	5.32192E+21
18	5.75885E+21	5.78730E+21	5.78340E+21	5.75241E+21	5.69165E+21	5.59583E+21
17	5.96268E+21	5.99619E+21	5.99641E+21	5.96951E+21	5.91134E+21	5.81679E+21
16	6.09974E+21	6.13558E+21	6.13869E+21	6.11198E+21	6.05323E+21	5.95658E+21
15	6.18584E+21	6.22307E+21	6.22663E+21	6.20043E+21	6.14052E+21	6.04267E+21
14	6.23777E+21	6.27588E+21	6.27987E+21	6.25288E+21	6.19142E+21	6.09319E+21
13	6.26960E+21	6.30744E+21	6.31149E+21	6.28379E+21	6.22178E+21	6.12173E+21
12	6.28797E+21	6.32561E+21	6.32899E+21	6.30169E+21	6.23915E+21	6.13818E+21
11	6.29822E+21	6.33498E+21	6.33814E+21	6.31061E+21	6.24695E+21	6.14545E+21
10	6.29998E+21	6.33667E+21	6.33913E+21	6.31099E+21	6.24720E+21	6.14409E+21
9	6.29083E+21	6.32649E+21	6.32996E+21	6.30124E+21	6.23622E+21	6.13290E+21
8	6.26207E+21	6.29795E+21	6.30016E+21	6.27196E+21	6.20800E+21	6.10442E+21
7	6.19910E+21	6.23482E+21	6.23737E+21	6.20968E+21	6.14699E+21	6.04436E+21
6	6.07799E+21	6.11450E+21	6.11777E+21	6.09046E+21	6.03130E+21	5.93128E+21
5	5.86039E+21	5.89802E+21	5.90338E+21	5.87930E+21	5.82196E+21	5.72859E+21
4	5.49222E+21	5.53096E+21	5.53724E+21	5.51793E+21	5.46770E+21	5.38246E+21
3	4.89419E+21	4.93200E+21	4.94112E+21	4.92833E+21	4.88864E+21	4.81691E+21
2	3.96018E+21	3.99463E+21	4.00792E+21	4.00276E+21	3.97451E+21	3.92095E+21
1	2.70690E+21	2.73382E+21	2.74571E+21	2.74568E+21	2.73071E+21	2.69786E+21

Таблица 56

Результаты расчета флюенса в оболочках твэл в энергетическом интервале 10.5 МэВ-0.8 МэВ (n/см^2)

Кампания 17 ТВС 24

твэл №	6	16	32	54	82	116
			Тэфф=0.0			
25	2.35191E+21	2.36527E+21	2.36644E+21	2.35811E+21	2.33735E+21	2.30347E+21
24	3.21327E+21	3.22927E+21	3.22842E+21	3.21279E+21	3.18302E+21	3.13325E+21
23	3.97463E+21	3.99148E+21	3.98663E+21	3.96438E+21	3.92317E+21	3.85814E+21
22	4.51643E+21	4.53117E+21	4.52354E+21	4.49648E+21	4.44508E+21	4.36842E+21
21	4.90754E+21	4.92263E+21	4.91227E+21	4.88055E+21	4.82221E+21	4.73691E+21
20	5.21196E+21	5.22919E+21	5.21846E+21	5.18350E+21	5.12198E+21	5.03063E+21
19	5.49735E+21	5.51862E+21	5.51082E+21	5.47621E+21	5.41419E+21	5.32192E+21
18	5.75885E+21	5.78730E+21	5.78340E+21	5.75241E+21	5.69165E+21	5.59583E+21
17	5.96268E+21	5.99619E+21	5.99641E+21	5.96951E+21	5.91134E+21	5.81679E+21
16	6.09974E+21	6.13558E+21	6.13869E+21	6.11198E+21	6.05323E+21	5.95658E+21
15	6.18584E+21	6.22307E+21	6.22663E+21	6.20043E+21	6.14052E+21	6.04267E+21
14	6.23777E+21	6.27588E+21	6.27987E+21	6.25288E+21	6.19142E+21	6.09319E+21
13	6.26960E+21	6.30744E+21	6.31149E+21	6.28379E+21	6.22178E+21	6.12173E+21
12	6.28797E+21	6.32561E+21	6.32899E+21	6.30169E+21	6.23915E+21	6.13818E+21
11	6.29822E+21	6.33498E+21	6.33814E+21	6.31061E+21	6.24695E+21	6.14545E+21
10	6.29998E+21	6.33667E+21	6.33913E+21	6.31099E+21	6.24720E+21	6.14409E+21
9	6.29083E+21	6.32649E+21	6.32996E+21	6.30124E+21	6.23622E+21	6.13290E+21
8	6.26207E+21	6.29795E+21	6.30016E+21	6.27196E+21	6.20800E+21	6.10442E+21
7	6.19910E+21	6.23482E+21	6.23737E+21	6.20968E+21	6.14699E+21	6.04436E+21
6	6.07799E+21	6.11450E+21	6.11777E+21	6.09046E+21	6.03130E+21	5.93128E+21
5	5.86039E+21	5.89802E+21	5.90338E+21	5.87930E+21	5.82196E+21	5.72859E+21
4	5.49222E+21	5.53096E+21	5.53724E+21	5.51793E+21	5.46770E+21	5.38246E+21
3	4.89419E+21	4.93200E+21	4.94112E+21	4.92833E+21	4.88864E+21	4.81691E+21
2	3.96018E+21	3.99463E+21	4.00792E+21	4.00276E+21	3.97451E+21	3.92095E+21
1	2.70690E+21	2.73382E+21	2.74571E+21	2.74568E+21	2.73071E+21	2.69786E+21
			Тэфф=94.86			
25	2.70336E+21	2.71501E+21	2.71341E+21	2.70160E+21	2.67639E+21	2.63674E+21
24	3.68652E+21	3.69992E+21	3.69519E+21	3.67474E+21	3.63887E+21	3.58135E+21
23	4.54758E+21	4.56094E+21	4.55116E+21	4.52273E+21	4.47401E+21	4.39970E+21
22	5.15508E+21	5.16568E+21	5.15229E+21	5.11821E+21	5.05831E+21	4.97117E+21
21	5.59131E+21	5.60188E+21	5.58524E+21	5.54592E+21	5.47855E+21	5.38202E+21
20	5.93175E+21	5.94437E+21	5.92722E+21	5.88456E+21	5.81368E+21	5.71089E+21
19	6.25440E+21	6.27166E+21	6.25810E+21	6.21616E+21	6.14506E+21	6.04181E+21
18	6.55372E+21	6.58010E+21	6.57200E+21	6.53505E+21	6.46619E+21	6.35966E+21
17	6.78909E+21	6.82169E+21	6.81861E+21	6.78677E+21	6.72125E+21	6.61656E+21
16	6.94801E+21	6.98343E+21	6.98366E+21	6.95230E+21	6.88661E+21	6.78006E+21
15	7.04939E+21	7.08637E+21	7.08717E+21	7.05650E+21	6.98961E+21	6.88193E+21
14	7.11306E+21	7.15091E+21	7.15228E+21	7.12075E+21	7.05239E+21	6.94422E+21
13	7.15490E+21	7.19257E+21	7.19388E+21	7.16159E+21	7.09269E+21	6.98266E+21
12	7.18255E+21	7.22011E+21	7.22072E+21	7.18887E+21	7.11937E+21	7.00832E+21
11	7.20201E+21	7.23859E+21	7.23913E+21	7.20701E+21	7.13640E+21	7.02481E+21
10	7.21287E+21	7.24947E+21	7.24929E+21	7.21659E+21	7.14580E+21	7.03267E+21
9	7.21229E+21	7.24805E+21	7.24895E+21	7.21573E+21	7.14363E+21	7.03038E+21
8	7.19051E+21	7.22667E+21	7.22648E+21	7.19384E+21	7.12292E+21	7.00935E+21
7	7.13057E+21	7.16675E+21	7.16698E+21	7.13501E+21	7.06555E+21	6.95298E+21
6	7.00543E+21	7.04259E+21	7.04373E+21	7.01235E+21	6.94662E+21	6.83690E+21
5	6.77082E+21	6.80936E+21	6.81290E+21	6.78501E+21	6.72132E+21	6.61841E+21
4	6.36351E+21	6.40339E+21	6.40819E+21	6.38541E+21	6.32919E+21	6.23491E+21
3	5.68976E+21	5.72892E+21	5.73693E+21	5.72129E+21	5.67629E+21	5.59624E+21
2	4.62212E+21	4.65808E+21	4.67078E+21	4.66351E+21	4.63111E+21	4.57043E+21
1	3.17083E+21	3.19909E+21	3.21079E+21	3.20947E+21	3.19159E+21	3.15358E+21

Тэфф=98.0

25	2.71600E+21	2.72758E+21	2.72588E+21	2.71395E+21	2.68861E+21	2.64876E+21
24	3.70343E+21	3.71674E+21	3.71187E+21	3.69125E+21	3.65521E+21	3.59741E+21
23	4.56792E+21	4.58115E+21	4.57120E+21	4.54261E+21	4.49362E+21	4.41898E+21
22	5.17758E+21	5.18802E+21	5.17450E+21	5.14017E+21	5.07997E+21	4.99247E+21
21	5.61519E+21	5.62561E+21	5.60881E+21	5.56923E+21	5.50154E+21	5.40462E+21
20	5.95666E+21	5.96912E+21	5.95183E+21	5.90890E+21	5.83770E+21	5.73450E+21
19	6.28036E+21	6.29749E+21	6.28373E+21	6.24162E+21	6.17020E+21	6.06658E+21
18	6.58073E+21	6.60705E+21	6.59880E+21	6.56173E+21	6.49260E+21	6.38569E+21
17	6.81693E+21	6.84951E+21	6.84631E+21	6.81430E+21	6.74862E+21	6.64359E+21
16	6.97637E+21	7.01177E+21	7.01191E+21	6.98039E+21	6.91456E+21	6.80768E+21
15	7.07805E+21	7.11502E+21	7.11573E+21	7.08490E+21	7.01787E+21	6.90987E+21
14	7.14191E+21	7.17975E+21	7.18103E+21	7.14936E+21	7.08077E+21	6.97236E+21
13	7.18389E+21	7.22155E+21	7.22278E+21	7.19033E+21	7.12121E+21	7.01094E+21
12	7.21167E+21	7.24922E+21	7.24975E+21	7.21775E+21	7.14802E+21	7.03673E+21
11	7.23127E+21	7.26785E+21	7.26830E+21	7.23603E+21	7.16520E+21	7.05338E+21
10	7.24230E+21	7.27889E+21	7.27862E+21	7.24578E+21	7.17476E+21	7.06131E+21
9	7.24188E+21	7.27764E+21	7.27846E+21	7.24509E+21	7.17277E+21	7.05920E+21
8	7.22025E+21	7.25641E+21	7.25614E+21	7.22336E+21	7.15222E+21	7.03833E+21
7	7.16036E+21	7.19656E+21	7.19672E+21	7.16461E+21	7.09493E+21	6.98204E+21
6	7.03510E+21	7.07228E+21	7.07334E+21	7.04184E+21	6.97590E+21	6.86586E+21
5	6.79999E+21	6.83855E+21	6.84204E+21	6.81402E+21	6.75013E+21	6.64692E+21
4	6.39152E+21	6.43143E+21	6.43618E+21	6.41329E+21	6.35687E+21	6.26231E+21
3	5.71544E+21	5.75465E+21	5.76263E+21	5.74689E+21	5.70172E+21	5.62140E+21
2	4.64361E+21	4.67962E+21	4.69230E+21	4.68496E+21	4.65243E+21	4.59152E+21
1	3.18597E+21	3.21428E+21	3.22597E+21	3.22460E+21	3.20664E+21	3.16845E+21

Таблица 57

Результаты расчета флюенса в оболочках твэл в энергетическом интервале 10.5 МэВ-0.8 МэВ (n/см^2)

Кампания 18 ТВС 28

твэл №	6	16	32	54	82	116
			Тэфф=0.0			
25	2.71600E+21	2.72758E+21	2.72588E+21	2.71395E+21	2.68861E+21	2.64876E+21
24	3.70343E+21	3.71674E+21	3.71187E+21	3.69125E+21	3.65521E+21	3.59741E+21
23	4.56792E+21	4.58115E+21	4.57120E+21	4.54261E+21	4.49362E+21	4.41898E+21
22	5.17758E+21	5.18802E+21	5.17450E+21	5.14017E+21	5.07997E+21	4.99247E+21
21	5.61519E+21	5.62561E+21	5.60881E+21	5.56923E+21	5.50154E+21	5.40462E+21
20	5.95666E+21	5.96912E+21	5.95183E+21	5.90890E+21	5.83770E+21	5.73450E+21
19	6.28036E+21	6.29749E+21	6.28373E+21	6.24162E+21	6.17020E+21	6.06658E+21
18	6.58073E+21	6.60705E+21	6.59880E+21	6.56173E+21	6.49260E+21	6.38569E+21
17	6.81693E+21	6.84951E+21	6.84631E+21	6.81430E+21	6.74862E+21	6.64359E+21
16	6.97637E+21	7.01177E+21	7.01191E+21	6.98039E+21	6.91456E+21	6.80768E+21
15	7.07805E+21	7.11502E+21	7.11573E+21	7.08490E+21	7.01787E+21	6.90987E+21
14	7.14191E+21	7.17975E+21	7.18103E+21	7.14936E+21	7.08077E+21	6.97236E+21
13	7.18389E+21	7.22155E+21	7.22278E+21	7.19033E+21	7.12121E+21	7.01094E+21
12	7.21167E+21	7.24922E+21	7.24975E+21	7.21775E+21	7.14802E+21	7.03673E+21
11	7.23127E+21	7.26785E+21	7.26830E+21	7.23603E+21	7.16520E+21	7.05338E+21
10	7.24230E+21	7.27889E+21	7.27862E+21	7.24578E+21	7.17476E+21	7.06131E+21
9	7.24188E+21	7.27764E+21	7.27846E+21	7.24509E+21	7.17277E+21	7.05920E+21
8	7.22025E+21	7.25641E+21	7.25614E+21	7.22336E+21	7.15222E+21	7.03833E+21
7	7.16036E+21	7.19656E+21	7.19672E+21	7.16461E+21	7.09493E+21	6.98204E+21
6	7.03510E+21	7.07228E+21	7.07334E+21	7.04184E+21	6.97590E+21	6.86586E+21
5	6.79999E+21	6.83855E+21	6.84204E+21	6.81402E+21	6.75013E+21	6.64692E+21
4	6.39152E+21	6.43143E+21	6.43618E+21	6.41329E+21	6.35687E+21	6.26231E+21
3	5.71544E+21	5.75465E+21	5.76263E+21	5.74689E+21	5.70172E+21	5.62140E+21
2	4.64361E+21	4.67962E+21	4.69230E+21	4.68496E+21	4.65243E+21	4.59152E+21
1	3.18597E+21	3.21428E+21	3.22597E+21	3.22460E+21	3.20664E+21	3.16845E+21
			Тэфф=100			
25	3.04611E+21	3.05924E+21	3.05816E+21	3.04624E+21	3.01998E+21	2.97793E+21
24	4.15324E+21	4.16852E+21	4.16445E+21	4.14383E+21	4.10658E+21	4.04601E+21
23	5.11881E+21	5.13413E+21	5.12495E+21	5.09614E+21	5.04572E+21	4.96784E+21
22	5.79941E+21	5.81197E+21	5.79907E+21	5.76430E+21	5.70224E+21	5.61107E+21
21	6.28800E+21	6.30043E+21	6.28404E+21	6.24385E+21	6.17401E+21	6.07312E+21
20	6.66826E+21	6.68244E+21	6.66515E+21	6.62122E+21	6.54774E+21	6.44027E+21
19	7.02350E+21	7.04190E+21	7.02792E+21	6.98468E+21	6.91073E+21	6.80271E+21
18	7.34691E+21	7.37445E+21	7.36598E+21	7.32752E+21	7.25577E+21	7.14441E+21
17	7.60279E+21	7.63639E+21	7.63248E+21	7.59898E+21	7.53053E+21	7.42107E+21
16	7.77690E+21	7.81318E+21	7.81236E+21	7.77923E+21	7.71041E+21	7.59902E+21
15	7.88866E+21	7.92637E+21	7.92610E+21	7.89356E+21	7.82343E+21	7.71086E+21
14	7.95922E+21	7.99764E+21	7.99793E+21	7.96436E+21	7.89265E+21	7.77962E+21
13	8.00525E+21	8.04341E+21	8.04365E+21	8.00921E+21	7.93694E+21	7.82196E+21
12	8.03518E+21	8.07322E+21	8.07276E+21	8.03868E+21	7.96572E+21	7.84970E+21
11	8.05537E+21	8.09244E+21	8.09190E+21	8.05747E+21	7.98340E+21	7.86676E+21
10	8.06585E+21	8.10295E+21	8.10160E+21	8.06660E+21	7.99226E+21	7.87399E+21
9	8.06364E+21	8.09997E+21	8.09972E+21	8.06420E+21	7.98848E+21	7.86994E+21
8	8.03819E+21	8.07502E+21	8.07359E+21	8.03866E+21	7.96407E+21	7.84506E+21
7	7.97017E+21	8.00710E+21	8.00603E+21	7.97172E+21	7.89853E+21	7.78034E+21
6	7.82823E+21	7.86620E+21	7.86615E+21	7.83265E+21	7.76327E+21	7.64804E+21
5	7.56351E+21	7.60308E+21	7.60572E+21	7.57578E+21	7.50866E+21	7.40053E+21
4	7.10784E+21	7.14869E+21	7.15308E+21	7.12846E+21	7.06909E+21	6.96977E+21
3	6.35742E+21	6.39773E+21	6.40538E+21	6.38848E+21	6.34073E+21	6.25609E+21
2	5.16972E+21	5.20715E+21	5.21983E+21	5.21154E+21	5.17695E+21	5.11224E+21
1	3.54973E+21	3.57909E+21	3.59093E+21	3.58898E+21	3.56952E+21	3.52842E+21

Тэфф=200

25	3.42846E+21	3.44323E+21	3.44273E+21	3.43052E+21	3.40305E+21	3.35846E+21
24	4.66891E+21	4.68645E+21	4.68330E+21	4.66230E+21	4.62337E+21	4.55933E+21
23	5.74186E+21	5.75954E+21	5.75123E+21	5.72217E+21	5.67014E+21	5.58812E+21
22	6.49210E+21	6.50701E+21	6.49480E+21	6.45942E+21	6.39502E+21	6.29976E+21
21	7.02543E+21	7.04036E+21	7.02455E+21	6.98356E+21	6.91122E+21	6.80570E+21
20	7.43531E+21	7.45206E+21	7.43477E+21	7.38977E+21	7.31383E+21	7.20176E+21
19	7.81186E+21	7.83160E+21	7.81754E+21	7.77327E+21	7.69648E+21	7.58381E+21
18	8.14829E+21	8.17712E+21	8.16887E+21	8.12960E+21	8.05528E+21	7.93941E+21
17	8.41348E+21	8.44830E+21	8.44479E+21	8.41005E+21	8.33876E+21	8.22491E+21
16	8.59343E+21	8.63111E+21	8.63043E+21	8.59566E+21	8.52430E+21	8.40832E+21
15	8.70795E+21	8.74721E+21	8.74677E+21	8.71283E+21	8.63990E+21	8.52288E+21
14	8.77960E+21	8.81991E+21	8.81954E+21	8.78457E+21	8.71022E+21	8.59258E+21
13	8.82585E+21	8.86599E+21	8.86556E+21	8.82965E+21	8.75474E+21	8.63522E+21
12	8.85594E+21	8.89597E+21	8.89468E+21	8.85937E+21	8.78352E+21	8.66296E+21
11	8.87657E+21	8.91563E+21	8.91443E+21	8.87851E+21	8.80155E+21	8.68045E+21
10	8.88814E+21	8.92722E+21	8.92512E+21	8.88864E+21	8.81132E+21	8.68843E+21
9	8.88739E+21	8.92563E+21	8.92463E+21	8.88762E+21	8.80883E+21	8.68549E+21
8	8.86306E+21	8.90171E+21	8.89962E+21	8.86303E+21	8.78544E+21	8.66130E+21
7	8.79343E+21	8.83193E+21	8.83044E+21	8.79438E+21	8.71779E+21	8.59438E+21
6	8.64256E+21	8.68201E+21	8.68178E+21	8.64623E+21	8.57365E+21	8.45326E+21
5	8.35674E+21	8.39750E+21	8.40020E+21	8.36874E+21	8.29827E+21	8.18503E+21
4	7.86159E+21	7.90342E+21	7.90772E+21	7.88188E+21	7.81955E+21	7.71539E+21
3	7.04104E+21	7.08290E+21	7.09022E+21	7.07208E+21	7.02159E+21	6.93249E+21
2	5.73631E+21	5.77538E+21	5.78839E+21	5.77919E+21	5.74228E+21	5.67348E+21
1	3.94533E+21	3.97591E+21	3.98791E+21	3.98548E+21	3.96425E+21	3.91990E+21

Тэфф=306.73

25	3.87444E+21	3.89120E+21	3.89146E+21	3.87861E+21	3.84924E+21	3.80144E+21
24	5.26468E+21	5.28483E+21	5.28276E+21	5.26105E+21	5.21987E+21	5.15150E+21
23	6.45583E+21	6.47623E+21	6.46891E+21	6.43957E+21	6.38568E+21	6.29842E+21
22	7.27834E+21	7.29613E+21	7.28450E+21	7.24828E+21	7.18137E+21	7.08148E+21
21	7.85417E+21	7.87197E+21	7.85674E+21	7.81447E+21	7.73940E+21	7.62838E+21
20	8.28862E+21	8.30831E+21	8.29172E+21	8.24553E+21	8.16616E+21	8.04850E+21
19	8.67993E+21	8.70234E+21	8.68835E+21	8.64287E+21	8.56280E+21	8.44476E+21
18	9.02417E+21	9.05464E+21	9.04640E+21	9.00590E+21	8.92869E+21	8.80758E+21
17	9.29321E+21	9.32951E+21	9.32582E+21	9.29008E+21	9.21571E+21	9.09676E+21
16	9.47496E+21	9.51387E+21	9.51300E+21	9.47722E+21	9.40286E+21	9.28168E+21
15	9.58899E+21	9.62949E+21	9.62919E+21	9.59407E+21	9.51796E+21	9.39609E+21
14	9.65952E+21	9.70116E+21	9.70118E+21	9.66494E+21	9.58725E+21	9.46467E+21
13	9.70480E+21	9.74626E+21	9.74622E+21	9.70896E+21	9.63097E+21	9.50626E+21
12	9.73482E+21	9.77618E+21	9.77544E+21	9.73862E+21	9.65951E+21	9.53401E+21
11	9.75661E+21	9.79699E+21	9.79618E+21	9.75883E+21	9.67886E+21	9.55256E+21
10	9.77088E+21	9.81129E+21	9.80950E+21	9.77157E+21	9.69115E+21	9.56294E+21
9	9.77411E+21	9.81369E+21	9.81298E+21	9.77452E+21	9.69227E+21	9.56342E+21
8	9.75444E+21	9.79443E+21	9.79263E+21	9.75450E+21	9.67342E+21	9.54347E+21
7	9.68773E+21	9.72748E+21	9.72611E+21	9.68816E+21	9.60780E+21	9.47864E+21
6	9.53318E+21	9.57388E+21	9.57319E+21	9.53616E+21	9.45967E+21	9.33356E+21
5	9.23138E+21	9.27361E+21	9.27588E+21	9.24273E+21	9.16882E+21	9.04972E+21
4	8.70044E+21	8.74383E+21	8.74788E+21	8.72036E+21	8.65466E+21	8.54480E+21
3	7.80919E+21	7.85344E+21	7.86037E+21	7.84084E+21	7.78727E+21	7.69309E+21
2	6.37801E+21	6.41905E+21	6.43226E+21	6.42196E+21	6.38195E+21	6.30835E+21
1	4.39665E+21	4.42883E+21	4.44101E+21	4.43782E+21	4.41477E+21	4.36652E+21

Тэфф=325

25	3.95918E+21	3.97632E+21	3.97673E+21	3.96381E+21	3.93414E+21	3.88564E+21
24	5.37794E+21	5.39858E+21	5.39671E+21	5.37493E+21	5.33338E+21	5.26408E+21
23	6.59168E+21	6.61258E+21	6.60546E+21	6.57606E+21	6.52162E+21	6.43346E+21
22	7.42807E+21	7.44638E+21	7.43489E+21	7.39853E+21	7.33091E+21	7.23014E+21
21	8.01169E+21	8.03001E+21	8.01489E+21	7.97219E+21	7.89660E+21	7.78459E+21
20	8.44982E+21	8.47001E+21	8.45347E+21	8.40680E+21	8.32687E+21	8.20796E+21
19	8.84169E+21	8.86446E+21	8.85045E+21	8.80474E+21	8.72409E+21	8.60482E+21
18	9.18495E+21	9.21570E+21	9.20745E+21	9.16673E+21	9.08899E+21	8.96694E+21
17	9.45131E+21	9.48811E+21	9.48439E+21	9.44815E+21	9.37322E+21	9.25338E+21
16	9.63007E+21	9.66974E+21	9.66881E+21	9.63276E+21	9.55760E+21	9.43553E+21
15	9.74150E+21	9.78248E+21	9.78239E+21	9.74701E+21	9.67035E+21	9.54737E+21
14	9.80946E+21	9.85159E+21	9.85181E+21	9.81530E+21	9.73706E+21	9.61364E+21
13	9.85240E+21	9.89489E+21	9.89504E+21	9.85750E+21	9.77899E+21	9.65316E+21
12	9.88083E+21	9.92321E+21	9.92266E+21	9.88556E+21	9.80591E+21	9.67933E+21
11	9.90179E+21	9.94293E+21	9.94205E+21	9.90467E+21	9.82391E+21	9.69678E+21
10	9.91552E+21	9.95642E+21	9.95480E+21	9.91659E+21	9.83562E+21	9.70658E+21
9	9.91869E+21	9.95875E+21	9.95823E+21	9.91948E+21	9.83666E+21	9.70694E+21
8	9.89932E+21	9.93980E+21	9.93818E+21	9.89974E+21	9.81810E+21	9.68723E+21
7	9.83262E+21	9.87311E+21	9.87192E+21	9.83364E+21	9.75266E+21	9.62258E+21
6	9.67757E+21	9.71900E+21	9.71847E+21	9.68112E+21	9.60402E+21	9.47698E+21
5	9.37353E+21	9.41649E+21	9.41894E+21	9.38550E+21	9.31100E+21	9.19072E+21
4	8.83739E+21	8.88147E+21	8.88573E+21	8.85793E+21	8.79169E+21	8.68067E+21
3	7.93524E+21	7.97979E+21	7.98710E+21	7.96758E+21	7.91328E+21	7.81826E+21
2	6.48398E+21	6.52534E+21	6.53875E+21	6.52828E+21	6.48781E+21	6.41344E+21
1	4.47152E+21	4.50395E+21	4.51616E+21	4.51286E+21	4.48949E+21	4.44075E+21

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель проекта
_____А.В.Смирнов
"____"_____2003 г.

Неразрушающие послереакторные исследования твэлов ТВС ВВЭР-440 №13626135, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU

Промежуточный отчет по задаче №4
проекта VVER Burnup Credit (2670р)

Димитровград, 2003 г.

Исполнители отчета

А.В.Сухих

В.Г.Дворецкий

Г.Д.Лядов

Б.А.Канашов

В.С.Поленок

Д.В.Марков

Н.А.Мытарева

О.М.Михайлова

Реферат

Отчет содержит 25 страниц, 19 рисунков, 6 таблиц, 10 библиографических ссылок.

Ключевые слова: проект VVER Burnup Credit, отработавшие ТВС ВВЭР-440, неразрушающий контроль состояния твэлов.

Изложены основные результаты неразрушающих исследований четырех твэлов ТВС ВВЭР-440 №13626135. Проведено сравнение их состояния с параметрами остальных твэлов сборки. Сделана оценка корректности отбора этих твэлов для разрушающих исследований изотопного состава отработавшего топлива.

Содержание

Введение 5

1. Картограмма расположения твэлов по сечению ТВС 6

2. Результаты неразрушающих исследований твэлов 7

2.1. Визуальный осмотр 7

2.2. Измерение длины 7

2.3. Наружный диаметр оболочек 12

2.4. Вихретоковой контроль 12

2.5. Гамма-спектрометрия 17

2.6. Количество и состав газа под оболочкой 22

2.7. Зазор топливо-оболочка 24

2.8. Рентгеновская радиография 24

Заключение 25

Список источников: 25

Введение

Разработка методики отбора ТВС ВВЭР-440 и твэлов для определения выгорания и нуклидного состава топлива явилась основным итогом выполнения задачи 1 проекта VVER Burnup Credit [1].

С использованием ее основных положений в результате анализа технологических [2] и эксплуатационных [3] характеристик была отобрана ТВС №13626135 и рекомендованы четыре радиальных твэла для проведения разрушающих и неразрушающих исследований. Выбранная рабочая кассета с исходным обогащением 3.6% по ^{235}U отработала на Ново-Воронежской АЭС четыре топливных цикла до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU.

Целью настоящего отчета является изложение результатов неразрушающего контроля состояния четырех твэлов №№65, 67, 68, 69, сравнение их параметров с характеристиками остальных твэлов сборки для оценки корректности сделанного выбора и уточнения места вырезки образцов для количественного анализа изотопного состава топлива.

1. Картограмма расположения твэлов по сечению ТВС

Рис. 1. иллюстрирует местоположение твэлов с условными номерами 1-126 в ТВС №13626135. Серыми кружками отмечены твэлы №№65, 67, 68, 69, отобранные с целью определения нуклидного состава, массы изотопов, глубины выгорания топлива методами радиохимии и масс-спектрального анализа.

Картограмма расположения твэлов в ТВС

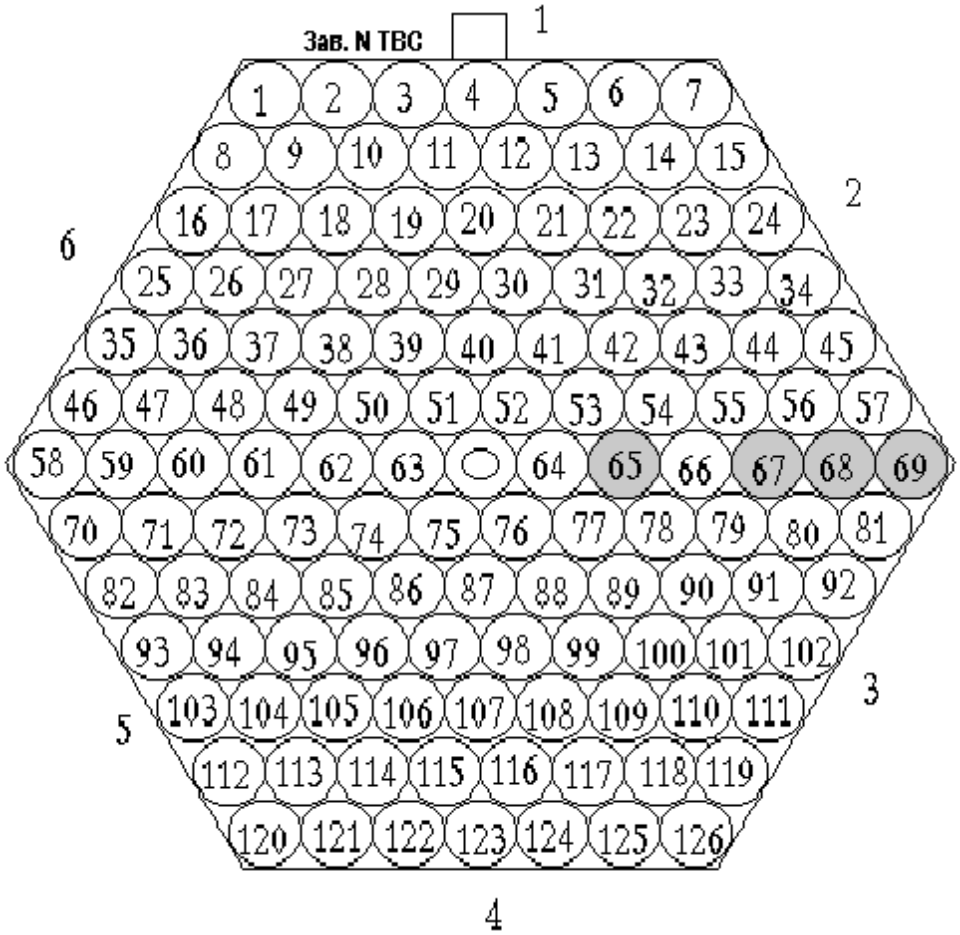


Рис. 1

2. Результаты неразрушающих исследований твэлов

2.1. Визуальный осмотр

Визуальный осмотр проводился через смотровую систему защитной камеры и внутрикамерный перископ с увеличением х 0.8-5 по методике, изложенной в работе [4].

Визуальный осмотр показал удовлетворительное состояние твэлов (рис.2). Оболочки твэлов имели преимущественно темный цвет. Между 6-ой и 10-ой ДР со стороны 2-ой, 3-ей и 4-ой граней ТВС на оболочках были обнаружены контрастные белесые разводы (рис.3).

Твэлы после подрезки нижних хвостовиков были извлечены из пучка. Среднее усилие извлечения твэлов из ДР равнялось 10 кг. Во внутренних рядах пучка на поверхности твэлов в районе 7-10-ой ДР также наблюдались белесые разводы со стороны граней 3 и 4. На твэлах, расположенных в центре пучка, яркость контурных разводов была менее интенсивной.

При осмотре твэлов ТВС №13626135 обнаружены следы взаимодействия оболочек с пуклевками ДР. В большинстве случаев повреждения оболочек твэлов под ДР были не велики и носили косметический характер (рис. 4).

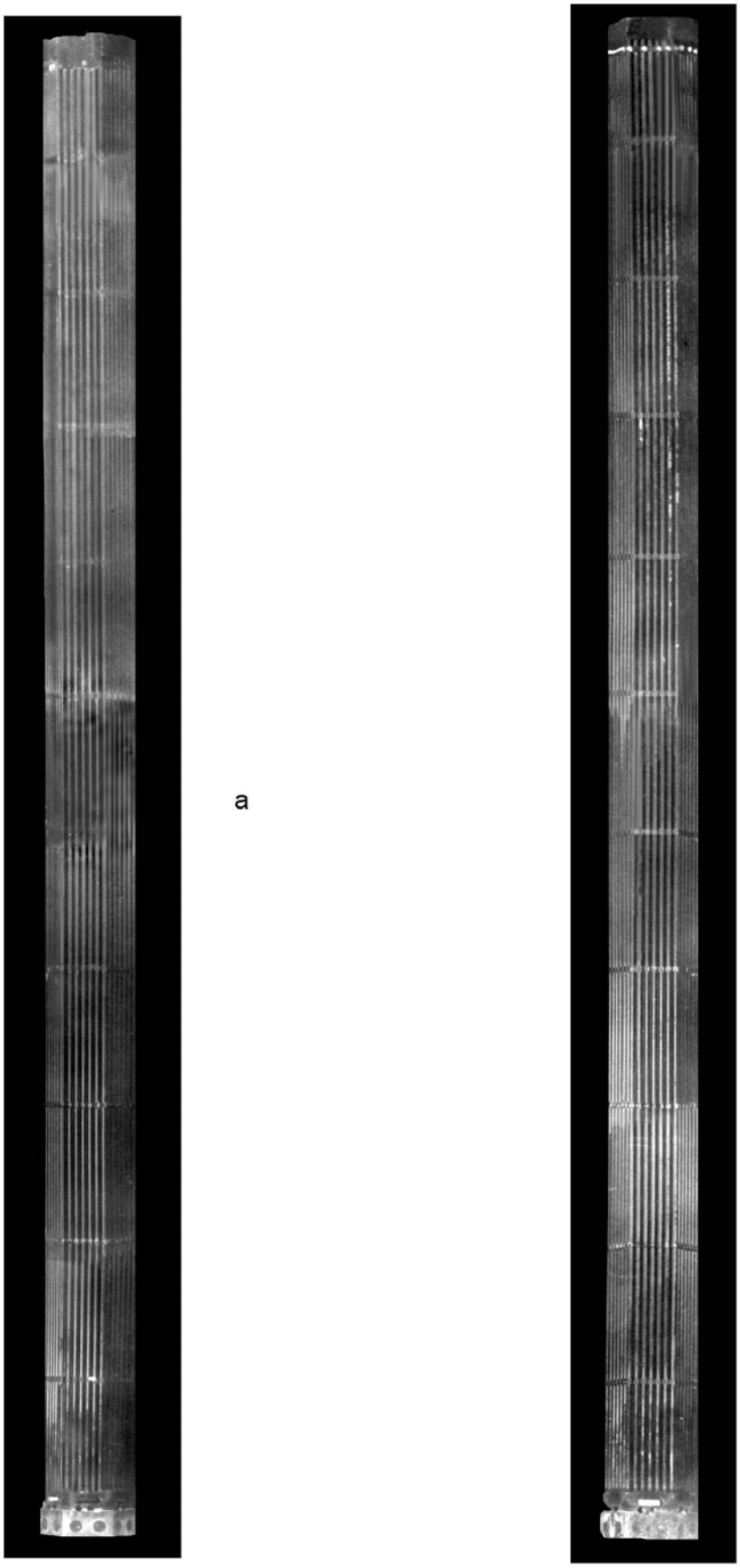
Рис. 5. иллюстрирует внешний вид поверхности четырех твэлов №№ 65, 67, 68, 69. В нижней части твэлов (0–850 мм) поверхность оболочек имеет темно-серый цвет с хорошей отражающей способностью. В середине активной зоны (850–1800 мм) поверхность становится матовой, а цвет изменяется от светло-серого до темно-серого. Выше 1800 мм наблюдаются белесые пятна и оксидные контуры. В зоне газосборников цвет поверхности оболочек твэлов переходит в серо-белый с многочисленными оксидными контурами и белесоватыми пятнами. Следы взаимодействия оболочек четырех твэлов с ДР представляли собой вытянутые в продольном направлении серо-белые пятна шириной 1–2 и длиной ~10 мм. Аномалий верхних и нижних сварных соединений твэлов (трещин, механических повреждений, повышенного окисления) при визуальном осмотре не обнаружено.

Таким образом, состояние поверхности твэлов №№ 65, 67, 68, 69 типично для ТВС №13626135 и аналогично состоянию твэлов ранее исследованных ТВС ВВЭР-440 с близкими значениями выгорания топлива.

2.2. Измерение длины

Удлинение твэлов определялось по методике, изложенной в работе [5]. Погрешность измерения не превышала ±0.5 мм. На рис. 6 и 7 приведены данные по удлинению всех твэлов сборки. Среднее удлинение твэлов ТВС №13626135 составляло 6.06 мм ($\Delta L/L$ = 0.24%). Минимальное удлинение равнялось 4.05 мм (0.16%), максимальное - 7.64 мм (0.30%).

Внешний вид пучка твэлов ТВС №13626135
со стороны граней 6-1-2 (а) и 3-4-5 (б)



а б

Рис.2

Контурные разводы на поверхности твэлов со стороны 4 грани в районе 8-ой ДР

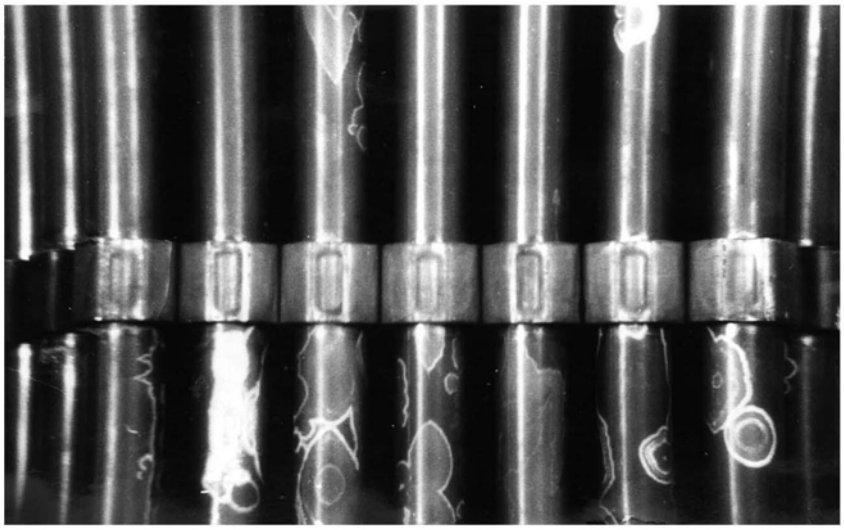
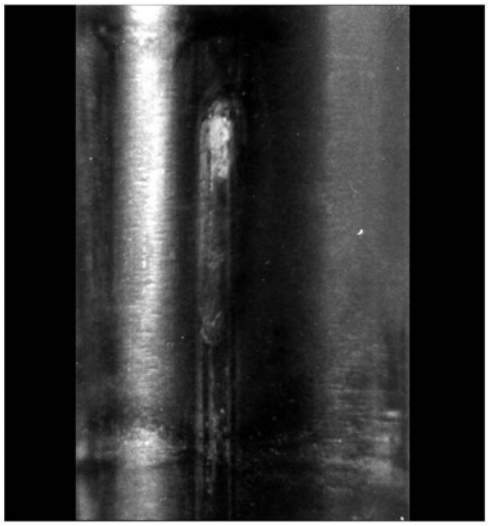


Рис.3

Следы взаимодействия оболочки твэла с ДР



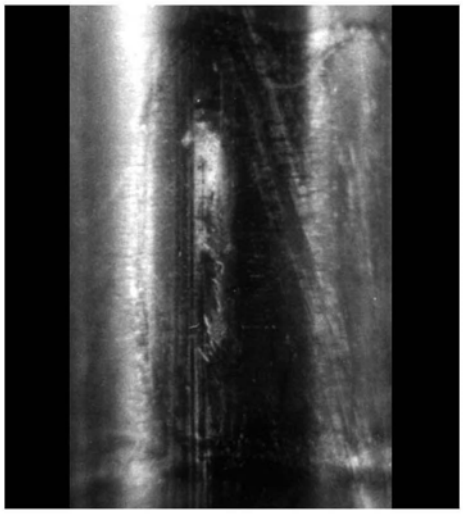


Рис.4

Внешний вид твэлов №№ 65, 67, 68, 69 ТВС №13626135

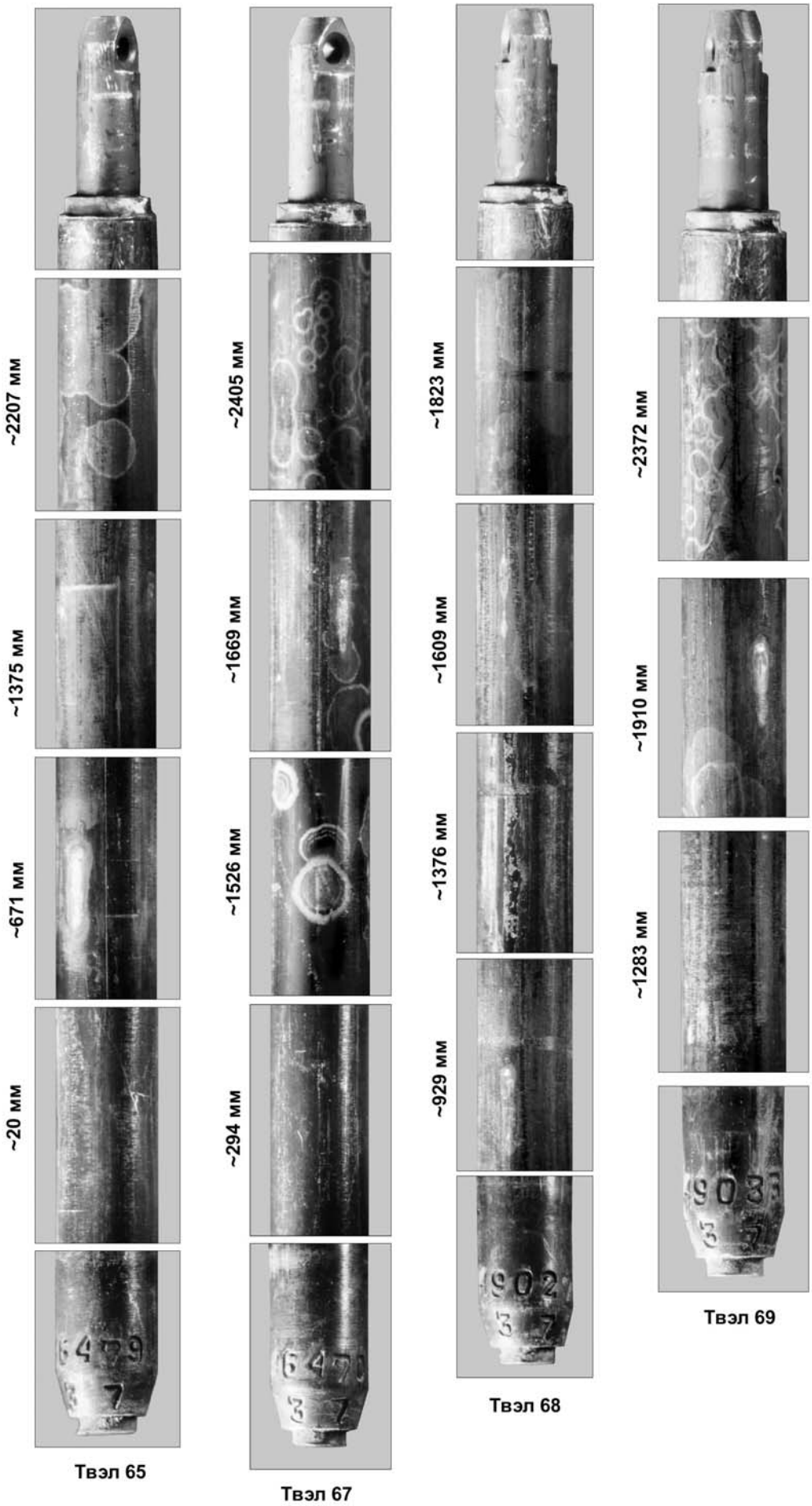


Рис. 5

Картограмма удлинений твэлов ТВС №13626135

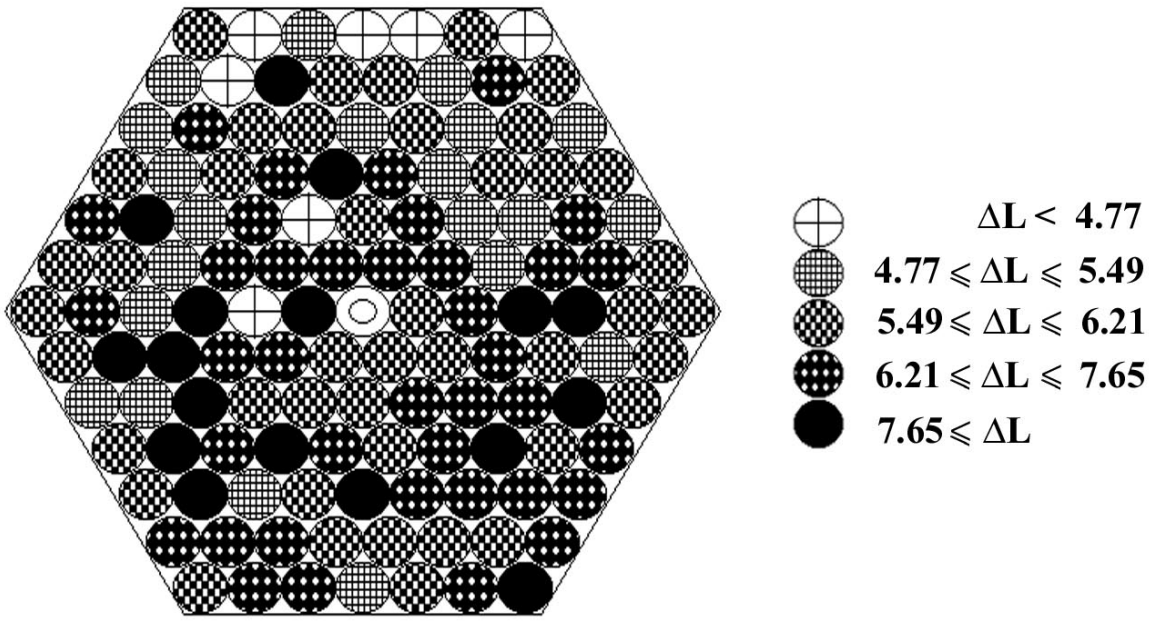


Рис.6

Гистограмма удлинений твэлов ТВС №13626135

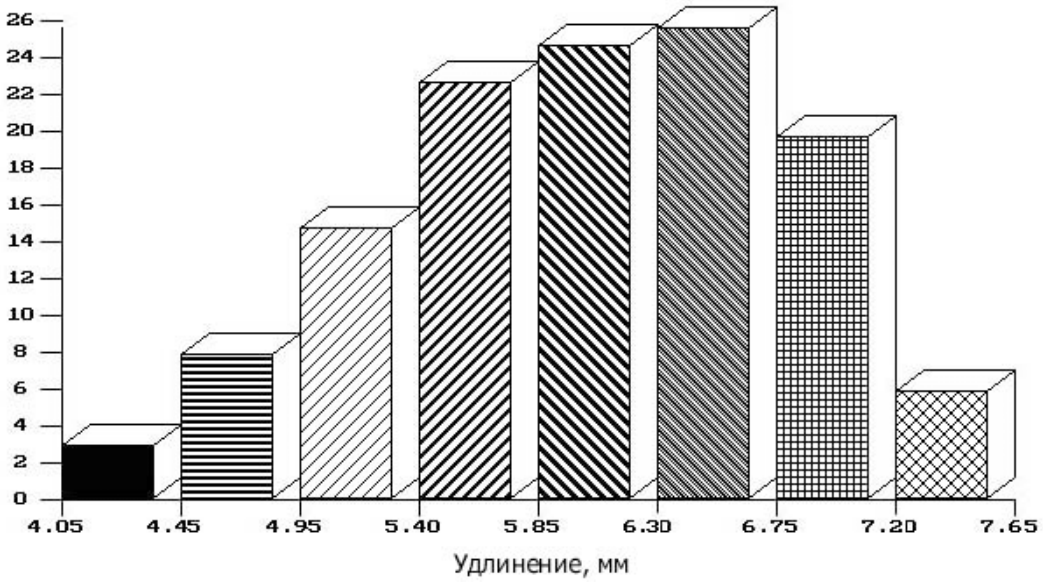


Рис. 7

В таблице 1 представлены данные по удлинениям твэлов №№ 65, 67, 68, 69.

Таблица 1

Удлинение четырех твэлов ТВС №13626135

N твэла	Абс.длина, мм	Удлинение, мм	Отн. удлинение, %
65	2549.80	6.30	0.25
67	2551.14	7.64	0.30
68	2549.48	5.98	0.24
69	2549.66	6.16	0.24

Из анализа представленных данных следует, что удлинение отобранных твэлов (5.98-7.64 мм) не выходит за пределы увеличения длины оболочечных труб твэлов ТВС №13626135 (4.05-7.64 мм).

2.3. Наружный диаметр оболочек

Для измерения наружного диаметра твэлов использовался контактный профилометр с преобразователем типа "магнитная линейка" [6]. Измерения проводились в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с шагом 2 мм. Погрешность измерения диаметра не превышала ±0.02 мм. Изменение диаметра рассчитывалось как разность между средними значениями диаметров в районе газосборника (48-70 мм от верха твэла) и на участке активной зоны (800-2000 мм).

Изменения диаметра определялись в 40 твэлах сборки. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Рис. 8. иллюстрирует характер распределения диаметра по длине твэлов №№ 65, 67, 68, 69. Из анализа представленных данных следует, что изменение диаметра четырех отобранных твэлов (0.03-0.04 мм) лежит в интервале величин максимальной усадки оболочек твэлов ТВС №13626135 (0.03-0.06 мм).

2.4. Вихретоковой контроль

Диагностика состояния оболочек твэлов осуществлялась на импульсном и гармоническом вихретоковых дефектоскопах по методикам, изложенным в работе [7].

Измерения на импульсном дефектоскопе проводились в непрерывном режиме во время извлечения твэлов из пучка путем пропускания через переносной ВТ-преобразователь. По данным 100%-ного первичного вихретокового контроля осуществлялся отбор твэлов для проведения прецизионных исследований оболочек на гармоническом дефектоскопе. Исследования отобранных твэлов проводились в старт-стопном режиме с шагом 2 мм.

ВТ-дефектоскопия твэлов показала отсутствие значимых дефектов на оболочке. Незначительные по амплитуде ВТ-сигналы наблюдались на участках совпадающих с координатами ДР. Амплитудно-фазовый анализ показал, что основные отличия ВТ-диаграмм твэлов №№ 65, 67, 68, 69 (рис. 9-12) а также остальных твэлов ТВС №13626135 связаны с технологической наследственностью – характером изменения внешнего диаметра (или толщины) оболочечных труб заводского происхождения.

Таблица 2

Диаметры оболочек твэлов ТВС №13626135

N твэла	Средний диаметр на участке газосборника, мм	Средний диаметр на участке АЗ, мм	Разность диаметров на участке АЗ и газосборника, мм
001	9.10	9.06	-0.04
004	9.11	9.07	-0.04
007	9.11	9.06	-0.05
009	9.11	9.07	-0.04
014	9.11	9.06	-0.05
018	9.10	9.05	-0.04
022	9.11	9.07	-0.03
026	9.10	9.06	-0.05
028	9.09	9.05	-0.04
031	9.11	9.06	-0.04
039	9.10	9.07	-0.03
041	9.11	9.07	-0.04
051	9.11	9.07	-0.05
052	9.09	9.06	-0.04
058	9.12	9.07	-0.05
059	9.09	9.05	-0.04
060	9.10	9.06	-0.04
061	9.09	9.04	-0.05
062	9.11	9.07	-0.04
063	9.10	9.05	-0.06
064	9.11	9.07	-0.04
065	**9.10**	**9.07**	**-0.04**
066	9.11	9.06	-0.04
067	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
068	**9.10**	**9.06**	**-0.04**
069	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
075	9.10	9.07	-0.03
076	9.11	9.06	-0.05
086	9.10	9.07	-0.04
088	9.13	9.08	-0.05
090	9.09	9.05	-0.04
096	9.09	9.04	-0.05
099	9.10	9.05	-0.05
105	9.09	9.05	-0.04
109	9.09	9.03	-0.05
112	9.12	9.08	-0.04
113	9.10	9.07	-0.03
118	9.10	9.06	-0.04
120	9.12	9.07	-0.05
126	9.13	9.07	-0.06
Минимум	9.09	9.03	-0.06
Максимум	9.13	9.08	-0.03
Среднее	9.10	9.06	-0.04
СКО	0.011	0.011	0.006

Распределение величины диаметра по длине четырех твэлов

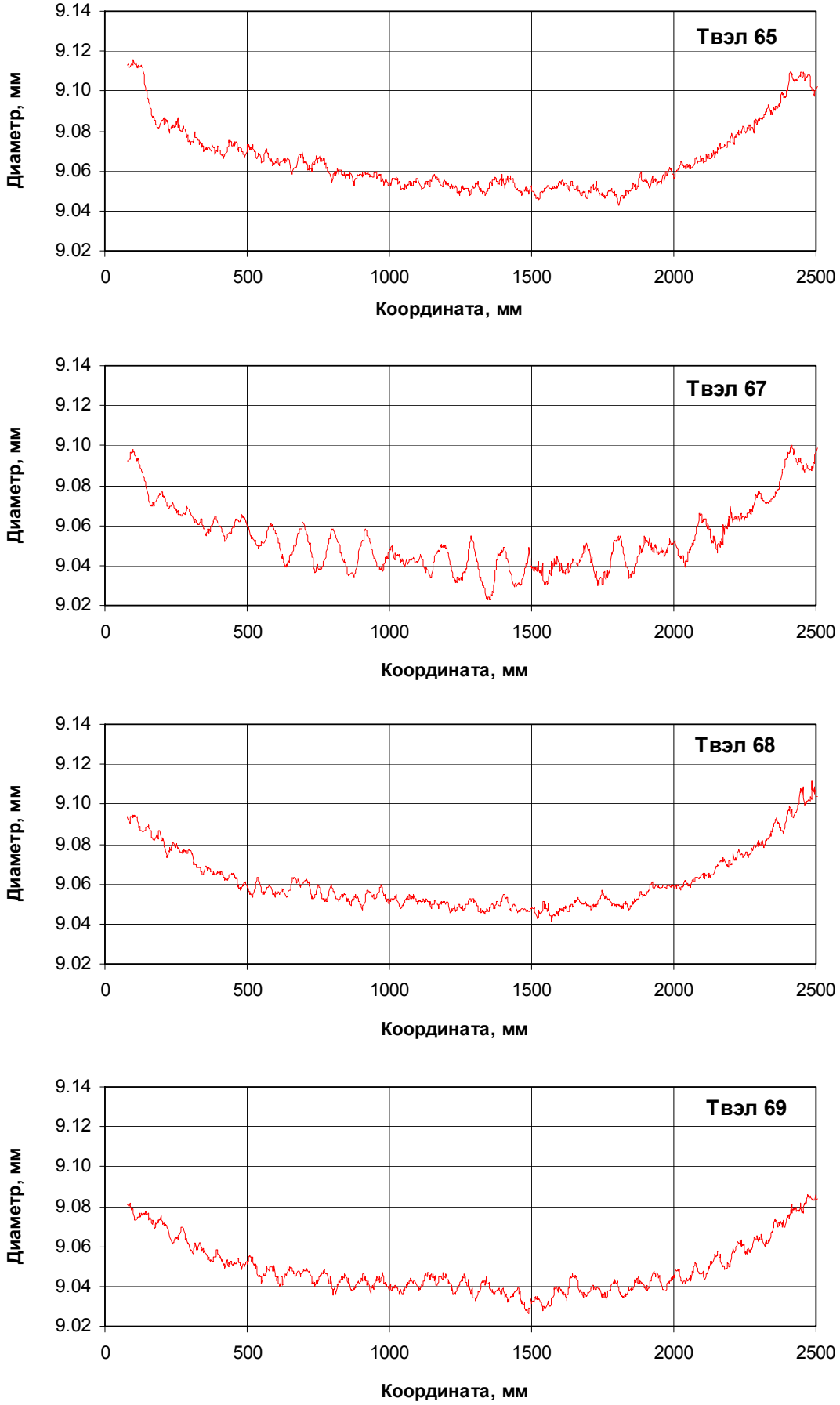


Рис. 8

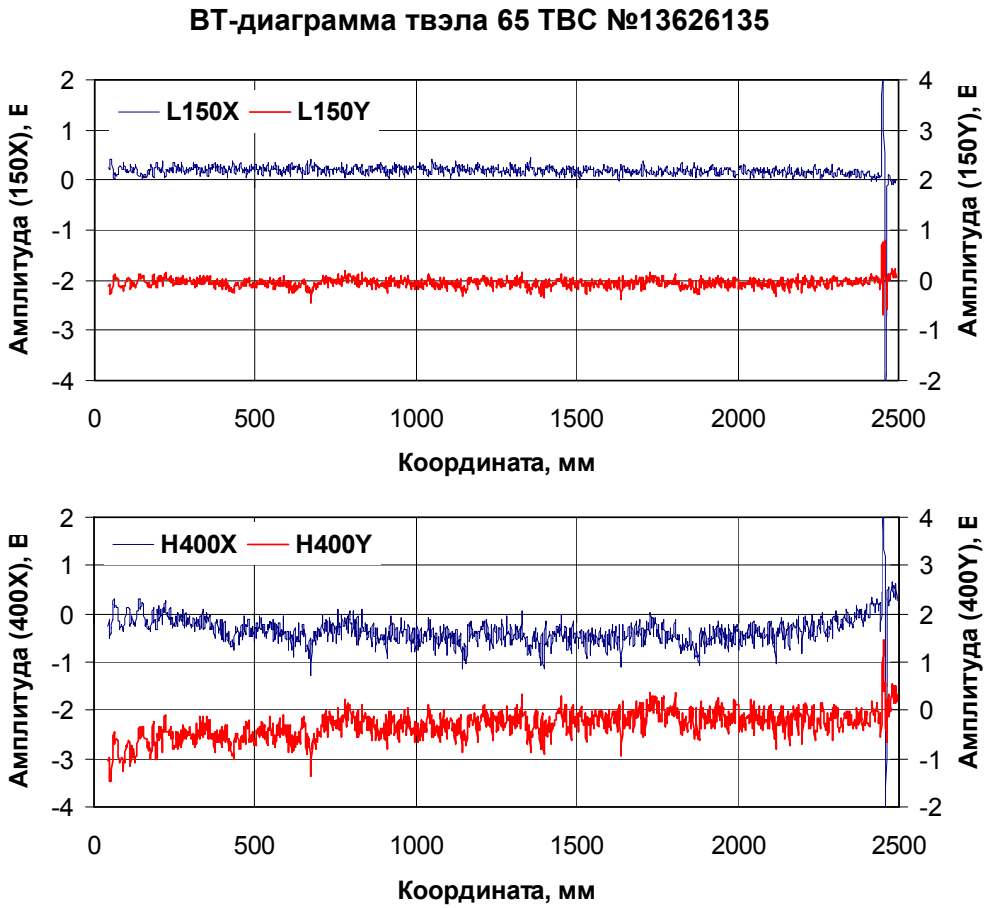

ВТ-диаграмма твэла 65 ТВС №13626135
L150X
L150Y
Амплитуда (150X), Е
Амплитуда (150Y), Е
Координата, мм
H400X
H400Y
Амплитуда (400X), Е
Амплитуда (400Y), Е
Координата, мм

Рис. 9

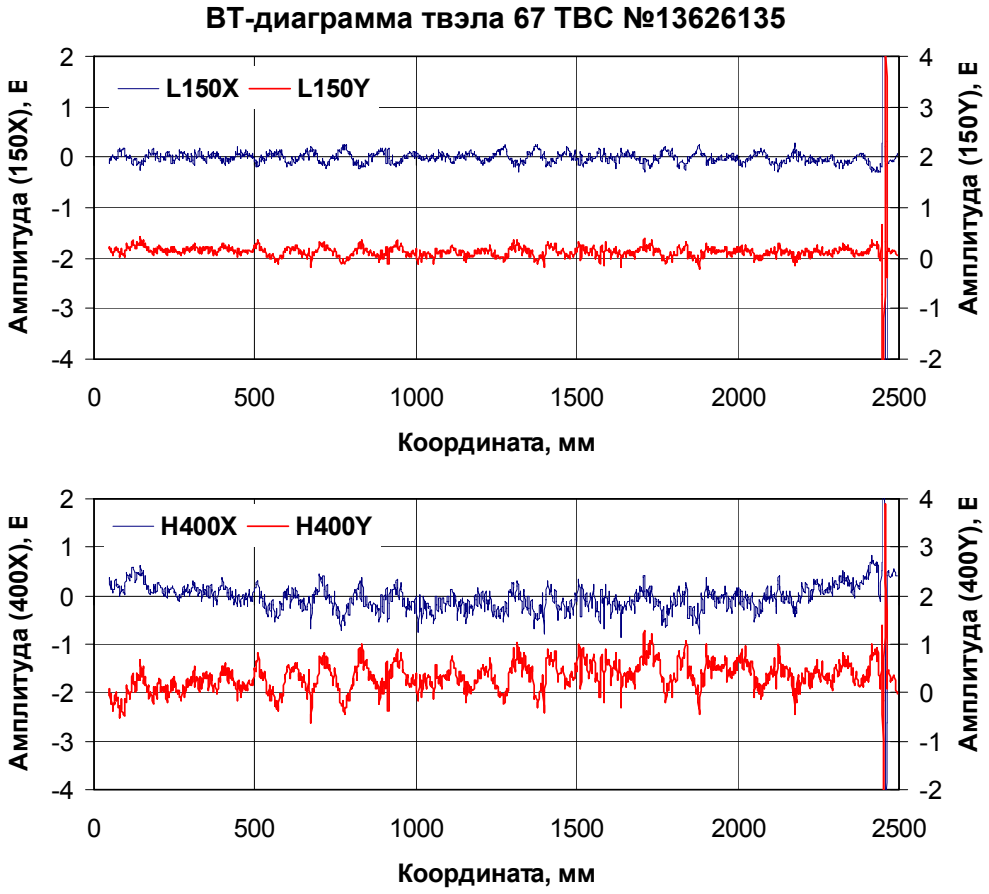

ВТ-диаграмма твэла 67 ТВС №13626135
L150X
L150Y
Амплитуда (150X), Е
Амплитуда (150Y), Е
Координата, мм
H400X
H400Y
Амплитуда (400X), Е
Амплитуда (400Y), Е
Координата, мм

Рис. 10

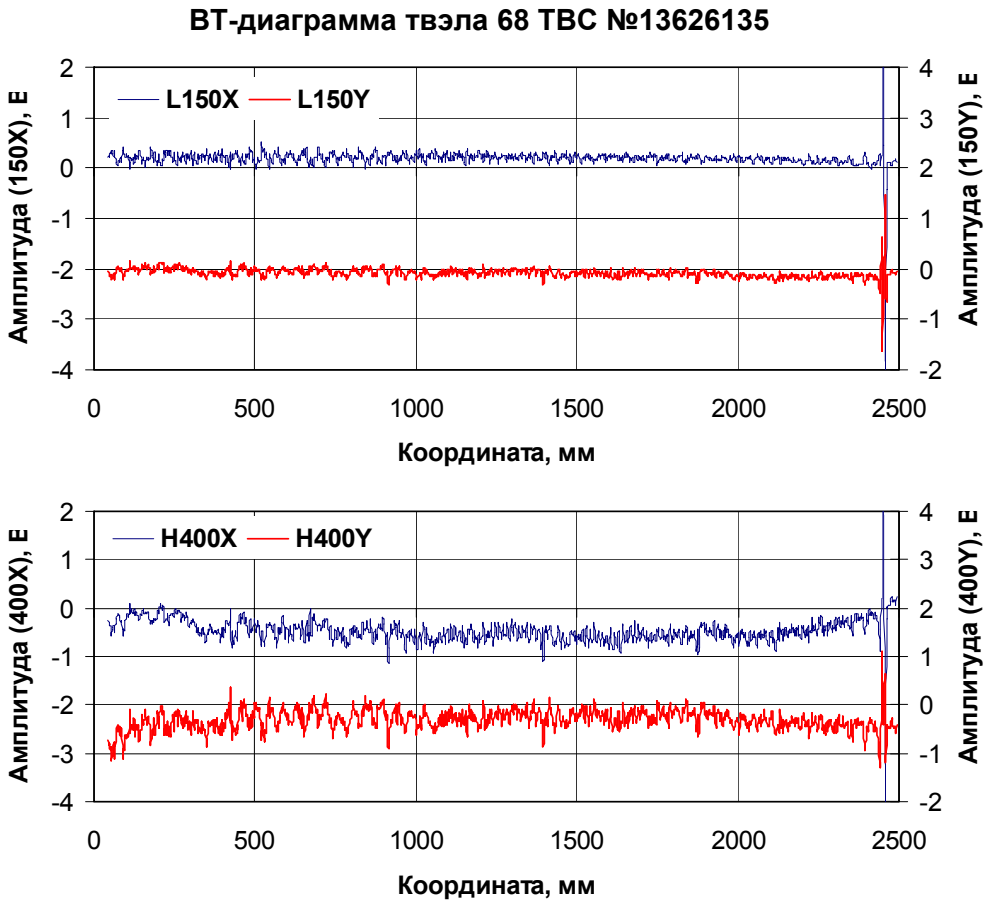

ВТ-диаграмма твэла 68 ТВС №13626135
L150X
L150Y
Амплитуда (150X), Е
Амплитуда (150Y), Е
Координата, мм
H400X
H400Y
Амплитуда (400X), Е
Амплитуда (400Y), Е
Координата, мм

Рис. 11

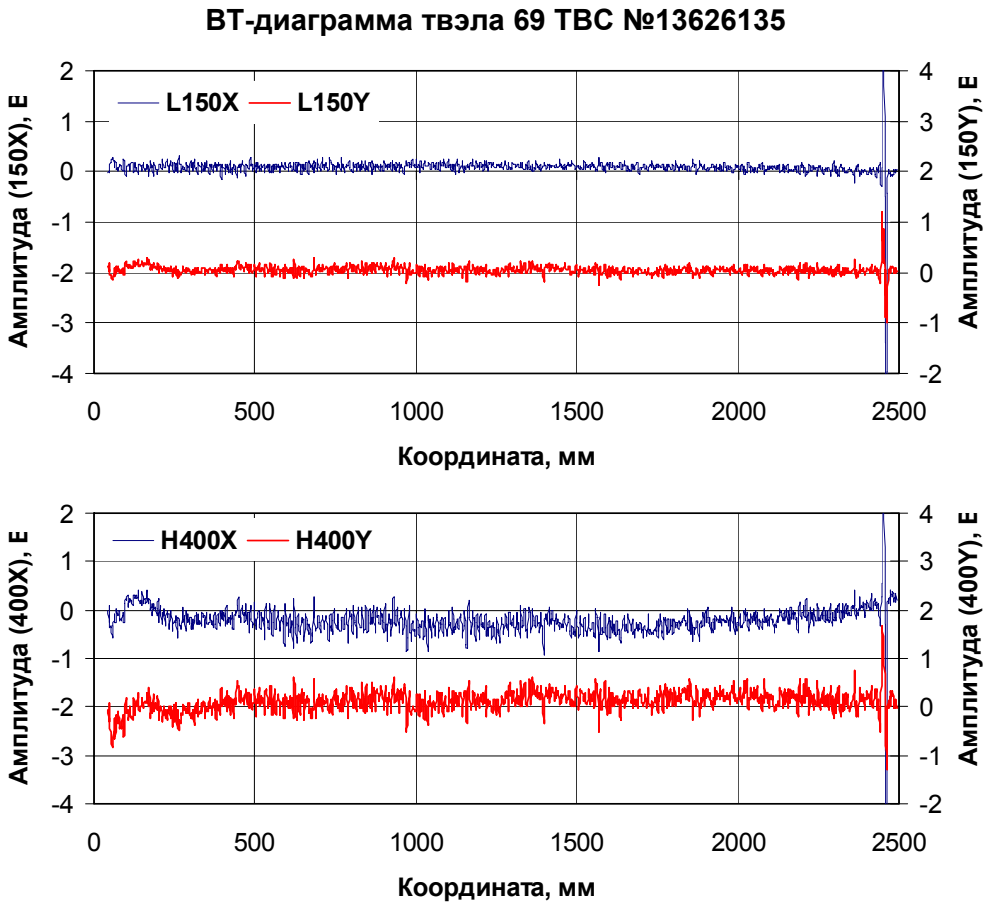

ВТ-диаграмма твэла 69 ТВС №13626135
L150X
L150Y
Амплитуда (150X), Е
Амплитуда (150Y), Е
Координата, мм
H400X
H400Y
Амплитуда (400X), Е
Амплитуда (400Y), Е
Координата, мм

Рис. 12

2.5. Гамма-спектрометрия

Гамма-спектрометрические исследования твэлов проводились на полупроводниковом Ge(Li) спектрометре. Обработка гамма-спектров, накопление массивов данных и выдача результатов осуществлялась на ЭВМ в автоматическом режиме. Сканирование проводилось дискретно с шагом 10 мм. Высота щелевого коллиматора составляла 3.0 мм. Перед началом и после окончания измерений проводилась калибровка гамма-спектрометра с помощью эталона выгорания. В качестве эталонного образца использовался фрагмент штатного твэла ВВЭР-1000, выгорание топлива, в котором было определено масс-спектрометрическим методом. Гамма-сканирование проводилось в 36-ти диагональных твэлах ТВС. Измерение скорости счета импульсов гамма излучения Kr-85 в газосборниках твэлов осуществлялось через коллиматор в защитной стенке транспортного контейнера, в котором размещался исследуемый твэл.

В таблице 3 представлены экспериментальные значения коэффициента аксиальной неравномерности (Kz) накопления долгоживущего продукта деления ^{137}Cs, а также максимальное и среднее выгорание топлива в твэлах сборки.

На рис. 13 приведены распределения максимального выгорания в диагональных твэлах ТВС. Радиальный коэффициент неравномерности выгорания в сборке (K_r) равен 1.15. Максимальное выгорание топлива, достигнутое ТВС №13626135 составляет 49.3 МВт·сут/кгU. Среднее выгорание (с учетом неравномерности выгорания по высоте и сечению сборки) составляет 38.1 МВт·сут/кгU, что практически совпадает с паспортной величиной, равной 38.5 МВт·сут/кгU.

Из представленных данных следует, что в твэле №69 максимальное выгорание топлива для данной ТВС, в твэле №65 – минимальное, а твэлы №67 и №68 имеют промежуточные значения выгорания.

В таблице 4 представлены результаты измерения скорости счета гамма-квантов ^{85}Kr в газосборниках радиальных твэлов сборки, а в таблице 5 приведены данные о скоростях счета излучения продуктов деления и активации оболочки в свободных объемах твэлов №№ 65, 67, 68, 69.

Из анализа представленных результатов следует, что наибольшее газовыделение наблюдается в твэлах внешнего ряда ТВС ВВЭР-440 с максимальным выгоранием (№1 и №69).

Рис. 14-17 иллюстрируют профиль накопления продуктов деления по длине четырех твэлов, отобранных для исследований.

Анализ полученных результатов показал отсутствие заметной миграции продуктов деления по длине топливного сердечника твэлов. Количество изотопов цезия в районе газосборника незначительно и составляет около 1% от его содержания в топливе.

Таблица 3

Максимальное и среднее выгорание топлива и коэффициенты (K_z) неравномерности распределения продуктов деления по длине твэлов ТВС 135

N твэла	Максимальное выгорание, МВт·сут/кгU	Kz (^{137}Cs)	Среднее выгорание, МВт·сут/кгU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	**42.3**	**1.16**	**36.4**
66	42.5	1.16	36.5
67	**43.8**	**1.16**	**37.6**
68	**45.7**	**1.16**	**39.3**
69	**49.3**	**1.17**	**42.2**
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Минимальное	42.2	1.15	36.1
Максимальное	49.3	1.17	42.8
Среднее	44.3	1.16	38.1
СКО	2.18	0.005	1.97

Распределение среднего выгорания в твэлах по диагональным направлениям ТВС №13626135

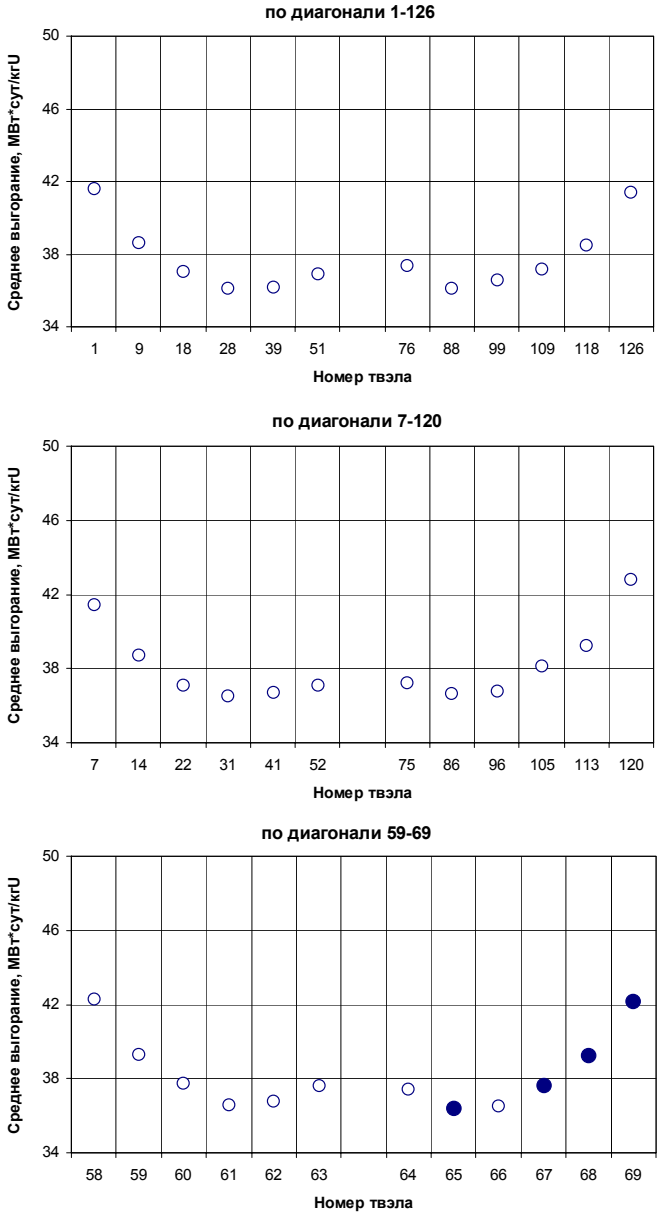


Рис. 13

Таблица 4

Скорости счета гамма-излучения ^{85}Kr в газосборниках твэлов ТВС N 135

№ твэла	1	9	18	28	39	51
Скорость счета, имп/с	85.8	30.3	22.7	18.0	18.0	19.2

Таблица 5

Скорость счета гамма-излучения продуктов деления и продуктов активации оболочки в газосборниках твэлов ТВС №13626135, имп/с

№ твэла	^{85}Kr Eγ=513 кэВ	^{134}Cs Eγ=604 кэВ	^{137}Cs Eγ=661 кэВ	^{94}Nb Eγ=871 кэВ
65	17.4	6.0	64.1	16.1
67	14.8	4.4	36.2	14.6
68	14.3	5.4	60.7	12.7
69	65.9	5.4	49.6	12.6

Распределение продуктов деления по длине твэла 65 ТВС 13626135

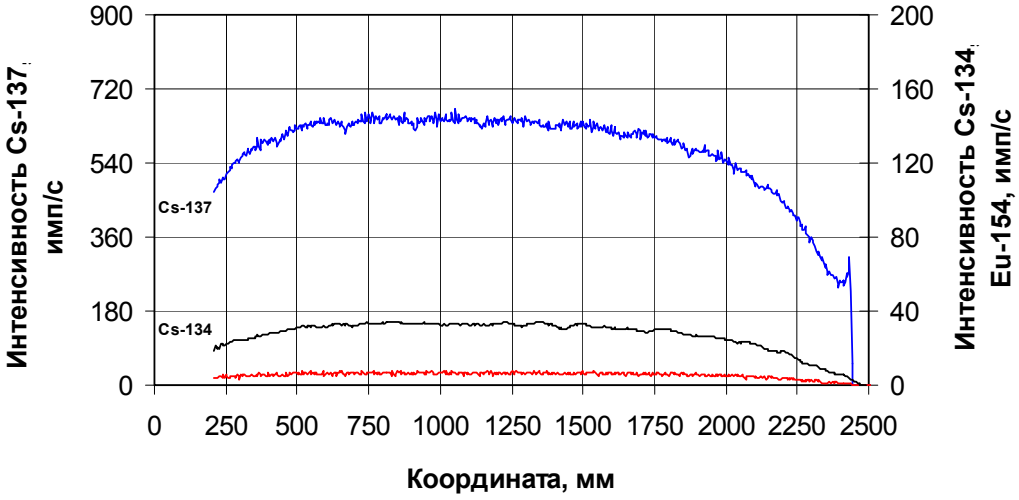


Рис. 14

Распределение продуктов деления по длине твэла 67 ТВС 13626135

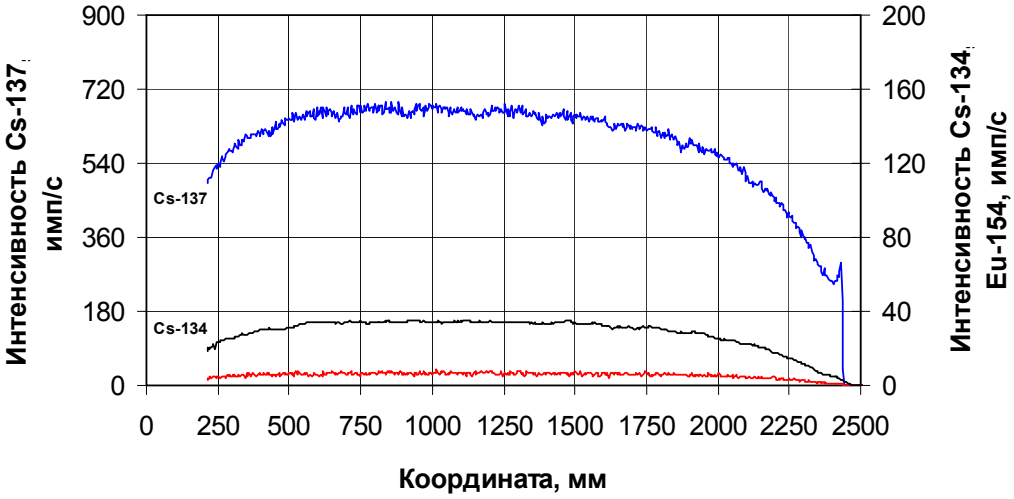


Рис. 15

Распределение продуктов деления по длине твэла 68 ТВС 13626135

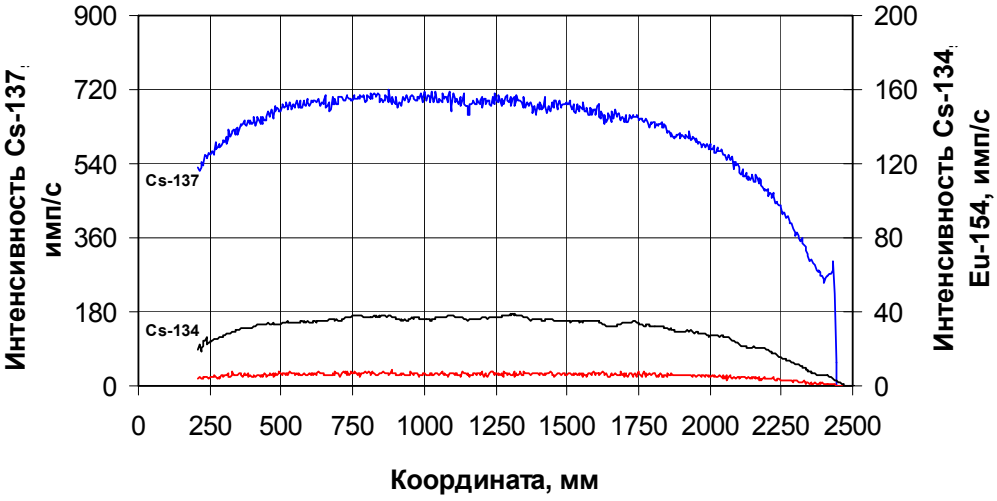


Рис. 16

Распределение продуктов деления по длине твэла 69 ТВС 13626135

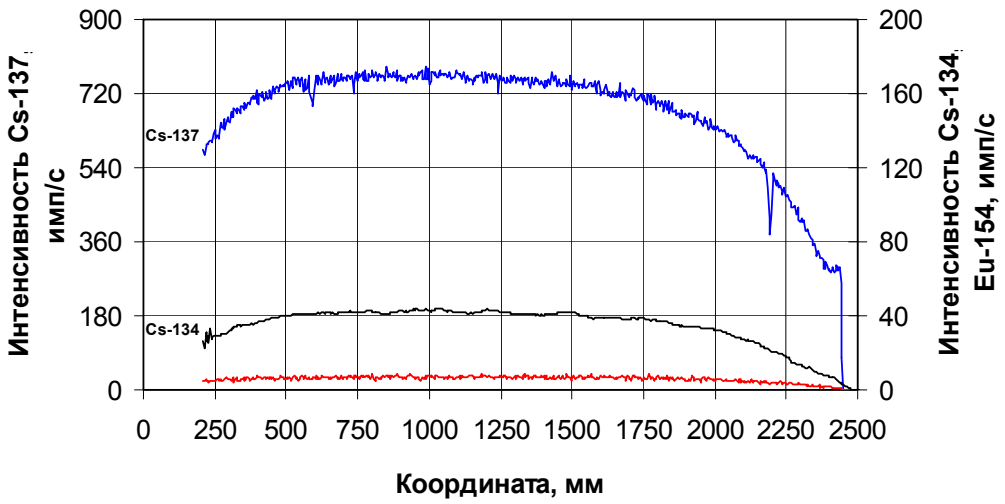


Рис. 17

Анализ полученных результатов показал отсутствие заметной миграции продуктов деления по длине топливного сердечника твэлов. Количество изотопов цезия в районе газосборника незначительно и составляет около 1% от его содержания в топливе.

2.6. Количество и состав газа под оболочкой

Параметры газов под оболочкой твэлов измерялись на установке лазерного прокола. Давление газов рассчитывалось по формуле [8]:

$$P_г = P_c\left[\frac{V_c}{V_г} + 1\right], \text{ где}$$

$P_г$ - давление газов под оболочкой твэлов, МПа;

P_c - давление, установившееся в измерительной системе после прокола оболочки твэла, МПа;

V_c - известный объем измерительной системы, см^3,

$V_г$ - свободный объем твэла, см^3.

Свободный объем твэла определялся путем измерения снижения давления в калибровочной камере при присоединении к ней предварительного вакуумированного твэла. Для расчета $V_г$ использовались калибровочные зависимости, полученные при метрологической аттестации установки. Объем газов при нормальных условиях рассчитывался по формуле:

$$V_н = \frac{P_г}{P_н} V_н, \text{ где } P_н = 0.1 \text{ МПа}$$

Погрешность определения давления газов в твэле составляла ±7%.

Отобранный при проколе газ анализировался масс-спектрометрическим методом по РД 95.86.90. Коэффициенты относительной чувствительности регистрируемых компонентов определялись из анализа специальной аттестованной смеси чистых газов. Чувствительность метода при определении содержания кислорода, аргона и углекислого газа составляла 0.001%. Погрешность определения объемной доли гелия, азота, криптона и ксенона была не выше 5%.

Полученные результаты представлены в табл.6.

Данные по газовыделению, взятые из таблиц 4-6 и представленные в виде графиков (рис.18), иллюстрируют хорошую корреляцию результатов, полученных двумя независимыми методами. Кроме того, они подтверждают наличие асимметрии характеристик радиальных твэлов в отработавших ТВС ВВЭР-440 (выгорание, газовыделение), а также указывают на то, что отобранные для исследований твэлы №№65, 67, 68 и 69 из ТВС 13626135 охватывают весь диапазон существующих различий.

Газовыделение из топлива радиальных твэлов ТВС 13626135

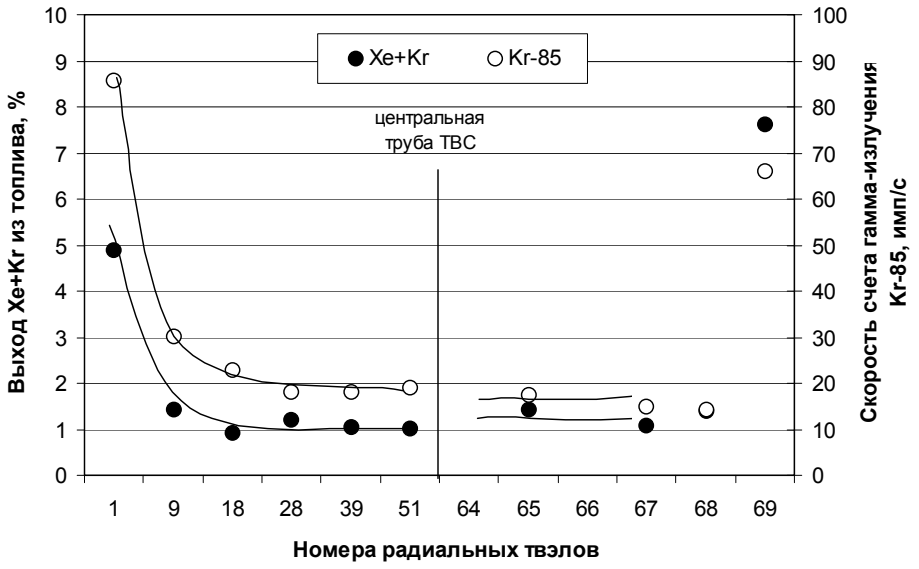


Рис.18

Таблица 6

Количество и состав газов под оболочкой твэлов ТВС 135

N твэла	Выгорание МВт*сут/кгU	Свободный объем твэла, $см^3$	Объем газа при н.у. $см^3$	Давление газа в твэле, МПа	Содержание газов, об.%							Газовы-деление из топлива %
					He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe	
1	41.6	15.5	164.0	1.06	68.00	<0.20	<0.06	<0.02	<0.02	3.36	28.34	4.88
9	38.6	16.1	134.4	0.83	89.20	<0.13	<0.04	<0.018	<0.014	1.07	9.52	1.43
18	37.0	16.4	128.4	0.78	92.98	<0.08	<0.007	<0.005	<0.002	0.71	6.21	0.93
28	36.1	15.2	120.8	0.79	90.30	<0.20	<0.09	<0.01	<0.0001	1.00	8.40	1.22
39	36.2	15.9	121.1	0.76	91.60	<0.18	<0.08	<0.002	<0.0001	0.85	7.30	1.06
51	36.9	16.1	131.4	0.82	92.40	<0.28	<0.10	<0.001	<0.0001	0.72	6.50	1.01
76	37.4	16.1	130.2	0.81	93.60	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	0.56	5.69	0.85
88	36.1	16.6	131.5	0.79	93.40	<0.18	<0.03	<0.02	<0.006	0.68	5.68	0.90
99	36.6	15.4	120.5	0.78	94.90	<0.22	<0.05	<0.001	<0.0001	0.50	4.33	0.62
109	37.2	16.5	134.1	0.81	94.10	<0.29	<0.09	<0.001	<0.0001	0.57	4.95	0.77
118	38.5	15.9	127.9	0.80	94.80	<0.12	<0.03	<0.002	<0.0001	0.52	4.52	0.65
120	42.8	14.9	169.0	1.13	65.20	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	4.14	30.50	5.31
126	41.4	15.5	136.8	0.88	83.40	<0.12	<0.05	<0.001	<0.0001	1.73	14.70	2.11
65	**36.40**	**15.5**	**134.2**	**0.88**	**90.13**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.95**	**8.89**	**1.44**
67	**37.60**	**15.2**	**125.7**	**0.84**	**91.75**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.80**	**7.43**	**1.09**
68	**39.3**	**15.7**	**132.7**	**0.86**	**89.49**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**1.00**	**9.49**	**1.41**
69	**42.20**	**15.4**	**174.8**	**1.15**	**53.35**	**<0.06**	**<0.01**	**<0.006**	**<0.003**	**3.79**	**42.78**	**7.62**
Max	42.8	16.6	174.8	1.2	94.9					4.1	42.8	7.6
Min	36.1	14.9	120.5	0.8	53.4					0.5	4.3	0.6
Среднее	38.3	15.8	136.3	0.9	86.4					1.4	12.1	2.0
СКО	2.29	0.49	16.57	0.12	12.18					1.20	11.04	2.00

2.7. Зазор топливо-оболочка

Для измерения зазора "топливо-оболочка" использовался неразрушающий метод, описанный в работе [9]. Сущность метода заключалась в проведении радиального нагружения оболочки с одновременным измерением ее деформации и прилагаемого усилия. Для измерения деформации и усилия нагружения использовались дифференциально-трансформаторный и пьезоэлектрический датчики. Погрешность измерения зазора "топливо-оболочка" этим методом составляет ±5%.

Рис.19 иллюстрирует типичное распределение среднего диаметра оболочки и зазора "топливо-оболочка" по высоте одного из твэлов сборки.

Из анализа полученных результатов следует, что зазор между топливом и оболочкой в области максимального уменьшения диаметра твэла 126 изменяется в интервале 50-90 мкм.

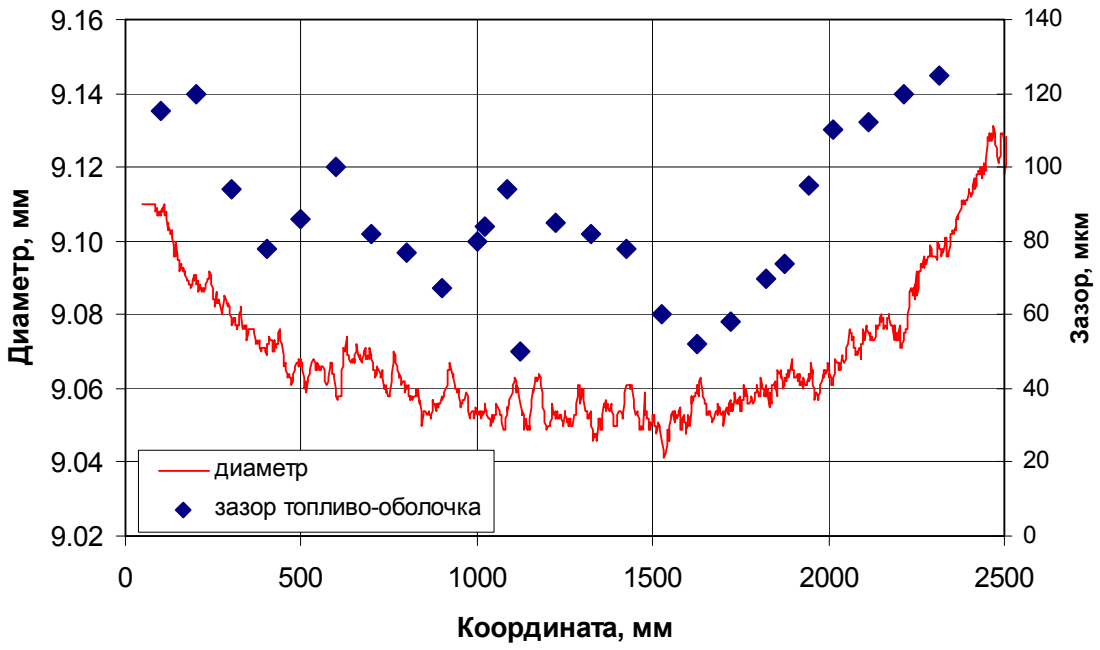


Рис.19

2.8. Рентгеновская радиография

Просвечивание твэлов осуществлялось на аппарате “Рентген 40” с регистрацией прошедшего излучения фотопленкой [10]. Твэлы просвечивались в вертикальном положении. Переворот и легкое постукивание заглушкой о дно приемного колодца приводило к перемещению топливных таблеток. Следовательно, топливный сердечник не плотно сцеплен с оболочкой и свободно перемещается внутри твэла.

Поскольку разделка отобранных твэлов на образцы для отправки в радиохимическую лабораторию будет проводиться также в вертикальном положении, необходимо принять меры для предотвращения неконтролируемых потерь таблеток топлива.

Заключение

В рамках задачи 4 проекта 2670р выполнены работы по неразрушающему контролю состояния четырех твэлов ТВС 13626135 с использованием методов:

- визуального осмотра;
- измерения длины и диаметра оболочечных труб;
- вихретоковой дефектоскопии;
- гамма-спектрометрии;
- определения газовыделения из топлива;
- измерения зазора между топливом и оболочкой;
- рентгеновской радиографии.

Корреляционный анализ параметров твэлов сборки подтвердил правильность выбора твэлов №№65, 67, 68 и 69 с целью определения изотопного состава топлива ВВЭР для использования в задачах, связанных с кредитом выгорания.

Список источников:

1 . Методология выбора ТВС, твэлов и образцов для определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива. Промежуточный отчет по задаче №1 проекта VVER Burnup Credit (2670р). Димитровград, 2003 г.

2. Исходное состояние рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU. Промежуточный отчет по задаче №2 проекта VVER Burnup Credit (2670р). Димитровград, 2003 г.

3. История облучения рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU. Промежуточный отчет по задаче №3 проекта VVER Burnup Credit (2670р). Димитровград, 2003 г.

4. Визуально-оптический осмотр отработавших ТВС и их элементов в защитных камерах. Методика испытаний, рег.№42-56, Димитровград, 1996 г.

5. Методика выполнения измерений длины твэлов, рег.№74-96, Димитровград, 1996 г.

6. Измерение наружного диаметра оболочек облученных твэлов цилиндрического профиля. Методика измерений, рег.№М-17031 ОМИТ.

7. Методика вихретоковой дефектоскопии оболочек облученных твэлов ВВЭР. Реестр методик ГНЦ НИИАР М-17010 ОИТ.

8. Методика масс-спектрометрического анализа состава газов в твэлах. Рег.№М-17025.

9. "Определение зазора "топливо-оболочка" твэла компрессионным методом". Методика измерений. Рег.№И-17174.

10. Методика рентгеновской радиографии облученных твэлов. Рег.№М-17004.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель проекта

_____А.В.Смирнов

“____”_____2003 г.

Отбор и подготовка образцов для радиохимического анализа изотопного состава топлива ТВС №13626135 ВВЭР-440

Промежуточный отчет по задаче № 5 проекта

VVER Burnup Credit (№ 2670р)

Димитровград, 2003 г.

Исполнители отчета:

Г.Д.Лядов

А.Ф.Тульников

А.Г.Капралов

А.В.Ещеркин

А.П.Четвериков

О.М.Михайлова

Н.М.Шведова

Р е ф е р а т

Отчет содержит: 11 страниц, 6 рисунков, 1 таблицу.

Ключевые слова: ТВС ВВЭР-440, отработавшее топливо, твэлы, выгорание, радиохимический анализ, разделка твэлов, отбор образцов, маркировка.

Изложено описание технологии отбора образцов для радиохимического анализа с целью определения содержания продуктов деления и тяжелых атомов. Приведены схемы разделки отобранных твэлов из ТВС ВВЭР-440 №Д26135, краткая характеристика образцов и их маркировка.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……. 5

Схемы разделки твэлов и маркировка образцов…….. 5

Заключение……. 6

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с техническими условиями необходимо отобрать образцы из твэлов ОТВС ВВЭР-440 №135 для выполнения радиохимических и масс-спектрометрических исследований.

Отбор четырех твэлов для получения данных по выгоранию топлива выполняется с учетом следующих требований:

- один твэл с максимальным выгоранием топлива для исследуемой ТВС №135;
- один твэл с минимальным значением выгорания;
- два других твэла имеют промежуточное выгорание.

Исходя из этих соображений, были выбраны четыре твэла для исследований и отбора образцов:

- твэл №69 с максимальным выгоранием топлива 49.3 МВт·сут/кгU;
- твэл №69 с минимальным выгоранием топлива 42.3 МВт·сут/кгU;
- твэлы №67 и 68 с промежуточным значением выгорания топлива 43.8 и 45.7 МВт·сут/кгU соответственно.

Приведенные выше значения выгорания в отобранных твэлах характеризуют выгорание топлива в точке, находящейся в области с максимальным накоплением продуктов деления.

СХЕМЫ РАЗДЕЛКИ ТВЭЛОВ И МАРКИРОВКА ОБРАЗЦОВ

Вырезка образцов из твэлов выполнялась на отрезном станке с помощью алмазного круга. Положение координаты отбора образцов по длине твэлов определялось с погрешностью ±1 мм. Для радиохимических исследований вырезались образцы длиной ~10 мм.

Схемы разделки твэлов для вырезки образцов приведены на рис.1÷2. Местоположение отобранных образцов по длине твэлов относительно профиля высотного распределения продуктов деления указано на рис. 3÷6. Измерения высотного распределения ПД для вырезки образцов проводились на отдельном оборудовании с увеличенным временем экспозиции, чтобы обеспечить представительность результатов по измерению интенсивности излучения Eu-154.

Вырезанные образцы топлива помещались в Al-пеналы, на крышке которых имелись номера. После помещения образца в пенал он закрывался крышкой, которая закреплялась с помощью резьбы для исключения раскрытия пенала. Выпадания топливных таблеток из оболочки или его отдельных фрагментов при вырезке образцов не наблюдалось. Маркировка Al-пеналов с соответствующими образцами приведена в табл. 1.

Таблица 1

Маркировка образцов, вырезанных из твэлов ТВС № 13626135

№ твэла	Координата от низа твэла, мм	№ Al-пенала с образцом топлива
65	100	182
	1000	21
	2150	69
67	1000	149
68	1000	162
69	100	135
	1000	79
	2150	57

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с ранее изложенными требованиями выполнена разделка 4-х твэлов (№№ 65, 67, 68 и 69) ТВС №135 и отбор образцов в количестве 8 шт. для радиохимических и масс-спектрометрических исследований. Вырезка образцов из твэлов выполнялась по согласованной схеме, после вырезки образцы помещались в пронумерованные Al-пеналы. После отбора все образцы топлива отправлены для выполнения работ по растворению и для дальнейших радиохимических и масс-спектрометрических исследований выгорания и нуклидного состава.

Схема вырезки образцов из твэлов №№ 67 и 68 ТВС №135

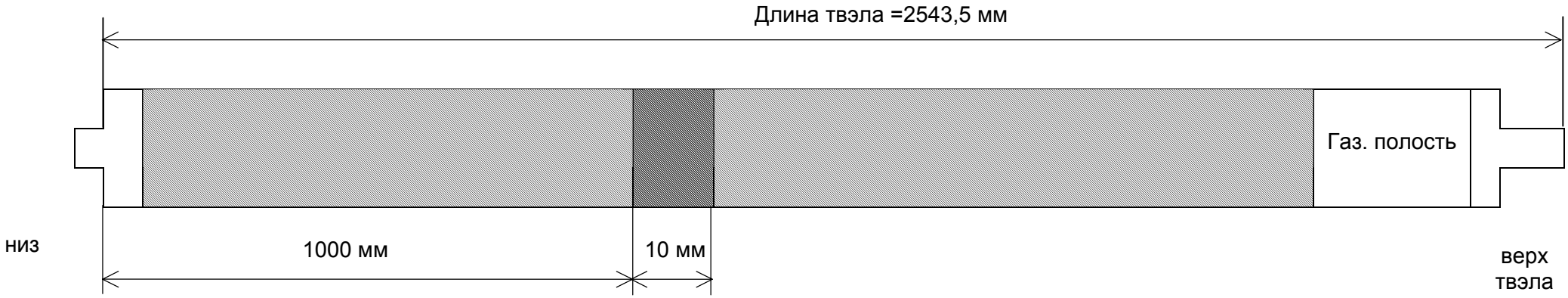


Рис. 1

Схема вырезки образцов из твэлов №№ 65 и 69 ТВС №135

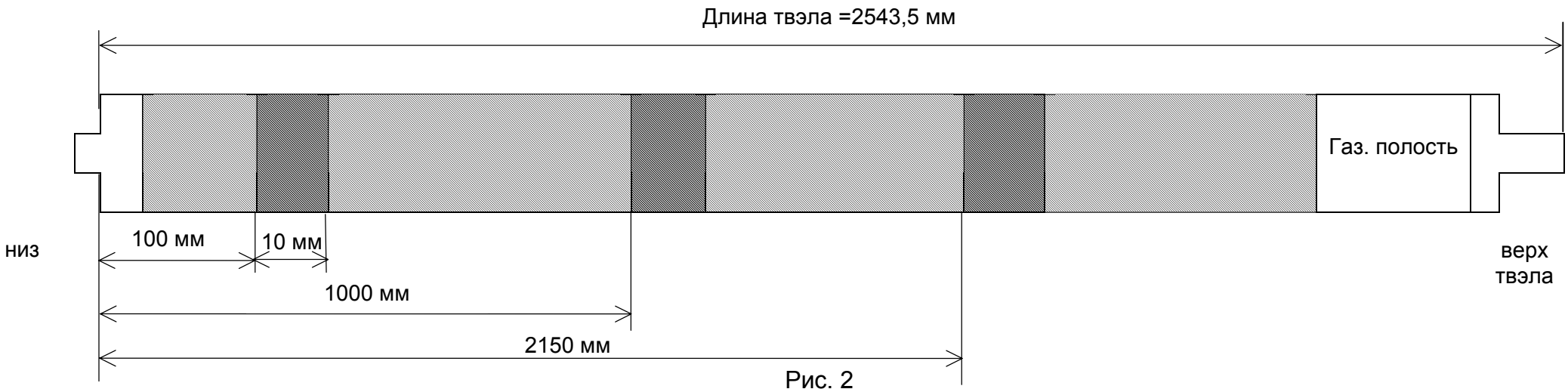


Рис. 2

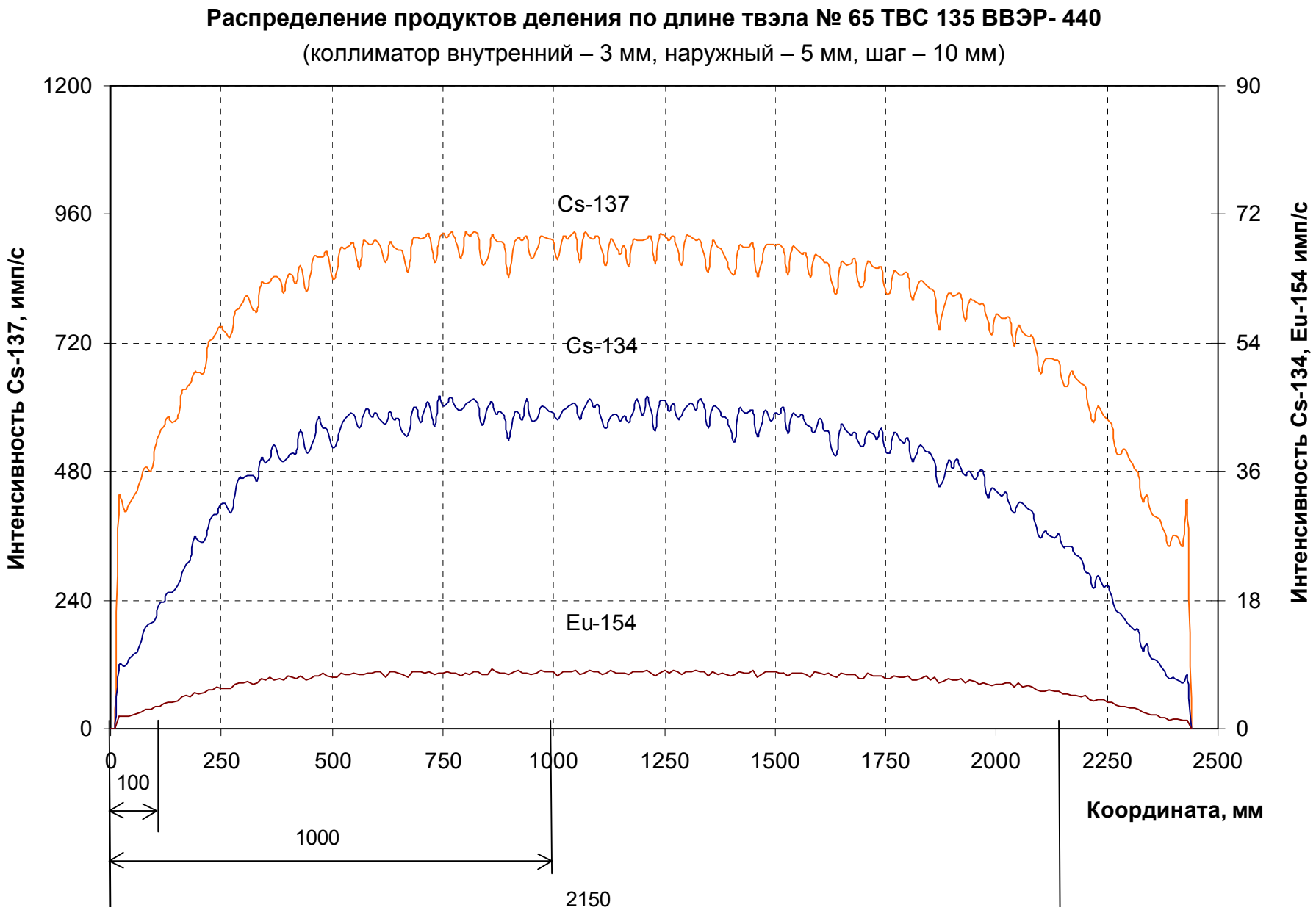

Распределение продуктов деления по длине твэла № 65 ТВС 135 ВВЭР- 440
(коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)
Интенсивность Cs-137, имп/с
Интенсивность Cs-134, Eu-154 имп/с
Cs-137
Cs-134
Eu-154
1200
960
720
480
240
0
90
72
54
36
18
0
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000
2250
2500
100
1000
2150
Координата, мм

Рис. 3

Распределение продуктов деления по длине твэла № 67 ТВС 135 ВВЭР- 440

(коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

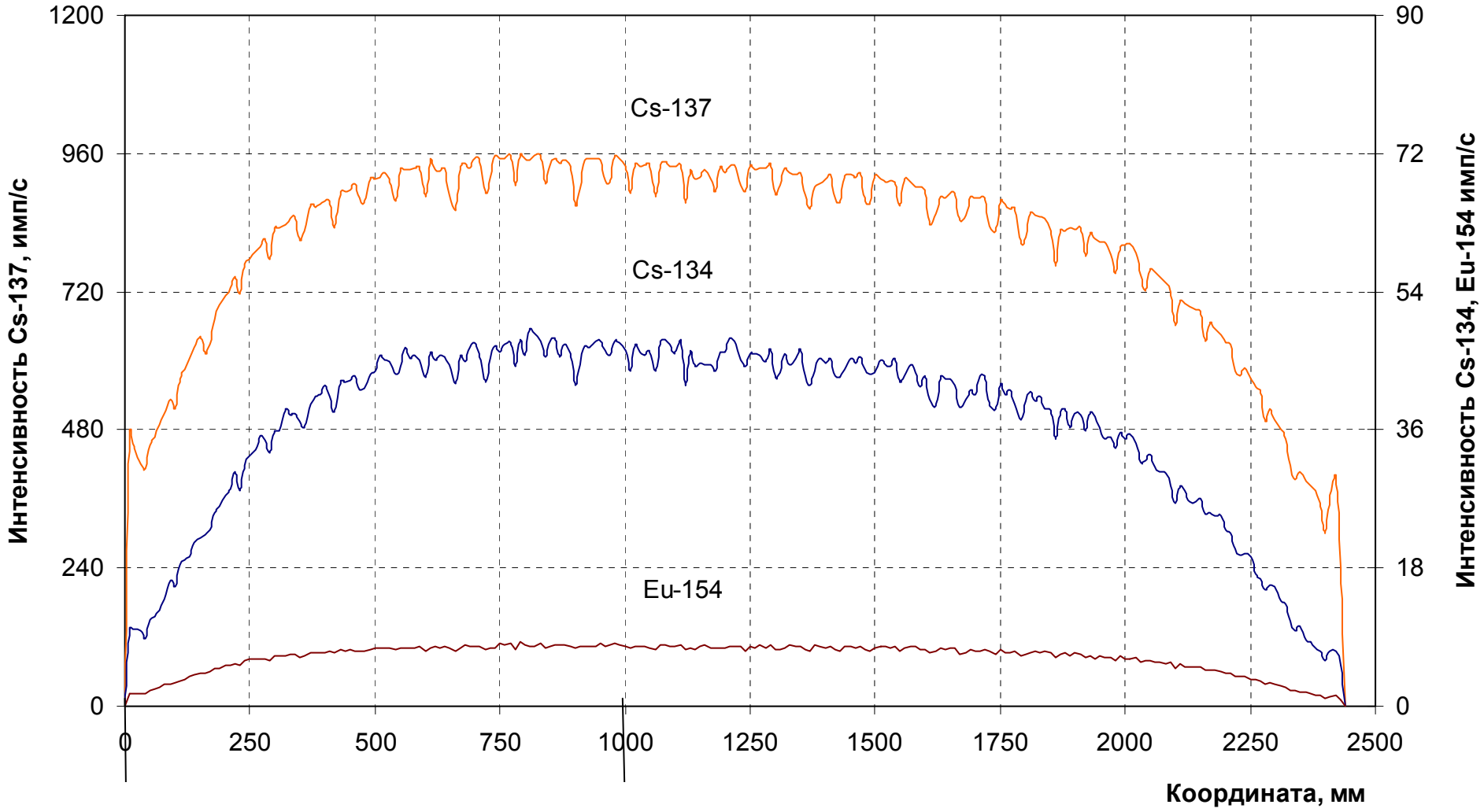


Рис. 4

Распределение продуктов деления по длине твэла № 68 ТВС 135 ВВЭР- 440

(коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

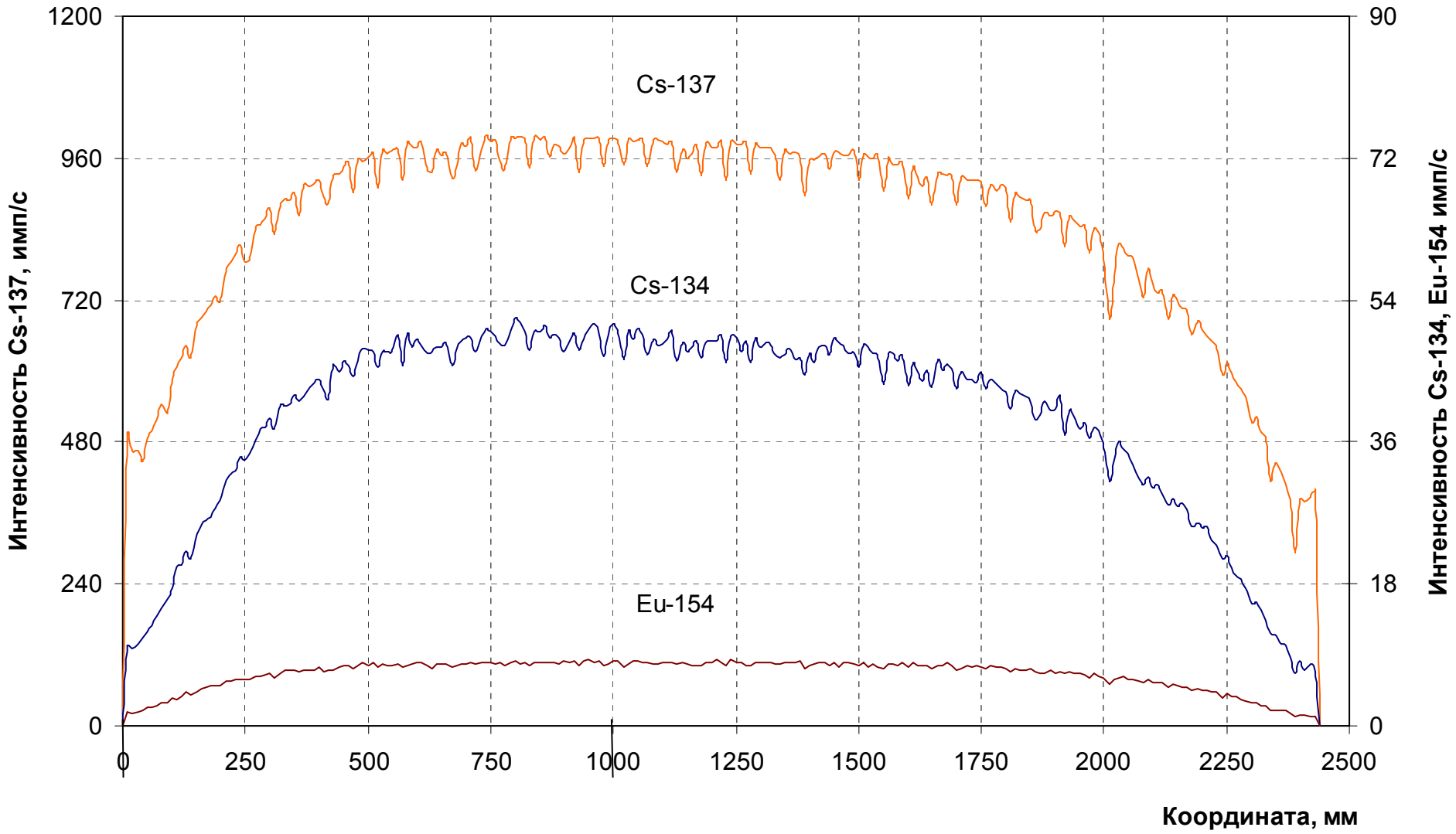


Рис. 5

Распределение продуктов деления по длине твэла № 69 ТВС 135 ВВЭР- 440

(коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

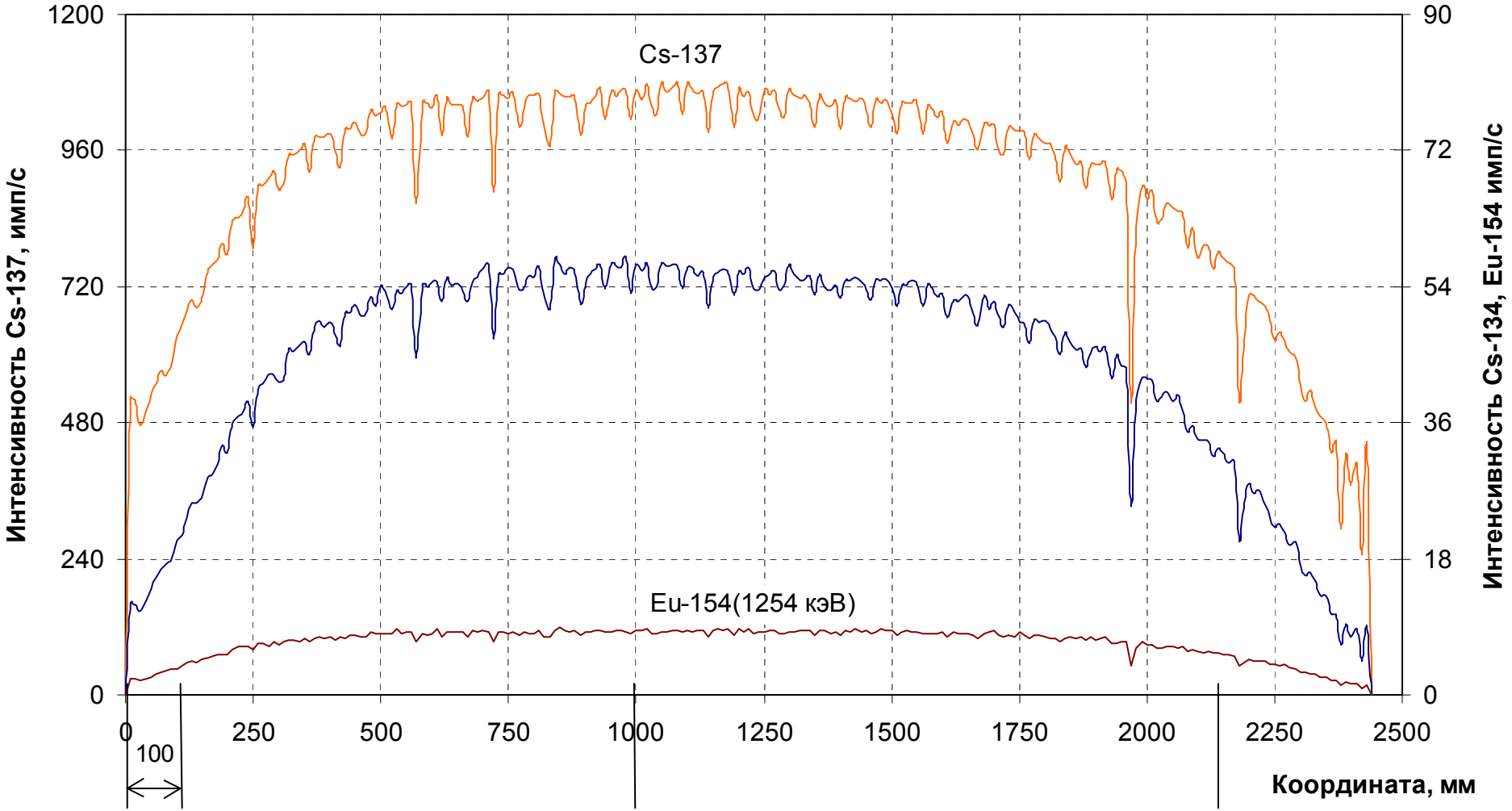


Рис. 6

Руководитель проекта

_____А.В.Смирнов

"____"_____2004 г.

“Радиохимическое исследование нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива в образцах”

Промежуточный отчет по задаче №6 (часть II)
проекта VVER Burnup Credit (2670р)

Димитровград, 2004 г.

Исполнители отчета:

Начальник лаборатории ОРИП, к.т.н.	А.П.Четвериков
Главный научный сотрудник ХТО, д.х.н.	Е.А.Ерин
Зам. начальника отдела ХТО, к.х.н.	В.М.Чистяков
Старший научный сотрудник ОРИП	И.В.Рогожина
Младший научный сотрудник ОРИП	А.Н.Плешаков
Старший научный сотрудник ХТО	А.Ю.Волков
Старший научный сотрудник ХТО	Ю.С.Попов
Инженер ХТО	В.Н.Момотов

РЕФЕРАТ

Объем отчета – 18 листов, таблиц - 13, использованных источников – 6.

Ключевые слова: топливо ядерное, нуклидный состав, монитор выгорания, выгорание топлива, химическое разделение элементов, изотопный состав, масс-спектрометрия.

В отчете представлены результаты нуклидного состава и глубины выгорания топлива в 8-ми образцах ТВС №135 ВВЭР-440 НВАЭС-4.

Расчет глубины выгорания топлива производили методами тяжелых атомов и по накоплению продуктов деления. При определении выгорания по накоплению продуктов деления в качестве мониторов выгорания используются продукты деления: ^{137}Cs, а также суммарное накопление изотопов $^{145+146}$Nd и ^{148}Nd.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. 5

1.Характеристики образцов отработавшего топлива 5

2. Радиохимический анализ образцов отработавшего топлива 6

2.1. Растворение вырезанных образцов 7

2.2. Радиохимическое выделение элементов из раствора топлива 8

2.3. Измерение изотопного состава выделенных элементов 8

2.4. Определение массовых долей выделенных элементов 8

2.5. Обработка результатов 10

3. Результаты радиохимического исследования образцов отработавшего топлива 11

Заключение. 18

Список использованных источников 18

ВВЕДЕНИЕ

Одним из этапов верификации программ, предназначенных для расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов, является сопоставление результатов расчетов с данными экспериментов. В случае расчетов выгорания топлива ядерного реактора речь идет о сопоставлении расчетного и экспериментально измеренного нуклидных составов отработавшего топлива.

Нуклидный состав топлива ядерного реактора, его изменение в процессе выгорания и после выгрузки из реактора представляют большой практический интерес. Эти данные определяют физические процессы, протекающие в реакторе, вопросы безопасности, экологии, экономику и стратегию развития топливного цикла.

В рамках задачи 6 проекта 2670р проводилось исследование нуклидного состава отработавшего топлива ВВЭР-440 разрушающими радиохимическими методами. Определялись содержание и изотопный состав урана, плутония, нептуния, америция, кюрия, ряда осколков деления, глубина выгорания топлива. Всего был исследован нуклидный состав 8-ми образцов отработавшего топлива из твэлов 65, 67, 68 и 69 ОТВС №26135 ВВЭР-440 НВАЭС. В твэлах 65 и 69 характеристики топлива исследованы по высоте топливного сердечника.

В настоящем отчете представлены результаты проведенных исследований.

1. Характеристики образцов отработавшего топлива

Описание исходных параметров топлива приведено в работе [1].

Паспортные данные ОТВС и некоторые другие характеристики (картограмма размещения твэлов, размещение ОТВС в активной зоне 4-го блока НВАЭС, длительность топливных циклов) приведены в работе [2].

ОТВС эксплуатировалась с 10.1987 г. по 07.1991 г. (1369 календарных дней), количество эффективных суток составило 1109, время выдержки (конец облучения – радиохимический анализ) составило 12,34 года (4518 дней).

Образцы отработавшего топлива длиной ~ 10 мм каждый вырезались из твэлов ОТВС № 135 в “горячей” камере ФГУП ГНЦ РФ НИИАР в соответствии с заранее составленной схемой вырезки, представленной на рис.1 и 2 работы [3].

В таблице 1.1 приведены координаты вырезки и маркировка образцов.

Таблица 1.1. Характеристики отбора образцов.

№ твэла	Координата от низа твэла, мм	Номер образца	Начальное обогащение топлива по ^{235}U, % масс.
65	100	182	3,592
	1000	21	
	2150	69	
67	1000	149	3,585
68	1000	162	3,585
69	100	135	3,592
	1000	79	
	2151	57	

2. Радиохимический анализ образцов отработавшего ядерного топлива.

Исследование нуклидного состава образцов отработавшего топлива проводилось в аналитической и масс-спектрометрической лабораториях ГНЦ РФ НИИАР и включало следующие основные этапы :

2.1. Растворение вырезанных образцов, включающее в себя проверку полноты растворения топлива.

2.2. Радиохимическое выделение U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce из раствора топлива.

2.3. Измерение изотопного состава выделенных элементов.

2.4. Определение массовых долей урана, плутония, нептуния, америция, неодима, церия, цезия методом изотопного разбавления. Определение содержания нептуния-237, кюрия и церия-144.

2.5. Обработка результатов. Определение глубины выгорания топлива по продуктам деления [5] и методом тяжелых атомов [6].

Проведенные исследования представлены в указанной последовательности.

2.1. Проведено растворение 8-ми образцов топлива. Режим растворения был изменен по сравнению с изложенным в работе [4]. Изменения сводились к следующему :

- растворение проводили без добавления плавиковой кислоты ;
- растворение проводилось порционно, а именно : в стакан с анализируемым образцом топлива заливали 150 мл 8 моль $л^{-1}$ раствора азотной кислоты и проводили растворение при температуре 95-100 ^{o}C в течение 6 часов. Затем раствор отделяли от остатка нерастворенного топлива, заливали 150 мл свежей порции 8 моль $л^{-1}$ HNO_3 и вновь проводили растворение в течение 6 часов при нагревании. По окончании растворения раствор также отделяли от остатка нерастворенного топлива и объединяли его с раствором от предыдущей стадии растворения. Таких процедур растворения каждый раз с новой порцией азотной кислоты проводили 5-6 раз до полного растворения топлива.

Объединенные растворы упаривали до объема 100-120 мл и подготавливали для радиохимического анализа.

Для доказательства полноты растворения проводили контрольное растворение раствором 14 моль $л^{-1}$ HNO_3 с добавкой 0,1 моль $л^{-1}$ плавиковой кислоты в течение 6 часов. Полученный раствор анализировали на содержание урана, плутония и америция и некоторых продуктов деления, и по их остатку оценивали полноту растворения. Описанная процедура растворения обеспечила растворение образцов более 99,9 %.

2.2. Радиохимическое выделение U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce из раствора топлива.

Выделение фракций отдельных элементов для последующего α-, γ- спектрометрического и масс-спектрометрического анализов проводилось в соответствии со схемой и методиками, описанными в работе [4].

2.3. Измерение изотопного состава выделенных элементов проводилось с применением техники масс-спектрометрии. Использовались масс-спектрометры МИ 1201, оснащенные персональными ЭВМ в канале регистрации ионного тока. Измеряемыми величинами являлись интенсивности ионных токов от изотопов анализируемых элементов. Последовательность операций измерения изотопного состава элементов приведена в работе [4].

2.4. Определение массовой доли элемента проводилось методом изотопного разбавления с масс-спектрометрическим окончанием путем измерения изотопного состава элемента, выделенного из аликвотной доли раствора топлива и комплексной метки, или группы меток [4]. Проводимые радиохимические процедуры по выделению элементов из полученной смеси и методики масс-спектрометрических измерений идентичны использованным при определении изотопного состава элементов топлива. Характеристики меток приведены в работе [4].

<u>Кюрий. Плутоний.</u> При определении массовых долей ^{244}Cm и ^{238}Pu использовались α-спектрометрия в сочетании с масс-спектрометрическим измерением изотопного состава кюрия.

Аликвоту раствора топлива для α-радиометрических измерений наносили на подложку из нержавеющей стали в геометрии ОСАИ, высушивали и прокаливали. Измерения α-спектра и суммарного $\Sigma\alpha$ счета проводили на α-спектрометре с полупроводниковым детектором Si(Au). По результатам измерений рассчитывали массовую концентрацию ^{244}Cm и изотопов плутония в растворе топлива по формуле :

$$m_i = \frac{\gamma_i \cdot \Sigma\alpha_{счет}}{A_{уд.}}, \text{ мкг/мл} \qquad (1)$$

где m_i – массовая концентрация i-го изотопа в растворе топлива, мкг/мл ;

γ_i - доля активности i-го изотопа в α-спектре , отн.ед. ;

$\Sigma\alpha_{счет}$ – суммарный $\Sigma\alpha$ счет от аликвоты топлива, измеренный на α-спектрометре, Бк/мл ;

$A_{уд.}$ – удельная активность (табличная) i-го изотопа в одном мл анализируемого раствора топлива, Бк/мкг.

Суммарную массу кюрия находили с учетом его изотопного состава, измеренного на масс-спектрометре.

По результатам α-спектрометрических измерений также рассчитывали содержание плутония, которое в дальнейшем использовалось как оценочное для определения объемов аликвот растворов топлива, отбираемых на масс-спектрометрический анализ.

<u>Цезий. Церий.</u> Массовую долю ^{137}Cs, ^{144}Ce и ряда других нуклидов-продуктов деления измеряли гамма-спектрометрическим методом без химического выделения из исходного раствора топлива. Для γ-измерений раствор топлива объемом 1 см^3 загружали в стандартные стеклянные пробирки и герметизировали. Измерения проводили на γ-спектрометре ДГДК-50 с полупроводниковым детектором Ge(Li) в геометрии ОСГИ.

Расчет активности нуклида A_i (Бк/мл) в исходном растворе топлива осуществляли по формуле :

$$A_i = \frac{S_k \cdot e^{\lambda_i t}}{\eta_{\gamma k} \cdot \varepsilon_{\gamma k} \cdot V \cdot \chi} \qquad (2)$$

где S_k - площадь k-го фотопика i-го изотопа с энергией $E_{\gamma k}$, имп/с;

λ_i - постоянная распада i-го изотопа, с$^{-1}$;

t – время, прошедшее от момента отбора пробы до момента измерения активности, с ;

$\eta_{\gamma k}$ - квантовый выход k-ой гамма-линии изотопа ;

$\varepsilon_{\gamma k}$ - эффективность гамма-спектрометра для k-ой гамма-линии при заданной геометрии расположения источника излучения;

V – объем пробы раствора образца, мл ;

χ - химический выход изотопа.

С учетом изотопного состава Ce рассчитывали массовую долю этого элемента. Результаты, полученные по ^{137}Cs использовались как оценочные для исключения грубых ошибок при определении массы Cs методом изотопного разбавления.

Нептуний. Определение массовой доли Np проводили спектрофотометрически при длине волны 980 нм в соответствии с методикой [4].

2.5. Расчеты содержания и изотопного состава U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce и выгорания топлива проводились с использованием компьютерных программ, разработанных на основе соотвествующих алгоритмов расчета.

Программное обеспечение расчета погрешностей изотопного состава и массовых долей отдельных элементов и изотопов в уране базировалось на правилах статистической обработки математических выражений. В таблицах приведены значения массовых долей изотопов с указанием полной погрешности в скобках для доверительной вероятности P=0,95.

Масс-спектрометрические измерения изотопных отношений проводилось на одной-двух загрузках выделенного элемента, для которых снималось 6-8 серий по 10 измерений в каждой. При обработке результатов измерений внутри каждой серии проводился статистический анализ на основе критерия Диксона с доверительной вероятностью P=0,95. Как показали измерения стандартных образцов урана, погрешность изотопных отношений определяется только случайной составляющей, а влиянием фактора дискриминации (систематическая составляющая погрешности) можно пренебречь.

3. Результаты радиохимического исследования образцов отработавшего топлива.

Полученный в ходе настоящего исследования экспериментальный материал представлен в табл.3.1 – 3.11., снабженных необходимыми надписями. Результаты радиохимических анализов приведены к моменту окончания облучения.

Выгорание изотопов ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu и ^{241}Pu, их доли делений в общем выгорании, рассчитанные по МТА, приведены в табл.3.12, в которой также приведены расчетно-экспериментальные значения потока и флюенса нейтронов. При расчете глубины выгорания топлива принимали следующие расчетные значения эффективных выходов мониторов выгорания: $Y_{эф.137Cs}$ = 6.32 % ; $Y_{эф.148Nd}$ = 1,75 %; $Y_{эф.145+146Nd}$= 6.43 %.

Таблица 3.1. Изотопный состав урана (масс.%).

№ образца	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,020(5) *	0,81(3)	0,55(3)	98,62(4)
149	0,020(5)	0,74(1)	0,56(1)	98,68(2)
162	0,020(5)	0,65(2)	0,57(2)	98,76(5)
79	0,010(5)	0,44(2)	0,56(2)	98,99(5)
57	0,011(5)	1,00(5)	0,51(2)	98,48(6)
135	0,025(4)	1,34(2)	0,46(1)	98,18(2)
182	0,014(4)	1,66(2)	0,420(16)	97,91(3)
69	0,018(5)	1,23(3)	0,49(1)	98,26(3)

* - цифры в скобках здесь и далее (для всех таблиц) означают границы общей погрешности результата измерения для доверительной вероятности P=0,95.

Таблица 3.2. Массовое содержание изотопов урана (кг оск./т$U_{исх.}$).

№ образца	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,189(47)	7,65(28)	5,19(28)	932,05(37)
149	0,189(47)	6,989(94)	5,289(94)	931,99(38)
162	0,188(46)	6,12(19)	5,37(19)	930,45(35)
79	0,094(68)	4,13(19)	5,26(19)	930,36(35)
57	0,105(47)	9,52(47)	4,85(19)	937,40(40)
135	0,240(38)	12,87(19)	4,419(96)	943,05(42)
182	0,135(36)	16,06(19)	4,06(19)	945,59(42)
69	0,172(46)	11,77(28)	4,688(95)	940,86(42)

Таблица 3.3. Изотопный состав плутония (масс.%).

№ образца	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	1,95(19)	54,11(11)	23,04(8)	14,65(12)	6,25(4)
149	1,91(19)	52,36(8)	23,95(8)	14,82(5)	6,96(8)
162	2,35(9)	50,51(11)	24,46(9)	14,89(10)	7,79(10)
79	2,82(10)	49,57(11)	25,92(9)	13,42(10)	8,27(10)
57	1,55(9)	56,84(13)	22,29(14)	14,06(11)	5,26(10)
135	1,02(9)	61,30(9)	21,72(14)	12,34(6)	3,62(5)
182	0,86(9)	67,63(11)	18,72(9)	10,59(10)	2,20(10)
69	1,35(10)	60,44(11)	21,27(9)	13,04(10)	3,90(10)

Таблица 3.4. Массовое содержание изотопов плутония (кг оск./т$U_{исх}$).

№ образца	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	0,227(24)	6,308(14)	2,686(10)	1,708(12)	0,728(5)
149	0,228(23)	6,246(9)	2,857(9)	1,768(20)	0,830(9)
162	0,280(28)	6,019(8)	2,915(12)	1,775(20)	0,928(12)
79	0,329(33)	5,785(7)	3,025(13)	1,566(12)	0,965(14)
57	0,164(16)	6,019(8)	2,361(15)	1,489(12)	0,557(9)
135	0,0884(88)	5,315(10)	1,883(16)	1,070(5)	0,314(4)
182	0,0733(73)	5,769(9)	1,597(8)	0,903(6)	0,1876(85)
69	0,143(14)	6,408(11)	2,255(13)	1,382(12)	0,413(11)

Таблица 3.5. Изотопный состав америция и кюрия (масс.%).

№ образца	^{241}Am	^{242m}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm
21	30,96(10)	0,69 (1)	68,34(10)	93,3(46)	6,16(12)	0,54(7)
149	31,98(8)	0,52(1)	67,51(8)	95,4(47)	4,11(11)	0,49(8)
162	36,73(12)	0,20(5)	63,07(12)	94,0(47)	5,55(11)	0,45(8)
79	37,84(10)	0,24 (1)	61,92(10)	94,4(47)	5,28(11)	0,32(8)
57	34,84(5)	0,660(9)	64,50(8)	97,3(48)	2,7(5)	-
135	47,53(7)	1,060(9)	51,41(7)	95,82(48)	3,69(6)	0,49(7)
182	63,74(12)	1,480(7)	34,78(12)	96,16(48)	3,56(7)	0,28(4)
69	40,53(10)	0,97(2)	58,50(10)	93,7(47)	5,75(11)	0,55(6)

Таблица 3.6. Массовое содержание изотопов ТПЭ (кг оск./т$U_{исх.}$).

№ образца	^{237}Np	^{241}Am	^{242m}Am $\cdot 10^3$	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm $\cdot 10^2$	^{246}Cm $\cdot 10^4$
21	1,43 (10)	0,0589 (17)	1,32 (10)	0,1300 (87)	0,0718 (36)	0,473 (9)	4,2 (4)
149	1,46 (10)	0,0856 (14)	1,38 (10)	0,1807 (90)	0,0877 (44)	0,378 (7)	4,5 (4)
162	1,49 (10)	0,1223 (61)	0,67 (6)	0,2100 (63)	0,1222 (61)	0,722 (14)	5,8 (6)
79	1,59 (11)	0,1627 (81)	1,03 (10)	0,266 (13)	0,1888 (94)	1,056 (21)	6,4 (6)
57	1,110 (78)	0,0557 (28)	1,05 (8)	0,1032 (52)	0,0486 (24)	0,135 (3)	-
135	0,780 (56)	0,0380 (19)	0,85 (5)	0,0412 (20)	0,01348 (67)	0,052 (1)	0,68 (7)
182	0,710 (50)	0,0446 (27)	1,04 (10)	0,0243 (12)	0,00675 (33)	0,0250 (5)	0,21 (2)
69	1,030 (71)	0,0486 (24)	1,16 (10)	0,0702 (42)	0,0224 (11)	0,138 (3)	1,32 (13)

Таблица 3.7. Изотопный состав неодима (масс.%).

№ образца	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0,66 (2)	21,65 (8)	23,40 (8)	20,14 (9)	18,42 (12)	10,61 (12)	5,12 (10)
149	0,70 (1)	21,31 (16)	23,75 (13)	20,06 (14)	18,48 (10)	10,60 (13)	5,10 (10)
162	0,72 (1)	20,85 (9)	24,18 (9)	19,93 (6)	18,59 (7)	10,61 (11)	5,12 (10)
79	0,77 (1)	19,76 (9)	25,58 (13)	19,64 (10)	18,86 (10)	10,48 (12)	4,91 (10)
57	0,54 (10)	22,66 (12)	22,80 (8)	20,38 (10)	18,22 (7)	10,49 (11)	4,91 (10)
135	0,48 (1)	24,18 (11)	21,43 (10)	20,64 (12)	17,98 (16)	10,43 (12)	4,86 (10)
182	0,32 (1)	25,54 (9)	20,26 (9)	20,90 (6)	17,78 (7)	10,41 (13)	4,80 (10)
69	0,39 (1)	23,71 (9)	21,79 (13)	20,58 (10)	18,08 (10)	10,53 (11)	4,93 (9)

Таблица 3.8.Массовое содержание неодима (кг оск./т$U_{исх.}$).

№ образца	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0.0294 (9)	0.965 (9)	1.043 (10)	0.898 (9)	0.821 (8)	0.473 (5)	0.228 (2)
149	0.0318 (9)	0.969 (9)	1.080 (11)	0.912 (9)	0.840 (8)	0.482 (5)	0.232 (2)
162	0.0339 (9)	0.981 (9)	1.137 (11)	0.937 (9)	0.874 (8)	0.499 (5)	0.241 (2)
79	0.0386 (9)	0.992 (10)	1.284 (13)	0.986 (9)	0.947 (9)	0.526 (5)	0.246 (2)
57	0.0206 (6)	0.864 (8)	0.869 (8)	0.777 (8)	0.695 (7)	0.400 (4)	0.187 (2)
135	0.0155 (5)	0.779 (8)	0.690 (7)	0.665 (6)	0.579 (6)	0.336 (3)	0.1570 (15)
182	0.00775 (23)	0.618 (6)	0.490 (5)	0.506 (5)	0.430 (4)	0.252 (2)	0.116 (1)
69	0.0131 (5)	0.797 (8)	0.733 (7)	0.692 (7)	0.608 (6)	0.354 (3)	0.166 (2)

Таблица 3.9. Изотопный состав цезия и церия(масс.%).

№ образца	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	38.93 (14)	3.43 (10)	13.96 (11)	43.68 (18)	43,00 (16)	39,28 (16)	17,71 (10)
149	38.74 (19)	4.25 (10)	13.36 (12)	43.66 (14)	43,01 (45)	39,28 (45)	17,71 (5)
162	39.19 (9)	3.42 (5)	12.79 (7)	44.61 (11)	43,02 (22)	39,29 (22)	17,69 (5)
79	39.37 (10)	3.41 (5)	11.99 (7)	45.23 (11)	42,89 (22)	39,31 (22)	17,80 (5)
57	39.66 (23)	4.27 (5)	14.21 (20)	41.86 (18)	42,89 (20)	39,31 (22)	17,80 (10)
135	39.43 (23)	5.18 (5)	15.17 (20)	40.22 (11)	42,81 (20)	39,27 (22)	17,92 (10)
182	38.63 (9)	4.96 (5)	17.70 (7)	38.71 (11)	42,77 (22)	39,26 (22)	17,97 (10)
69	37.97 (10)	5.97 (5)	15.74 (7)	40.31 (11)	42,89 (22)	39,29 (22)	17,82 (5)

Таблица 3.10. Массовое содержание изотопов цезия и церия (кг оск./т$U_{исх.}$).

№ об-разца	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	1,328 (46)	0,117 (6)	0,476 (19)	1,490 (50)	1,540 (50)	1,407 (50)	0,634 (51)
149	1,416 (50)	0,155 (7)	0,488 (19)	1,596 (50)	1,558 (50)	1,423 (50)	0,642 (52)
162	1,471 (51)	0,128 (6)	0,480 (18)	1,675 (50)	1,640 (51)	1,498 (60)	0,674 (55)
79	1,462 (50)	0,127 (6)	0,445 (16)	1,680 (67)	1,729 (60)	1,585 (61)	0,718 (56)
57	1,253 (43)	0,135 (6)	0,449 (16)	1,323 (53)	1,285 (53)	1,178 (50)	0,533 (50)
135	1,078 (38)	0,142 (7)	0,415 (17)	1,100 (44)	1,095 (44)	1,004 (50)	0,458 (37)
182	0,848 (34)	0,109 (5)	0,389 (16)	0,850 (40)	0,832 (40)	0,764 (38)	0,350 (35)
69	1,110 (36)	0,174 (8)	0,460 (17)	1,178 (47)	1,149 (46)	1,053 (53)	0,477 (38)

Таблица 3.11. Выгорание топлива (кг оск./т $U_{исх.}$)

№ образца	$^{145+146}Nd$	^{148}Nd	^{137}Cs	Среднее взвешен-ное
21	41,5 (12)	41,55 (83)	41,6 (15)	41,5 (15)
149	41,6 (14)	42,02 (84)	42,1 (16)	41,9 (15)
162	43,8 (15)	44,27 (88)	44,2 (16)	44,2 (14)
79	46,2 (16)	46,24 (94)	46,6 (17)	46,3 (14)
57	36,2 (12)	36,08 (72)	36,4 (14)	36,2 (12)
135	30,25 (91)	30,06 (60)	29,20 (89)	29,90 (91)
182	23,12 (76)	22,65 (45)	23,23 (77)	22,86 (72)
69	31,4 (11)	31,11 (62)	31,9 (11)	31,32 (98)

Таблица 3.12. Выгорание изотопов ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu и ^{241}Pu, их доли делений в общем выгорании.

Параметр	Твэл №65 Обр. №21		Твэл №67 Обр. №149		Твэл №68 Обр. №162		Твэл №69 Обр. №79.	
	Выго-ран.кг/т U	Доля делен.q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля Делен. q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля делен. q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля делен. q_I, %
F_5	22,07	53,66	22,55	53,71	23,22	53,03	25,05	54,51
F_8	4,52	11,00	4,62	11,00	4,82	11,02	5,05	11,00
F_9	12,67	30,82	12,83	30,56	13,52	30,89	13,55	29,48
F_1	1,86	4,52	1,98	4,71	2,21	5,06	2,30	5,01
$F_т$	41,12		41,98		43,77		45,95	
флюенс, см $^{-2}$, 10^{21}	2,70		2,86		3,09		3,995	
Поток, 10^{13} см $^{-2}$ с $^{-1}$	2,819		2,986		3,229		3,828	
$F_{взв.}$ ПД, кг/т U	41,5		41,9		44,2		46,3	

Продолжение табл.3.12.

Параметр	Твэл №69. Обр. №57.		Твэл №69. Обр. №135.		Твэл №65 Обр. №182		Твэл №65 Обр. №69.	
	Выгор. кг/т U	Доля делен. q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля Делен. q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля делен. q_I, %	Выгор. кг/т U	Доля делен. q_I, %
F_5	20,75	57,78	17,99	62,41	15,31	64,50	18,75	58,74
F_8	3,92	10,92	3,12	10,83	2,56	10,79	3,48	10,90
F_9	9,91	27,60	6,96	24,15	5,42	22,82	8,70	27,27
F_1	1,33	3,70	0,75	2,61	0,45	1,88	0,98	3,08
$F_т$	35,91		28,82		23,73		31,92	
Флюенс, см $^{-2}$, 10^{21}	2,328		1,794		1,396		1,936	
Поток, 10^{13} см $^{-2}$ с $^{-1}$	2,429		1,872		1,457		2,021	
$F_{взв.}$ ПД, кг/т U	36,2		29,90		22,86		31,32	

Заключение

В данном отчете приведены результаты определения изотопного состава и содержания U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce, а также определены методом тяжелых атомов и по продуктам деления значения выгорания в образцах отработавшего топлива ВВЭР-440. Выполнен количественный анализ на содержание ^{237}Np в этих образцах.

Анализы по определению содержания нуклидов Eu, Sm, Gd, ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag, ^{101}Ru, ^{103}Rh, ^{105,108}Pd завершаются и конечные результаты будут преставлены в финальном отчете.

Список использованных источников:

1. Методология выбора ТВС, твэлов и образцов для определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива. Промежуточный отчет по задаче 1. Кредит выгорания. Проект (2670р), 2003

2. Исходное состояние рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38,5 МВт сут/кг $U_{исх.}$. Промежуточный отчет по задаче 2. Кредит выгорания. Проект (2670р)., 2003

3. Отбор и подготовка образцов для радиохимического анализа изотопного состава топлива ТВС №13626135 ВВЭР-440. Промежуточный отчет по задаче №5 проекта “Кредит выгорания (2670р)”, 2003

4. Методики и средства определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива в образцах. Промежуточный отчет по задаче №6. Кредит выгорания (2670р), 2003

5. Отработавшее ядерное топливо тепловых реакторов. Определение выгорания масс-спектрометрическим способом по накоплению продуктов деления. Отчет-методика. Рег.№0-4004, НИИАР, г.Димитровград, 1990.

6. ASTM E-244-80 Standart Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Mass Spectrometric Method).

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель проекта

_____А.В.Смирнов

“____”_____2004 г.

Исследование выгорания и нуклидного состава топлива ВВЭР-440 для использования в задачах, связанных с кредитом выгорания

Финальный отчет по задаче 7 проекта

VVER Burnup Credit (№ 2670р)

Димитровград, 2004 г.

Исполнители отчета:

Г.Д.Лядов

А.П.Четвериков

И.В.Рогожина

Б.А.Канашов

О.М.Михайлова

Реферат

Отчет содержит: 54 страницы, 29 рисунков, 34 таблицы, 11 библиографических ссылок.

Ключевые слова: проект VVER Burnup Credit, отработавшее топливо, ТВС ВВЭР-440, неразрушающие методы, выгорание, продукты деления, нуклидный состав, радиохимический анализ, массы изотопов, расчетные коды.

Изложена методология выбора ТВС, твэлов и образцов топлива ВВЭР-440 на радиохимические и масс-спектрометрические исследования с целью получения сведений о выгорании и нуклидном составе для использования их в задачах, связанных с кредитом выгорания. Приводится описание исходного состояния рабочей кассеты ВВЭР-440, исходный нуклидный и химический состав топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом.

С помощью комплекса программ БИПР-7А и ПЕРМАК-А получены расчетные значения распределения выгорания по высоте твэлов, распределения энерговыделения по сечению пучка ТВС, флюенсы быстрых нейтронов на оболочках твэлов. Приведены результаты экспериментального определения изотопного состава, содержания тяжелых атомов и продуктов деления для образцов топлива с различным выгоранием. Приведены аналитические зависимости изменения нуклидного состава образцов топлива с выгоранием от ~22 кг/т$U_{исх}$ до ~45.5 кг/т$U_{исх}$.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ **5**

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ВЫБОРА ТВС, ТВЭЛОВ И ОБРАЗЦОВ **7**

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВА И ТВЭЛОВ ТВС №13626135 ..... **11**

2.1. Описание исходных параметров топлива 11

2.2. Параметры твэлов 12

2.3. Параметры рабочей кассеты 135 14

3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ТВС №13626135 ..... **16**

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЭЛОВ ТВС №13626135 ..... **20**

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ, ОТОБРАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА **29**

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НУКЛИДНОГО СОСТАВА И ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ОБРАЗЦАХ **33**

7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СОДЕРЖАНИЯ НУКЛИДОВ **47**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ **52**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ **54**

Введение

Необходимо отметить, что ВВЭР-440 – основной тип энергетического легководного ядерного реактора, используемого на АЭС в странах Восточной Европы и Финляндии. Повышение технико-экономических показателей энергоблоков данного типа, в том числе за счет увеличения количества или продолжительности топливных циклов, является важной задачей, имеющей научное и практическое значение. В связи с этим, исследование свойств и изотопных составов отработавшего ядерного топлива является важным этапом как для самого топливного цикла (изготовление, эксплуатация, транспортировка, хранение, разделка и переработка топливных сборок), так и для проведения нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов типа ВВЭР и улучшения их достоверности. Знание изотопного состава топлива и динамики его изменения в процессе эксплуатации позволит корректно оценить линейно-тепловые нагрузки на твэлах и температуру топливного сердечника, рассчитать выгорание и содержание тяжелых атомов в выгружаемом из активной зоны топливе.

Изменение изотопного состава тяжелых атомов и накопление продуктов деления, имеющих большие значения сечений поглощения тепловых и резонансных нейтронов, обуславливают изменение реактивности выгоревшего топлива. В табл.1 представлен перечень нуклидов, которые необходимо определить количественно для оценки реактивности топлива.

Таблица 1

Список нуклидов для количественного анализа

Нуклид	Погрешность	Нуклид	Погрешность
U^{234}	5-10%	Sm^{147}	0.5-2%
U^{235}	0.5-2%	Sm^{149}	2-4%
U^{236}	0.5-5%	Sm^{150}	0.5-2%
U^{238}	0.3-0.5%	Sm^{151}	0.5-2%
Np^{237}	3-10%	Sm^{152}	0.5-2%
Pu^{238}	3-10%	Nd^{143}	0.5-1%
Pu^{239}	0.2-0.5%	Nd^{144}	0.5-1%
Pu^{240}	0.2-0.5%	Nd^{145}	0.5-1%
Pu^{241}	0.2-0.5%	Nd^{146}	0.5-1%
Pu^{242}	0.2-0.5%	Nd^{148}	0.5-1%
Pu^{244}	50%	Nd^{150}	0.5-1%
Eu^{153}	0.5-2%	Tc^{99}	10-20%
Eu^{151}	2-5%	Mo^{95}	10-20%
Eu^{154}	2-5%	Ru^{101}	10-20%
		Rh^{103}	10-20%
Cs^{133}	2-5%	Ag^{109}	15-30%
Cs^{135}	2-5%	Gd^{155}	5-10%
Cs^{137}	2-4%	Ce^{144}	5-10%

Продолжение таблицы 1

Нуклид	Погрешность	Нуклид	Погрешность
Cm^{242}	3-7%	Pd^{105}	10-20%
Cm^{243}	30-50%	Pd^{108}	10-20%
Cm^{244}	3-6%		
Cm^{245}	3-10%	Am^{241}	2-5%
Cm^{246}	5-15%	Am^{242}	2-10%
		Am^{243}	2-5%

Следует отметить, что вышеуказанным параметрам облученного топлива, объединенным термином "кредит выгорания", в последнее время придается особое значение. Это связано главным образом, с обеспечением ядерной безопасности при увеличении степени обращения с отработавшим ядерным топливом. В качестве примеров обращения можно привести, например, работы по уплотнению загрузки и размещения ОТВС в бассейнах выдержки АЭС, размещение ОТВС в специальных контейнерах для временного хранения, вопросы размещения в бассейнах выдержки ТВС с различным выгоранием, исходным обогащением, наличием выгорающих поглотителей и т.д. Поэтому оптимальное решение указанных задач может дать значительный экономический эффект, позволит повысить безопасность обращения с ОЯТ, снизить воздействие на окружающую среду. Одна из возможностей повышения плотности упаковок отработавшего топлива при обращении после эксплуатации заключается в использовании кредита выгорания.

Для расчета возможных повышений плотности упаковок отработавшего топлива с использованием кредита выгорания необходима верификация расчетных кодов с использованием характеристик топлива, истории эксплуатации и распределения нейтроннопоглощающих и нейтронноизлучающих нуклидов по объему ТВС (эксперимент типа benchmark).

В настоящее время в различных странах в бассейнах выдержки АЭС находятся на временном хранении значительное количество ТВС ВВЭР-440 с выгоранием ~40 МВт·сут/кгU и исходным обогащением 3.6 % по урану-235. Поэтому в качестве объекта исследований выбрана ТВС №13626135, отработавшая на 4-м блоке НВАЭС до среднего выгорания ~38.5 МВт·сут/кгU.

Цель настоящей работы заключалась в изучении и исследовании исходного состояния, истории эксплуатации, описании состояния после эксплуатации, определении распределения выгорания и содержания нуклидов (нейтроннопоглощающих и нейтронноизлучающих) в топливе ТВС №13626135.

1. Описание методологии выбора ТВС, твэлов и образцов

В странах Восточной Европы, СНГ и России значительная часть электроэнергии вырабатывается на АЭС с реакторами ВВЭР-440. За годы эксплуатации накопилось большое число отработавших ТВС, обращение с которыми является заметной статьей затрат в ядерной энергетике стран, использующих энергоблоки на основе ВВЭР-440. На первом этапе топливного цикла ВВЭР-440 использовались ТВС с топливом 3.6 % обогащения по урану-235, которые эксплуатировались в течение 3-4-х топливных циклов до среднего выгорания ~40 МВт·сут/кгUисх. Отработавшие ТВС с вышеуказанными характеристиками составляют основной массив находящегося на хранении в бассейнах выдержки АЭС ядерного топлива. Кроме того, отработавшая сборка должна быть выбрана из числа имеющихся в наличии ОТВС ВВЭР-440, прошедших процедуру послереакторного контроля, поскольку работы по проекту "VVER Burnup Credit" предусматривают проведение исследований твэлов и отбор образцов топлива для радиохимического анализа. Исходя из вышеизложенного, для исследований были отобраны твэлы ТВС №13626135, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU [1].

Рабочая ТВС №13626135 была изготовлена в июне 1987 г. в соответствии с чертежом 440.01.000-27 и техническими условиями ТУ95.598-79.

В табл.1.1 приведены основные конструктивные характеристики ТВС и твэлов. Картограмма размещения твэлов по ячейкам дистанционирующих решеток представлена на рис.1.1. Для изготовления твэлов ТВС №135 использовалась одна партия топлива со средней плотностью 10.5 г/см^3.

Таблица 1.1

Исходные данные о ТВС №135

Параметр	Значение
1. Исполнение ТВС	440.01.000-27
2. Технические условия	ТУ95.598-79
3. Исполнение чехла ТВС	445.01.001-06
4. Размеры чехловой трубы, мм: длина размер "под ключ"	 2725 144.2
5. Исполнение пучка твэлов	440.01.020-27
6. Исполнение твэлов	440.00.020-02
7. Технические условия на твэлы	440.00.010ТУ
8. Номинальная длина твэла, мм	2558.5
9. Наружный диаметр твэла	9.1
10. Внутренний диаметр оболочки, мм	$7.72^{+0.08}$
11. Топливная таблетка: наружный диаметр, мм диаметр центрального отверстия, мм	 $7.60_{-0.07}$ $1.2^{+0.8}$

Продолжение таблицы 1.1

Параметр	Значение
высота, мм	8-14
12. Длина топливного сердечника, мм	2420±10
13. Масса топливного сердечника, г	1087±22
14. Давление гелия в твэле, МПа.	0.5-0.7

Картограмма размещения твэлов в ТВС №135

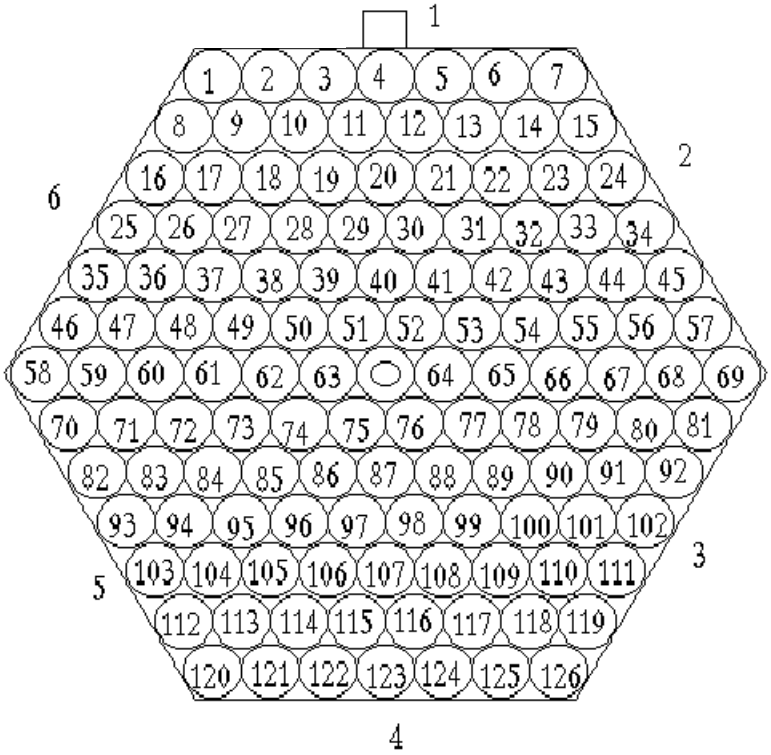


Рис.1.1

ТВС 135 эксплуатировалась в составе 15-18-ой топливных загрузок активной зоны 4-го блока НВАЭС. В табл.1.2 и на рис.1.2 представлены данные о топливных циклах и координаты расположения ТВС в активной зоне.

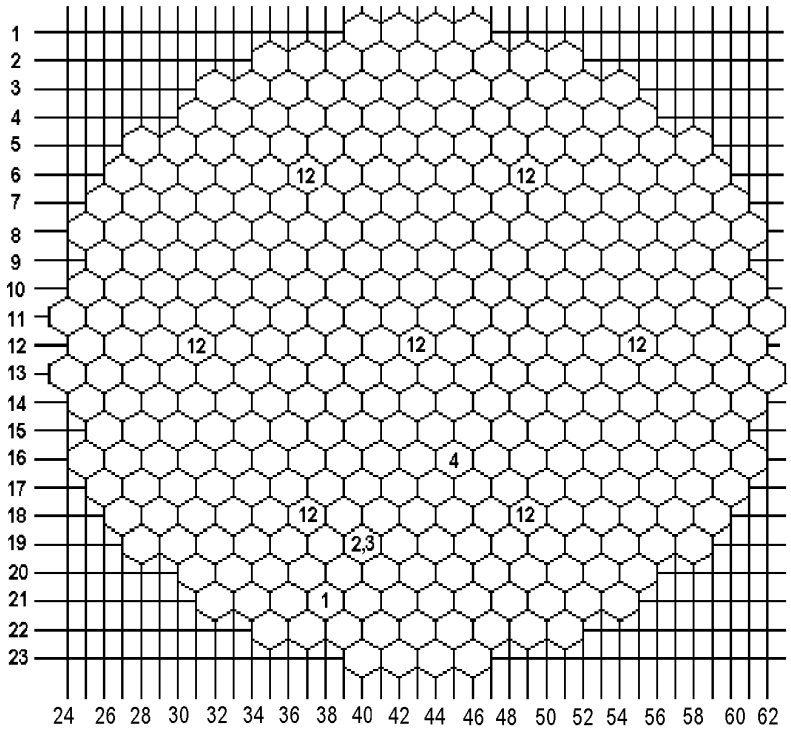
Таблица 1.2

Длительность топливных циклов и схема движения ТВС 135

Номер топливного цикла	15(1)	16(2)	17(3)	18(4)
Начало Конец	10.87 08.88	10.88 12.89	01.90 05.90	07.90 7.91
Эфф. сутки	296	389.8	98.2	325.1
Ср. выгорание за ТЦ, МВт·сут/кгU	11.0	14.5	3.5	9.5
Ср. выгорание на конец ТЦ, МВт·сут/кгU	11.0	25.5	29.0	38.5
Темп выгорания, МВт·сут/кгU / эфф.сут	0.037	0.037	0.036	0.029
Координата ТВС в АЗ	21-38	19-40	19-40	16-45

Размещение ТВС 135

в активной зоне 4-го блока НВАЭС



(1) - ячейки, в которых размещалась ТВС №13626135 в ТЦ1-ТЦ4

(12) - регулирующая группа СУЗ

Рис.1.2

Из анализа данных, представленных в табл.1.2 и на рис.1.2, следует, что ТВС №135 работала при одинаковом темпе выгорания в течение первых трех топливных циклов и менее напряженно в 4-м топливном цикле. Ни в одном из топливных циклов она не стояла рядом с кассетами 12-й регулирующей группы СУЗ. По результатам КГО на 4-м блоке НВАЭС и по данным послереакторных исследований сборка не содержала негерметичных твэлов.

В соответствии с техническими требованиями для радиохимических исследований были отобраны четыре твэла, удовлетворяющих следующим требованиям:

- один твэл с максимальным значением выгорания топлива;
- один твэл с минимальным выгоранием топлива;
- два других твэла должны иметь промежуточное выгорание.

Из твэлов с максимальным и минимальным значениями выгорания вырезаются по три образца по высоте твэла, из двух других твэлов – по одному образцу в центральной части топливного сердечника. Всего для радиохимических исследований отбирается восемь образцов топлива, выгорание в которых изменяется в значительном диапазоне.

2. Краткая характеристика исходного состояния топлива и твэлов ТВС №13626135

Одними из основных параметров, имеющих важное значение для обеспечения ядерной безопасности в процессе обращения с ОЯТ, являются выгорание и изотопный состав топлива ТВС. Однако необходимо учитывать дополнительно целый ряд характеристик, которые могут влиять на изменение реактивности. В частности, например, изменение геометрических параметров твэлов приводит к изменению водо-уранового отношения в ТВС, что имеет прямое отношение к изменению реактивности. Важное значение имеет также надежность и работоспособность отдельных узлов ТВС, обеспечивающих целостность конструкции. В данной главе описывается исходное состояние топлива и твэлов ТВС 13626135, которое необходимо учитывать при оценке состояния ТВС после облучения [2].

2.1.Описание исходных параметров топлива

В качестве топлива были использованы таблетки из спеченной двуокиси урана с обогащением топлива 3.6% по U-235.

Для изготовления твэлов ТВС №13626135 использовались две партии оболочечных труб (985-6-1/2 и 1091-6-1/2) и одна партия топлива (350512).

Геометрические параметры топливных таблеток ТВС №13626135, нуклидный и химический составы топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом приведены в табл.2.1-2.3.

Таблица 2.1

Геометрические параметры таблеток ТВС №13626135

Параметр	Значение
Наружный диаметр, мм	7.6
Длина, мм	11
Диаметр центрального отверстия, мм	1.2
Форма таблетки	с фаской

Таблица 2.2

Изотопный состав топлива ТВС №13626135

Параметр	Значение
Масса UO_2 в ТВС до облучения, кг	134.76
Масса урана в ТВС до облучения, кг	118.49
Масса U-235 в ТВС до облучения, кг	4.25
Массовая доля смеси изотопов урана, %	не менее 87.7
Массовая доля урана-235 в смеси изотопов урана, %	3.60 ± 0.05
Массовая доля урана-236 в уране, %	не более 0.1
Массовая доля урана-234 в уране	не нормируется
Плотность, г/см^3	10.40 – 10.80
Кислородный коэффициент	2.000…2.015

Таблица 2.3

Физико-химические показатели топлива ТВС №13626135

Наименование показателя	Норма
Массовая доля примесей по отношению к урану, %, не более	
Азот	0.02
Бор	0.00004
Железо	0.06
Кремний	0.025
Марганец	0.002
Медь	0.005
Никель	0.015
Углерод	0.01
Фтор	0.005
Хром	0.01
Суммарный борный эквивалент, %, не более	0.00018

2.2. Параметры твэлов

В качестве материала оболочек и концевых деталей твэлов использован сплав Zr-1%Nb (Э110). Нижние торцы твэлов герметизировались сваркой ЭЛС, верхние - КСС. Топливом служили спеченные таблетки из диоксида урана с фасками на торцах. Фиксаторы топливного столба твэлов выполнены из стали типа 08Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.

Эскиз твэла представлен на рис.2.1, параметры твэла - в табл.2.4.

Таблица 2.4

Параметры твэла ТВС №13626135

Длина, мм	2558.5
Масса твэла, г	1410
Материал топлива	UO_2
Длина топливного сердечника, мм	2420
Длина газосборника, средняя, мм	86
Размеры топливной таблетки, мм	
-наружный диаметр	7.6
-диаметр канала	1.2
-высота	8÷14
Диаметр центрального отверстия, мм	1.2
Форма таблетки	С фаской
Материал оболочки	Zr-1%Nb
Наружный диаметр твэла, мм	9.1
Внутренний диаметр оболочки, мм	7.72
Газ-наполнитель	гелий
Давление гелия в твэле, МПа	0.5-0.7
Свободный объем в твэле, $см^3$	16.7 – 17.2
Герметизация верхней заглушки	КСС-2
Герметизация нижней заглушки	ЭЛС

Эскиз твэла ТВС №13626135

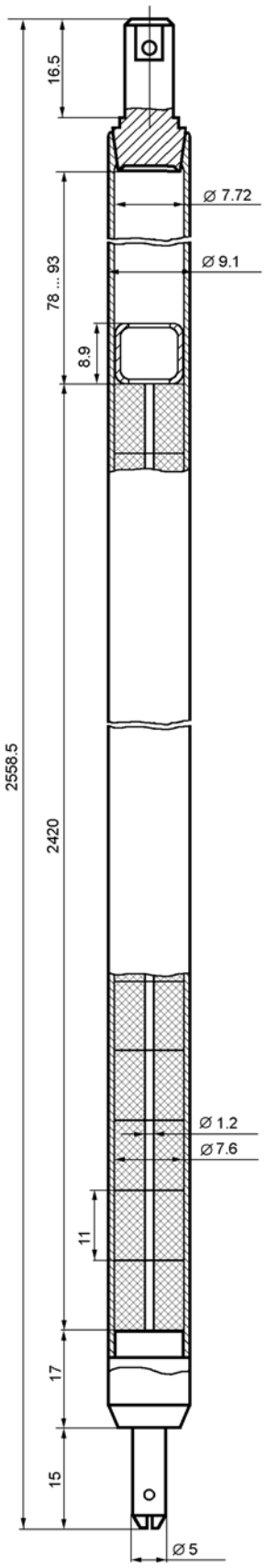


Рис.2.1

2.3. Параметры ТВС №13626135

Рабочая кассета состоит из пучка твэлов, головки, хвостовика и чехла. Твэлы в пучке располагаются по треугольной решетке и объединены между собой десятью дистанционирующими решетками, механически закрепленными на центральной трубе, верхней решеткой, закрепленной шайбами при помощи сварки к головке, и нижней опорной решеткой, закрепленной на хвостовике. Твэлы, а также центральная труба, закреплены в нижней решетке шплинтующей проволокой. Нижняя опорная решетка приварена к хвостовику, предназначенному для установки ТВС в днище корзины реактора, хвостовик опирается шаровой поверхностью на конусную часть гнезда. Для ориентации ТВС при установке в ячейку АЗ на хвостовике ТВС есть фиксирующий палец, а в днище корзины - соответствующий паз.

Головку и хвостовик по шестигранной поверхности крепят к чехлу с помощью винтов. Для предотвращения непроизвольного отвинчивания винты фиксируют при помощи сварки.

Головка ТВС имеет два пальца под транспортный захват перегрузочной машины и подпружиненные упоры, удерживающие рабочую кассету от всплытия. Упоры также служат компенсаторами тепловых расширений и технологических допусков внутрикорпусных устройств реактора. К нижнему торцу головки крепят защитную решетку.

Для изготовления оболочек и концевых деталей твэлов, дистанционирующих решеток, центральной трубы и чехла используют циркониевые сплавы. Остальные узлы изготавливают из нержавеющей стали.

Топливо твэлов представляет собой столб таблеток из спеченного диоксида урана с осевым отверстием. Столб топлива закреплен фиксатором от перемещения при транспортировании.

Эскиз рабочей кассеты представлен на рис.2.2, характеристики основных компонентов кассеты - в табл.2.5.

Эскиз ТВС

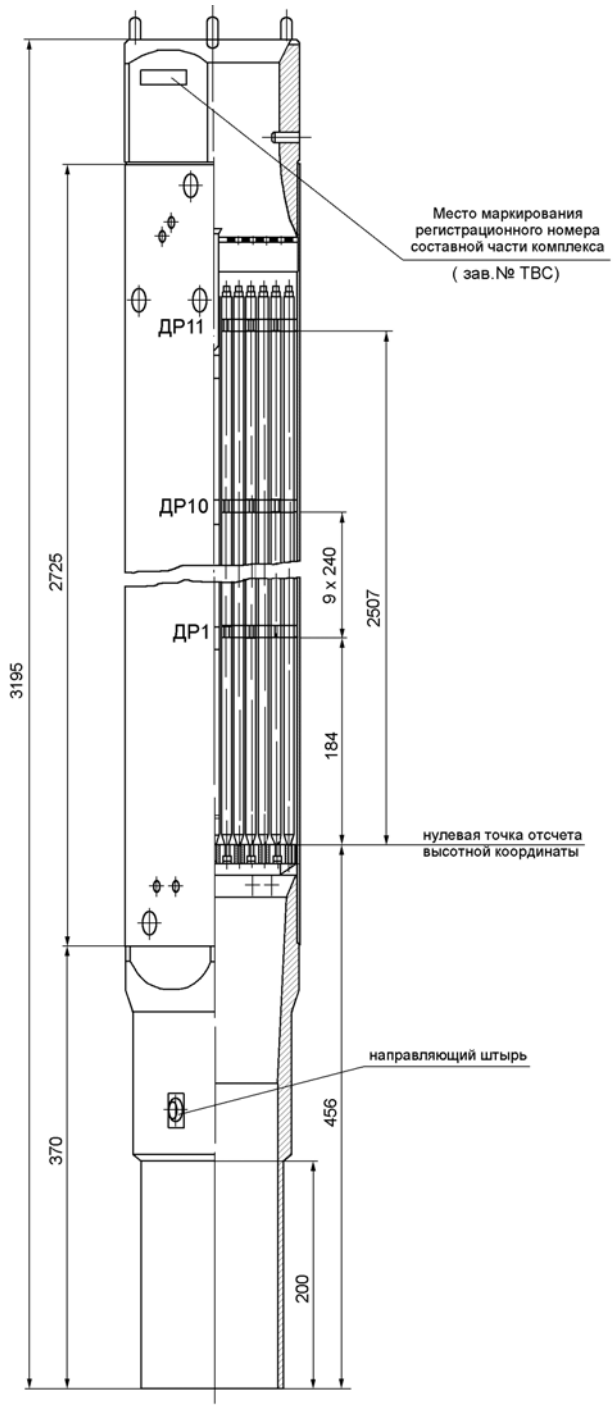


Рис.2.2

Таблица 2.5

Характеристики ТВС №13626135

№ п/п	Наименование	Значение
1	**ТВС**	
1.1	Заводской номер	13626135
1.2	Дата изготовления	1987
1.3	Обогащение топлива по ^{235}U, %	3.6
1.4	Длина ТВС	3217
1.5	Количество твэлов	126
1.6	Количество ДР	11
2	**Чехол**	
2.1	Длина, мм	2725
2.2	Размер "под ключ", мм	144.2
2.3	Толщина листа чехла, мм	2.0
2.4	Крепление чехла к концевым деталям	винтами (по 12 винтов с каждого конца чехла)
3	**Дистанционирующая решетка**	
3.1	Размер "под ключ", мм	138.73 max
3.2	Высота ячейки, мм	10
3.3	Диаметр ячейки, мм	8.90
3.4	Толщина стенки ячейки, мм	0.3
3.5	Наличие обода	отсутствует
3.6	Материал	Сплав Zr-1%Nb
4	**Центральная труба**	
4.1	Длина, мм	2565
4.2	Наружный диаметр, мм	10.3
4.3	Внутренний диаметр, мм	8.8
4.4	Материал	Сплав Zr-1%Nb
5	**Твэл**	
5.1	Длина, мм	2558.5
5.2	Наружный диаметр, мм	9.1
5.3	Исходное давление He, МПа	0.5…0.7
5.4	Материал оболочки	Сплав Zr-1%Nb
6	**Топливная таблетка**	
6.1	Материал	Диоксид урана
6.2	Длина, мм	8…14
6.3	Наружный диаметр, мм	7.6
6.4	Диаметр центрального отверстия, мм	1.2
6.5	Наличие фаски	имеется
6.6	Средняя плотность, г/см^3	10.5

3. Нейтронно-физический расчет параметров облучения ТВС №13626135

В соответствии с техническим заданием были выполнены расчеты нейтронно-физических характеристик исследуемых твэлов топливной кассеты, которая эксплуатировалась на 4-м блоке Нововоронежской АЭС в течение 15-18 топливных загрузок [3].

Для проведения этой работы использовались следующие данные:

- конструкционные характеристики исследуемой топливной сборки;
- история эксплуатации реактора до 15-ой топливной загрузки (картограммы топливных загрузок, схемы перестановок всех топливных сборок, длительность работы топливных загрузок, мощность реактора, температура теплоносителя в реакторе, расход теплоносителя через реактор, положение рабочей группы органов СУЗ, параметры критичности активных зон);
- история эксплуатации реактора в течение 15-18 топливных загрузок (картограммы топливных загрузок, схемы перестановок всех топливных сборок, длительность работы топливных загрузок, мощность реактора, температура теплоносителя в реакторе, расход теплоносителя через реактор, положение рабочей группы органов СУЗ, параметры критичности активных зон);

Были произведены по-твэльные и по-кассетные нейтронно-физические расчеты всех топливных загрузок по комплексу программ БИПР-7А – ПЕРМАК-А, включая подготовку необходимых к ним библиотек констант с нейтронно-физическими характеристиками топливных сборок и твэлов.

В результате выполненной работы были определены следующие характеристики исследуемых твэлов:

- распределение глубин выгорания по высоте;
- распределение флюенса быстрых нейтронов;
- распределения энерговыделения;
- значения температуры оболочки;
- величины линейной мощности,

Многослойная двумерная четырехгрупповая мелкосеточная программа **ПЕРМАК-А** использовалась для расчета потвэльных распределений поля энерговыделений и выгорания топлива в поперечном сечении активной зоны. Дополнительные сервисные блоки к программе ПЕРМАК-А использовались для получения распределения флюенса быстрых нейтронов и значений температуры оболочки.

Многогрупповая спектральная программа **ТВС-М** применялись для подготовки требуемых программами БИПР-7А и ПЕРМАК-А многопараметрических зависимостей малогрупповых нейтронных сечений расчетных ячеек.

Расчеты по программе БИПР-7А выполнялись с использованием 25 расчетных слоев по высоте активной зоны. Это обеспечивает возможность представительного учета в расчетах различия высотных размеров топливных частей рабочих ТВС и ТВС АРК, на-

личия стальных вкладышей в верхних частях ТВС АРК, особенностей конструкции узла стыка поглотитель-топливный хвостовик АРК.

Накопленный опыт сопоставлений расчетов с данными пусков и эксплуатации топливных загрузок ВВЭР свидетельствует о том, что погрешности расчетного прогноза нейтронно-физических характеристик типичных для реакторов ВВЭР-440 топливных загрузок по указанному комплексу программ не превышают для:

- начальных значений критической концентрации бора — 10 %;
- эффективности системы ОР СУЗ при обработке данных измерений с учетом эффектов пространственно-временной кинетики — 10%;
- температурного коэффициента реактивности — $3*10^{-5}C^{-1}$;
- неравномерности в мощности ТВС — 5 %;
- неравномерности мощностей твэлов внутри ТВС — 3 %;
- эффекта отравления Xe-135 — 10 %;
- мощностного эффекта реактивности — 15%;
- температуры повторной критичности — 20°С;
- длительностей работы топливных загрузок (для первой переходной загрузки) — 3% (5%)

На рис.3.1 представлена нумерация твэлов внутри расчетной сетки программы ПЕРМАК-А.

Нумерация твэлов в ТВС №13626135, принятая в нейтронно-физических расчетах

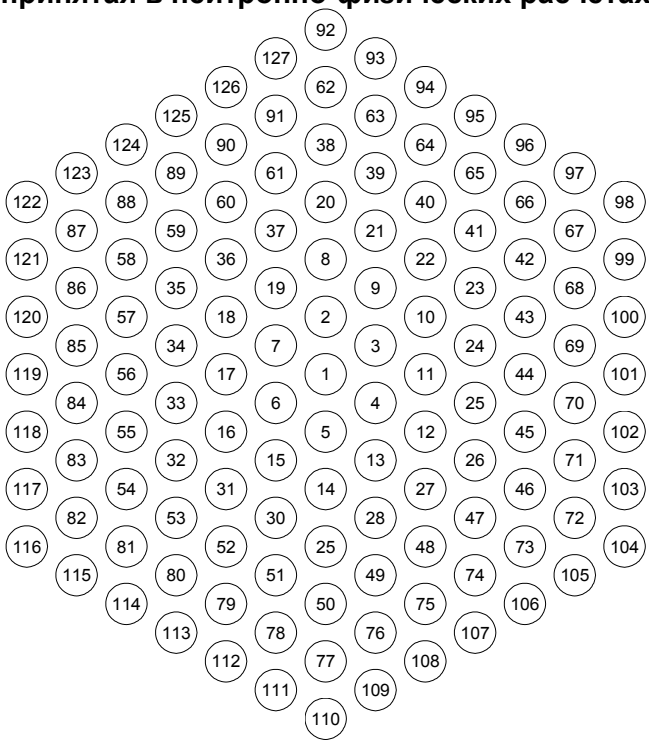


Рис.3.1

На рис.3.2 приведено потвэльное распределение энерговыделения по сечению ТВС №13626135 для 18-й топливной кампании. Изменение расчетных значений линейной тепловой нагрузки на твэлах, расположенных по радиальному направлению аналогично исследуемым твэлам в течение 15-18 топливных циклов, представлено в табл.3.1. Максимальная линейная нагрузка на координате, соответствующей слою №9 для углового твэла №116, составляла ~220 Вт/см, а для твэла №6, расположенного в центре ТВС возле центральной трубы, - 187.3 Вт/см. Расчетные значения выгорания для исследуемых твэлов на момент окончания облучения представлены в табл.3.2. Наблюдается удовлетворительные совпадения расчетных данных с экспериментальными результатами по определению глубины выгорания неразрушающим методом, представленным в главе 4.

Потвэльное распределение энерговыделения в ТВС (загрузка 18)

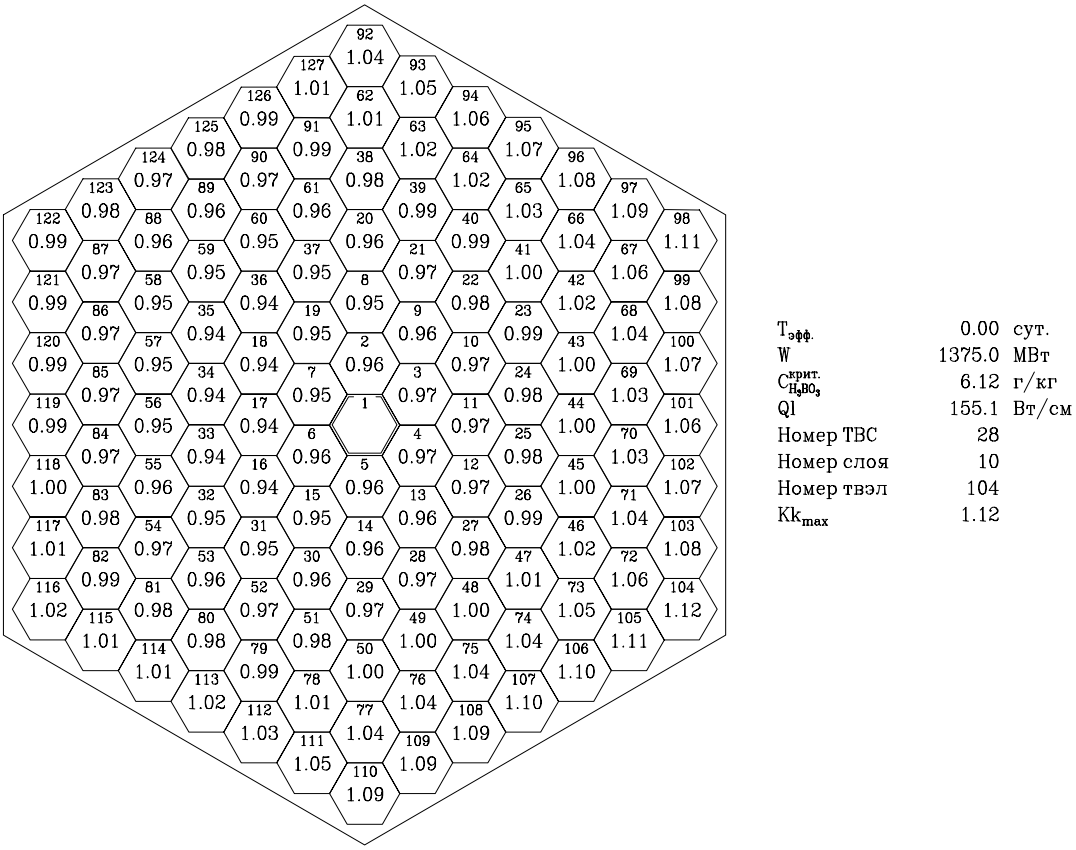


Рис.3.2.

Таблица 3.1

Изменение линейной топливной нагрузки на диагональных твэлах №6-116 в процессе эксплуатации

№ твэла	№ слоя	Кампания №15		Кампания №16		Кампания №17		Кампания №18	
		начало	окончание	начало	окончание	начало	окончание	начало	окончание
6 (центр)	21	99.6	176.0	99.0	169.5	113.2	137.2	107.0	164.5
	9	187.3	123.8	187.3	107.1	168.4	151.6	131.8	111.9
16	21	96.7	175.1	97.1	167.9	110.5	134.7	105.5	163.8
	9	185.4	123.2	184.6	106.1	166.1	149.6	130.6	111.4
32	21	100.1	179.5	97.6	169.5	111.0	135.3	106.5	165.2
	9	188.2	125.6	185.5	107.1	167.6	150.9	131.2	112.3
54	21	103.1	187.3	99.5	175.1	113.2	137.9	109.5	168.9
	9	195.5	130.4	190.1	109.5	171.4	154.3	133.7	114.3
82	21	188.5	200.4	103.9	182.3	117.5	143.0	113.7	173.3
	9	206.5	138.2	198.2	113.3	177.5	159.7	137.4	116.7
116 (угловой)	21	116.3	217.8	110.3	191.9	122.9	149.4	118.9	178.4
	9	222.0	149.7	209.9	117.2	185.1	165.0	141.4	119.7

Таблица 3.2

Расчетные значения выгорания по высоте твэлов на момент окончания облучения

№ слоя зоны	Выгорание, МВт·сут/кгU					
	твэл 6	твэл 16	твэл 32	твэл 54	твэл 82	твэл 116
25	19.0	18.7	18.9	19.6	20.6	22.2
24	25.2	24.8	25.1	25.9	27.2	29.1
23	30.3	29.8	30.1	31.1	32.5	34.6
22	33.6	33.3	33.6	34.5	36.1	38.3
21	35.9	35.6	35.9	36.9	38.4	40.7
20	37.8	37.3	37.6	38.7	40.2	42.6
19	39.2	38.7	39.0	40.1	41.9	44.2
18	40.5	40.1	40.5	41.8	43.5	45.8
17	41.5	41.2	41.5	42.7	44.6	47.0
16	42.3	41.9	42.3	43.5	45.4	47.9
15	48.8	42.2	42.8	44.0	45.9	48.2
14	43.1	42.5	43.1	44.3	46.2	48.6
13	43.3	42.8	43.3	44.5	46.5	48.8
12	43.5	43.1	43.5	44.7	46.7	49.0
11	43.7	43.3	43.7	44.8	46.8	49.2
10	43.8	43.4	43.8	45.0	46.9	49.3
9	43.8	43.4	43.8	45.0	47.0	49.6
8	43.8	43.4	43.8	45.0	47.0	49.6
7	43.7	43.3	43.7	44.9	46.8	49.4
6	43.3	42.7	43.3	44.4	46.4	48.9
5	42.1	41.7	42.1	43.4	45.2	47.8
4	40.1	39.7	40.1	41.4	43.2	45.8
3	36.7	36.2	36.7	37.9	39.6	42.1
2	30.7	30.3	30.7	31.7	33.4	35.7
1	22.0	21.8	22.1	22.8	24.2	26.0

4. Анализ результатов неразрушающих послереакторных исследований твэлов ТВС №13626135

В данном разделе кратко изложены результаты исследований состояния отдельных узлов ТВС №13626135, а также результаты неразрушающего контроля характеристик четырех твэлов №№65,67,68,69. .Более подробно результаты послереакторных исследований твэлов ТВС приведены в работе [4].

Визуальный осмотр ТВС и твэлов

Визуальный осмотр показал удовлетворительное состояние отдельных ее элементов. Каких-либо замечаний по состоянию верхней головки и хвостовика ТВС не обнаружено. Все циркониевые дистанционирующие решетки сохранили целостность и обеспечивали надежную фиксацию пучка твэлов. Оболочки твэлов имели преимущественно темный цвет с наличием контрастных белесых разводов (рис.4.1). При осмотре состояния оболочек в области расположения ДР обнаружены следы взаимодействия с пуклевками (рис.4.2), которые представляли собой вытянутые в продольном направлении серо-белые пятна шириной ~2 мм и длиной ~10 мм. Аномалий в состоянии верхних и нижних сварных соединений твэлов при визуальном осмотре не обнаружено.

Контурные разводы на поверхности твэлов со стороны 4 грани в районе ДР8

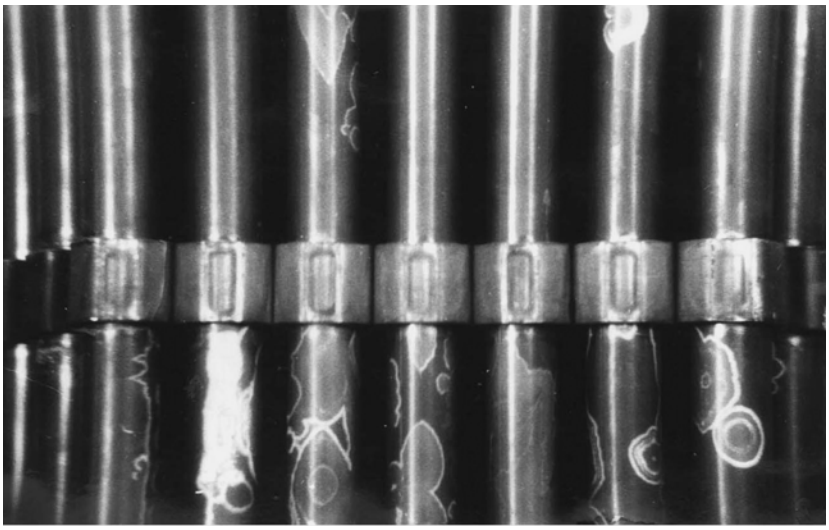


Рис.4.1.

Следы взаимодействия оболочки твэла с ДР

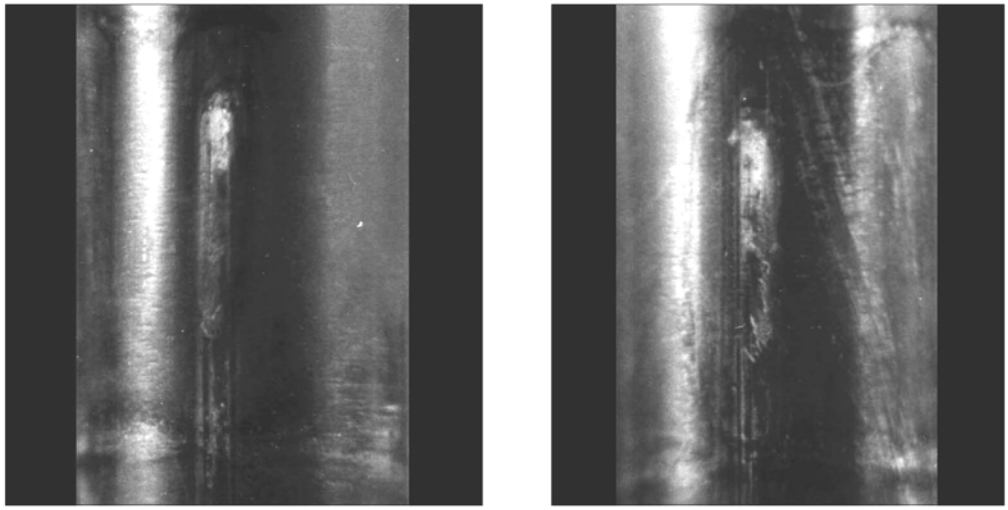


Рис.4.2

Измерение длины

Удлинение твэлов определялось по методике, изложенной в работе [5]. Погрешность измерения не превышала ±0.5 мм. На рис.4.3 и 4.4 приведены данные по удлинению всех твэлов сборки. Среднее удлинение твэлов ТВС №13626135 составляло 6.06 мм ($\Delta L/L$ = 0.24%). Минимальное удлинение равнялось 4.05 мм (0.16%), максимальное - 7.64 мм (0.30%).

Картограмма удлинений твэлов ТВС №13626135

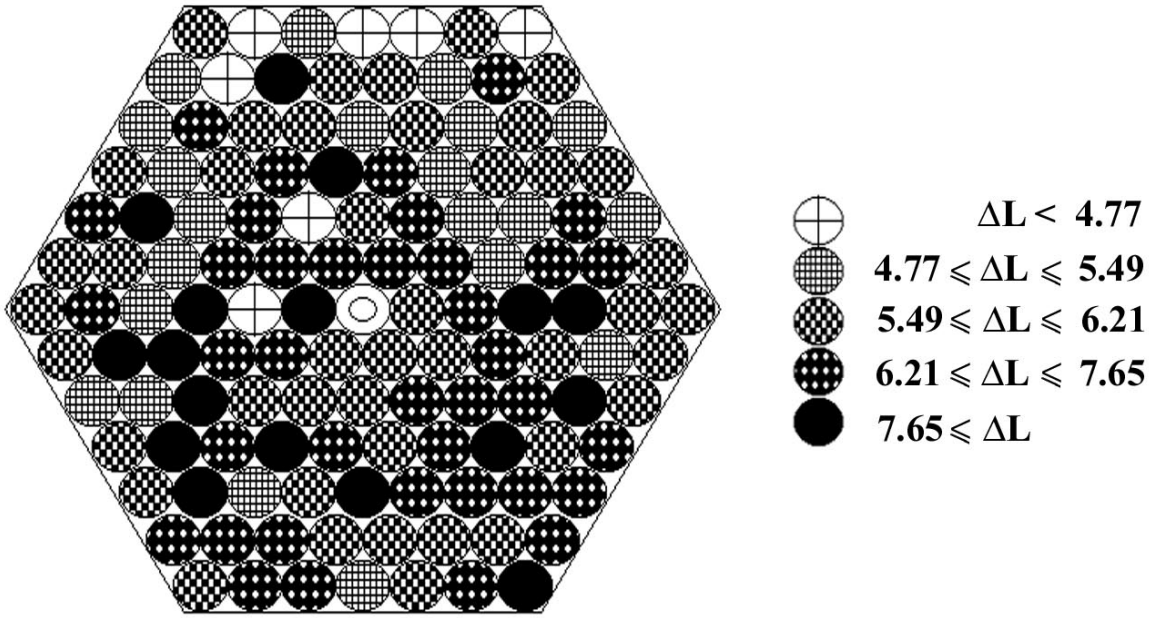


Рис.4.3

Гистограмма удлинений твэлов ТВС №13626135

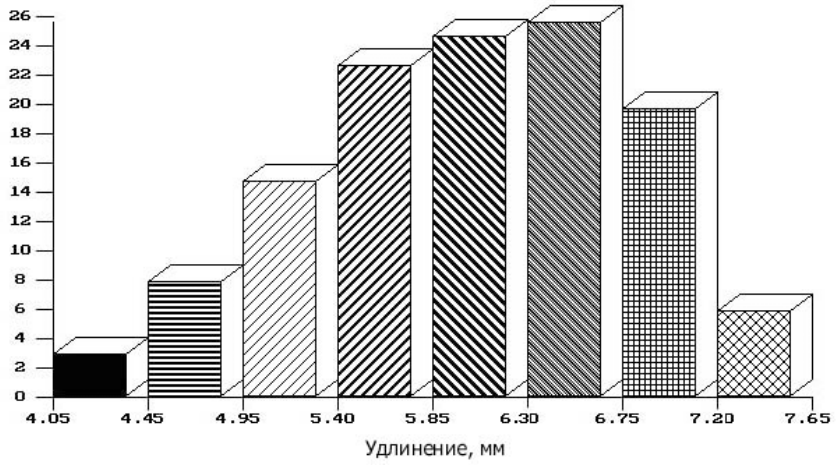


Рис.4.4

Удлинения отобранных твэлов №№ 65, 67, 68, 69 составили:

- для твэла 65 удлинение –6.30 мм, относительное удлинение – 0.25 %;
- для твэла 67 удлинение –7.64 мм, относительное удлинение – 0.30 %;
- для твэла 68 удлинение –5.98 мм, относительное удлинение – 0.24 %;
- для твэла 69 удлинение –6.16 мм, относительное удлинение – 0.24 %.

Из анализа представленных данных следует, что удлинение отобранных твэлов (5.98-7.64 мм) не выходит за пределы увеличения длины оболочечных труб твэлов ТВС №13626135 (4.05-7.64 мм).

Профилометрия и вихретоковая дефектоскопия оболочек

Погрешность измерения диаметра оболочек твэлов с помощью контактного профилометра не превышала ±0.02 мм. Изменение диаметра рассчитывалось как разность между средними значениями диаметров в районе газосборника (48-70 мм от верха твэла) и на участке активной зоны (800-2000 мм). Полученные результаты представлены в табл.4.1.

Характер изменения значений диаметра по длине твэлов №№ 65, 67, 68, 69 представлен на рис.4.5.

ВТ-дефектоскопия твэлов показала отсутствие значимых дефектов на оболочке. Незначительные по амплитуде ВТ-сигналы наблюдались на участках, совпадающих с координатами расположения ДР.

Гамма-спектрометрия твэлов

Гамма-спектрометрические исследования твэлов проводились с целью получения данных по распределению продуктов деления и выгорания топлива по высоте твэлов. В табл.4.2 представлены экспериментальные значения коэффициента аксиальной неравномерности (Kz) накопления долгоживущего продукта деления ^{137}Cs, а также максимальное и среднее выгорание топлива в твэлах сборки.

Таблица 4.1

Диаметры оболочек твэлов ТВС №13626135

N твэла	Средний диаметр на участке газосборника, мм	Средний диаметр на участке АЗ, мм	Разность диаметров на участке АЗ и газосборника, мм
001	9.10	9.06	-0.04
004	9.11	9.07	-0.04
007	9.11	9.06	-0.05
009	9.11	9.07	-0.04
014	9.11	9.06	-0.05
018	9.10	9.05	-0.04
022	9.11	9.07	-0.03
026	9.10	9.06	-0.05
028	9.09	9.05	-0.04
031	9.11	9.06	-0.04
039	9.10	9.07	-0.03
041	9.11	9.07	-0.04
051	9.11	9.07	-0.05
052	9.09	9.06	-0.04
058	9.12	9.07	-0.05
059	9.09	9.05	-0.04
060	9.10	9.06	-0.04
061	9.09	9.04	-0.05
062	9.11	9.07	-0.04
063	9.10	9.05	-0.06
064	9.11	9.07	-0.04
065	**9.10**	**9.07**	**-0.04**
066	9.11	9.06	-0.04
067	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
068	**9.10**	**9.06**	**-0.04**
069	**9.09**	**9.05**	**-0.03**
075	9.10	9.07	-0.03
076	9.11	9.06	-0.05
086	9.10	9.07	-0.04
088	9.13	9.08	-0.05
090	9.09	9.05	-0.04
096	9.09	9.04	-0.05
099	9.10	9.05	-0.05
105	9.09	9.05	-0.04
109	9.09	9.03	-0.05
112	9.12	9.08	-0.04
113	9.10	9.07	-0.03
118	9.10	9.06	-0.04
120	9.12	9.07	-0.05
126	9.13	9.07	-0.06
Минимум	9.09	9.03	-0.06
Максимум	9.13	9.08	-0.03
Среднее	9.10	9.06	-0.04
СКО	0.011	0.011	0.006

На рис.4.6 приведены распределения среднего выгорания топлива в диагональных твэлах ТВС. Радиальный коэффициент неравномерности выгорания в сборке (K_r) равен 1.15. Максимальное выгорание топлива, достигнутое ТВС №13626135 имеет твэл №69 с значением выгорания 49.3 МВт·сут/кгU. Выгорание в твэле №65 имеет минимальное значение, а твэлы №67 и №68 имеют промежуточные значения выгорания. Распределение выгорания по периметру ТВС практически равномерное.

Распределение величины диаметра по длине четырех твэлов

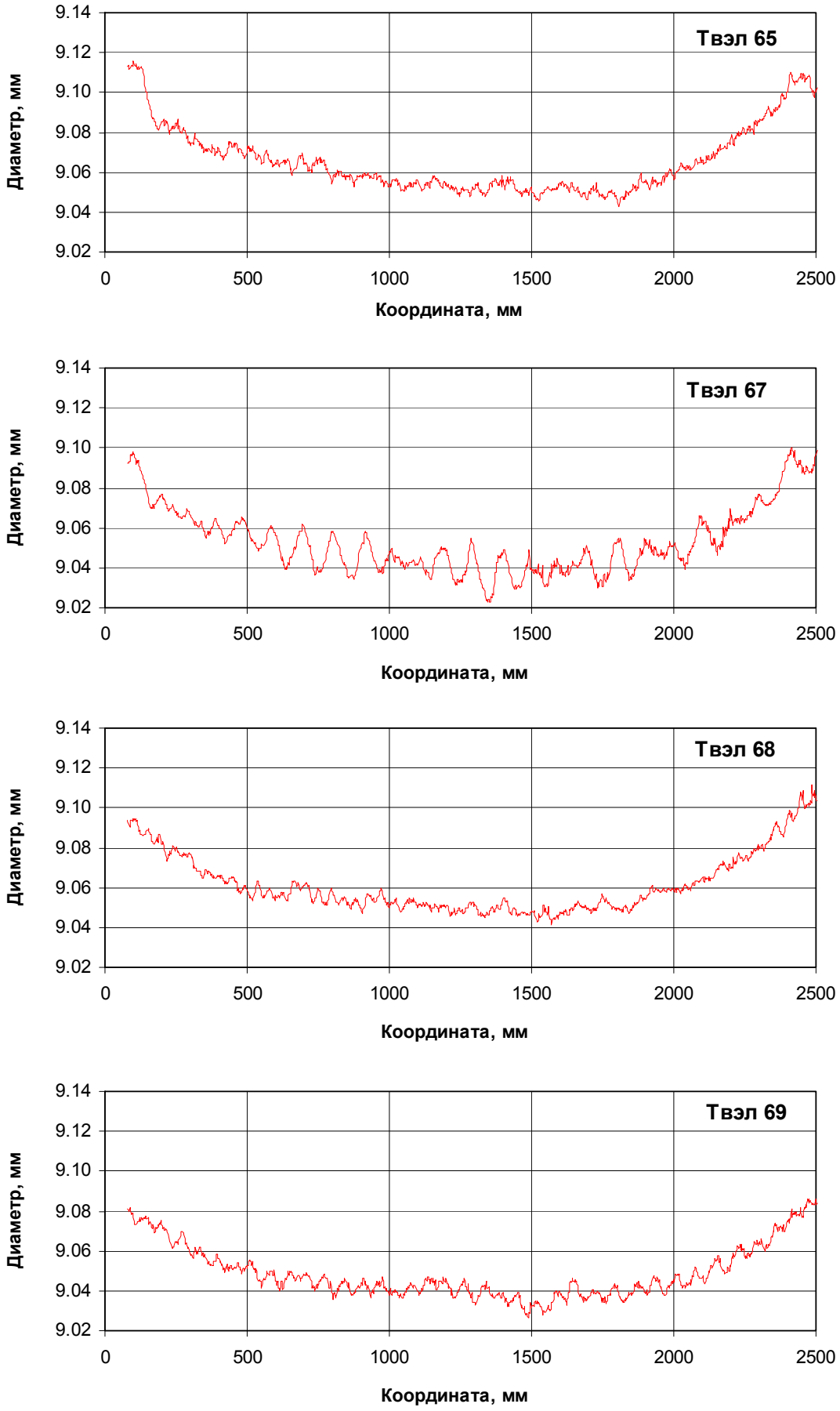


Рис.4.5

Таблица 4.2

Максимальное и среднее выгорание топлива и коэффициенты (K_z) неравномерности распределения продуктов деления по длине твэлов ТВС 135

N твэла	Максимальное выгорание, МВт·сут/кгU	Kz (^{137}Cs)	Среднее выгорание, МВт·сут/кгU
1	48.4	1.16	41.6
7	48.2	1.16	41.5
9	45.1	1.17	38.6
14	45.0	1.16	38.7
18	43.1	1.16	37.0
22	43.2	1.16	37.1
28	42.2	1.17	36.1
31	42.5	1.16	36.5
39	42.2	1.16	36.2
41	42.7	1.16	36.8
51	43.2	1.17	36.9
52	43.2	1.16	37.1
58	48.7	1.15	42.3
59	45.8	1.16	39.3
60	43.9	1.16	37.7
61	42.6	1.16	36.6
62	42.8	1.16	36.8
63	43.8	1.16	37.6
64	43.5	1.16	37.4
65	**42.3**	**1.16**	**36.4**
66	42.5	1.16	36.5
67	**43.8**	**1.16**	**37.6**
68	**45.7**	**1.16**	**39.3**
69	**49.3**	**1.17**	**42.2**
75	43.3	1.16	37.3
76	43.6	1.17	37.4
86	42.6	1.16	36.6
88	42.4	1.17	36.1
96	42.8	1.16	36.8
99	42.6	1.17	36.6
105	44.4	1.16	38.2
109	43.3	1.17	37.2
113	45.7	1.16	39.3
118	44.8	1.16	38.5
120	49.1	1.15	42.8
126	47.9	1.16	41.4
Минимальное	42.2	1.15	36.1
Максимальное	49.3	1.17	42.8
Среднее	44.3	1.16	38.1
СКО	2.18	0.005	1.97

Распределение среднего выгорания в твэлах по диагональным направлениям ТВС №13626135

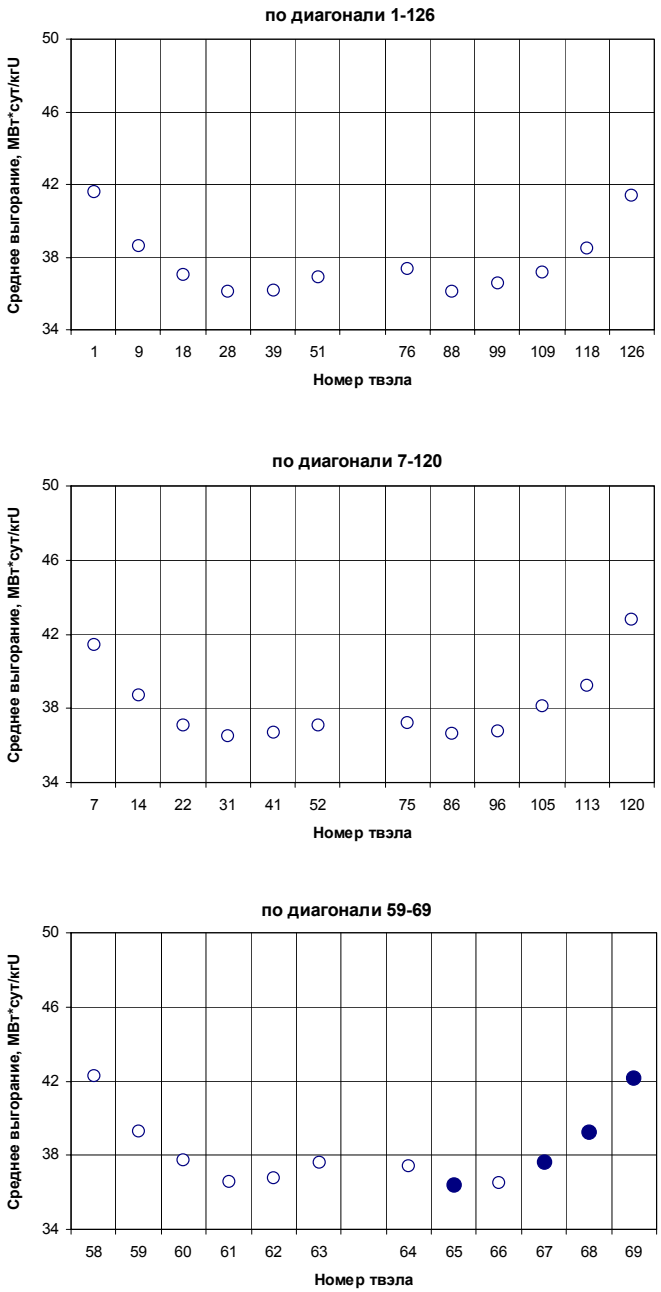


Рис.4.6

Количество и состав газа под оболочкой

Содержание газообразных продуктов деления (ГПД) под оболочкой твэлов определялось двумя методами. Неразрушающим гамма-спектрометрическим методом определялось содержание ГПД по интенсивности гамма-излучения ^{85}Kr в газовой полости. В табл.4.3 приведены данные о скоростях счета излучения продуктов деления и активации оболочки в свободных объемах твэлов №№ 65, 67, 68, 69. Из представленных данных видно, что наибольшее газовыделение наблюдается в угловых твэлах.

Таблица 4.3

Скорость счета гамма-излучения продуктов деления и продуктов активации оболочки в газосборниках твэлов ТВС №13626135, имп/с

№ твэла	^{85}Kr Eγ=513 кэВ	^{134}Cs Eγ=604 кэВ	^{137}Cs Eγ=661 кэВ	^{94}Nb Eγ=871 кэВ
65	17.4	6.0	64.1	16.1
67	14.8	4.4	36.2	14.6
68	14.3	5.4	60.7	12.7
69	65.9	5.4	49.6	12.6

Параметры газов под оболочкой твэлов измерялись на установке лазерного прокола. Отобранный при проколе газ анализировался масс-спектрометрическим методом. Результаты по определению количества и состава газов под оболочкой твэлов ТВС №13626135 представлены в табл.4.4. Как видно из представленных данных, максимальный выход ГПД из топлива имели угловые твэлы. Для остальных твэлов выход ГПД примерно был одинаков и значительно ниже выхода для угловых твэлов.

На основании расчетных данных, приведенных в работе [3], можно оценить предельное значение линейной тепловой нагрузки, при достижении которой происходит интенсификация выхода ГПД, обусловленная термической диффузией. Расчетные значения линейной тепловой нагрузки на угловом твэле (№116) изменялись от ~220 Вт/см в 15-м ТЦ до ~178 Вт/см в 18-м ТЦ. Для остальных твэлов линейные тепловые нагрузки находились соответственно от ~187 Вт/см в 15-м ТЦ до ~160 Вт/см в конце облучения. Исходя из этих данных, можно предположить, что предельная линейная тепловая нагрузка, при которой начинается интенсификация выхода ГПД, находится в диапазоне ~195÷210- Вт/см.

Таблица 4.4

Количество и состав газов под оболочкой твэлов ТВС 135

N твэла	Выгорание МВт*сут/кгU	Свободный объем твэла, $см^3$	Объем газа при н.у. $см^3$	Давление газа в твэле, МПа	Содержание газов, об.%							Газовы-деление из топлива %
					He	N_2	O_2	Ar	CO_2	Kr	Xe	
1	41.6	15.5	164.0	1.06	68.00	<0.20	<0.06	<0.02	<0.02	3.36	28.34	4.88
9	38.6	16.1	134.4	0.83	89.20	<0.13	<0.04	<0.018	<0.014	1.07	9.52	1.43
18	37.0	16.4	128.4	0.78	92.98	<0.08	<0.007	<0.005	<0.002	0.71	6.21	0.93
28	36.1	15.2	120.8	0.79	90.30	<0.20	<0.09	<0.01	<0.0001	1.00	8.40	1.22
39	36.2	15.9	121.1	0.76	91.60	<0.18	<0.08	<0.002	<0.0001	0.85	7.30	1.06
51	36.9	16.1	131.4	0.82	92.40	<0.28	<0.10	<0.001	<0.0001	0.72	6.50	1.01
76	37.4	16.1	130.2	0.81	93.60	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	0.56	5.69	0.85
88	36.1	16.6	131.5	0.79	93.40	<0.18	<0.03	<0.02	<0.006	0.68	5.68	0.90
99	36.6	15.4	120.5	0.78	94.90	<0.22	<0.05	<0.001	<0.0001	0.50	4.33	0.62
109	37.2	16.5	134.1	0.81	94.10	<0.29	<0.09	<0.001	<0.0001	0.57	4.95	0.77
118	38.5	15.9	127.9	0.80	94.80	<0.12	<0.03	<0.002	<0.0001	0.52	4.52	0.65
120	42.8	14.9	169.0	1.13	65.20	<0.13	<0.03	<0.001	<0.0001	4.14	30.50	5.31
126	41.4	15.5	136.8	0.88	83.40	<0.12	<0.05	<0.001	<0.0001	1.73	14.70	2.11
65	**36.40**	**15.5**	**134.2**	**0.88**	**90.13**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.95**	**8.89**	**1.44**
67	**37.60**	**15.2**	**125.7**	**0.84**	**91.75**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**0.80**	**7.43**	**1.09**
68	**39.3**	**15.7**	**132.7**	**0.86**	**89.49**	**<0.02**	**<0.005**	**<0.003**	**<0.002**	**1.00**	**9.49**	**1.41**
69	**42.20**	**15.4**	**174.8**	**1.15**	**53.35**	**<0.06**	**<0.01**	**<0.006**	**<0.003**	**3.79**	**42.78**	**7.62**
Max	42.8	16.6	174.8	1.2	94.9					4.1	42.8	7.6
Min	36.1	14.9	120.5	0.8	53.4					0.5	4.3	0.6
Среднее	38.3	15.8	136.3	0.9	86.4					1.4	12.1	2.0
СКО	2.29	0.49	16.57	0.12	12.18					1.20	11.04	2.00

5. Характеристики образцов, отобранных для анализа

В соответствии с техническими условиями отобраны образцы топлива из твэлов ТВС№13626135 для выполнения радиохимических и масс-спектрометрических исследований [6]. С целью получения исчерпывающей информации по изотопному составу топлива в зависимости от выгорания для исследований отобраны образцы из следующих твэлов:

- из углового твэла №69 с максимальным выгоранием топлива 49.3 МВт·сут/кгU для данной ТВС. Максимальное выгорание по высоте твэлов находилось в области с координатами от ~650 мм до 1250 мм от низа твэла;
- из твэла №69 с минимальным выгоранием топлива 42.3 МВт·сут/кгU для вышеуказанной области по высоте;
- твэлы №67 и 68 с промежуточным значением выгорания топлива 43.8 и 45.7 МВт·сут/кгU соответственно.

Вырезка образцов из твэлов выполнялась на отрезном станке с помощью алмазного круга. Положение координаты отбора образцов по длине твэлов определялось с погрешностью ±1 мм. Для радиохимических исследований вырезались образцы длиной ~10 мм.

Схемы разделки твэлов для вырезки образцов приведены на рис.5.1-5.2. Местоположение отобранных образцов по длине твэлов относительно профиля высотного распределения продуктов деления указано на рис.5.3-5.6. Измерения высотного распределения ПД для вырезки образцов проводились на отдельном оборудовании с увеличенным временем экспозиции, чтобы обеспечить представительность результатов по измерению интенсивности излучения Eu-154.

Вырезанные образцы топлива помещались в Al-пеналы, на крышке которых имелись номера. После помещения образца в пенал он закрывался крышкой, которая закреплялась с помощью резьбы для исключения раскрытия пенала. Выпадания топливных таблеток из оболочки или его отдельных фрагментов при вырезке образцов не наблюдалось. Маркировка Al-пеналов с соответствующими образцами приведена в табл.5.1.

Схема вырезки образцов из твэлов №№ 67 и 68 ТВС №13626135

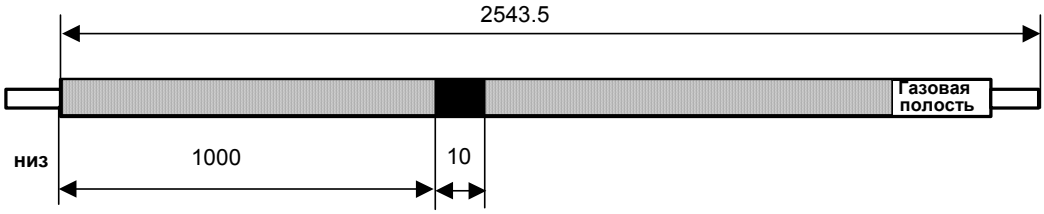


Рис.5.1

Схема вырезки образцов из твэлов №№ 65 и 69 ТВС №13626135

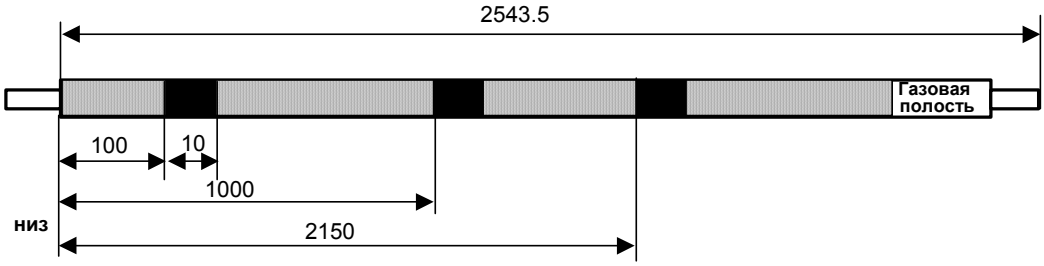


Рис.5.2

Распределение продуктов деления по длине твэла № 65 ТВС №13626135 (коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

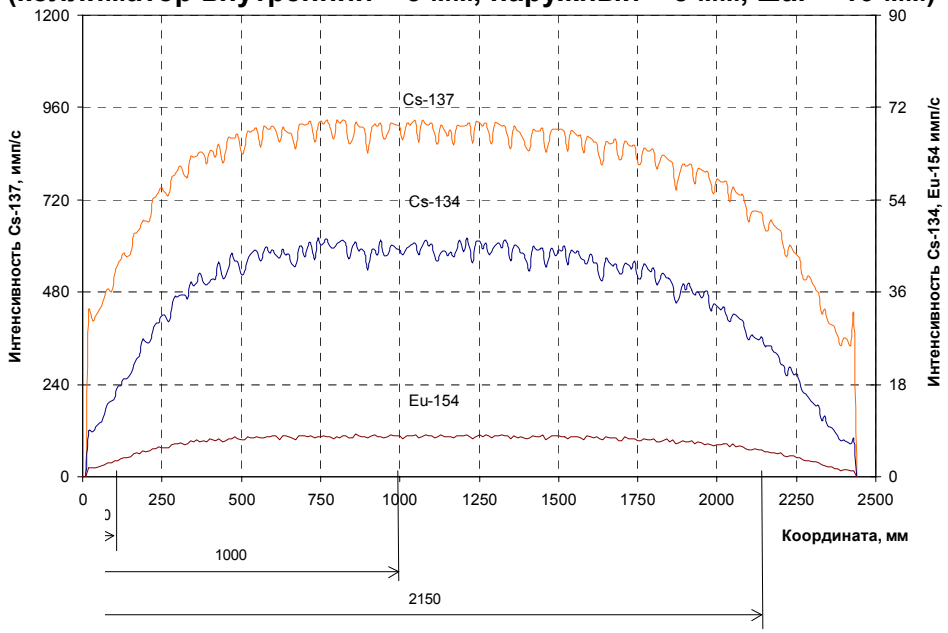


Рис.5.3

Распределение продуктов деления по длине твэла № 67 ТВС №13626135 (коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

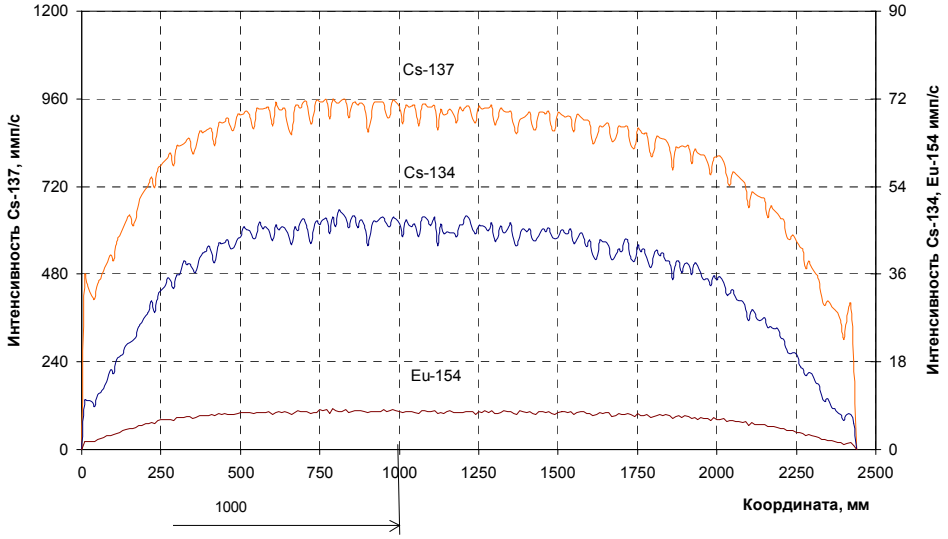


Рис.5.4

Распределение продуктов деления по длине твэла № 68 ТВС №13626135 (коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

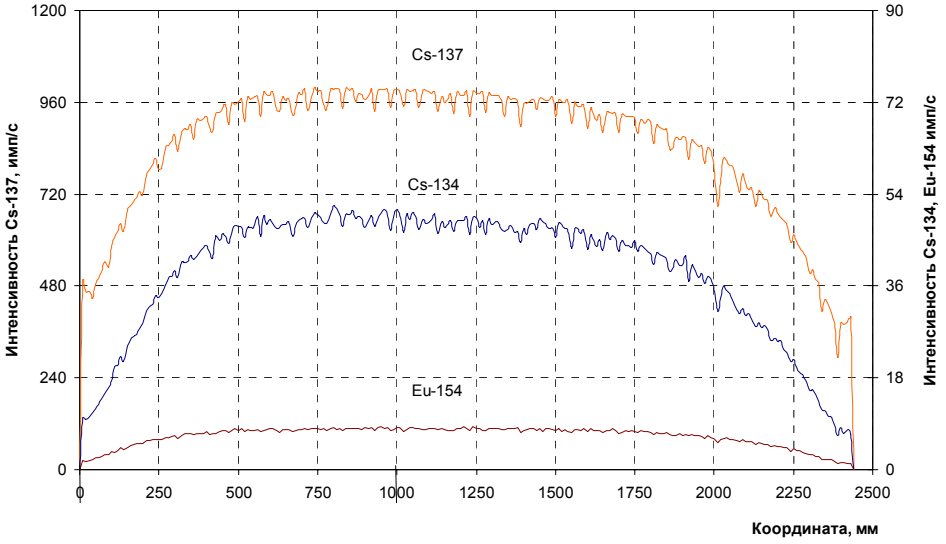


Рис.5.5

Распределение продуктов деления по длине твэла № 69 ТВС №13626135 (коллиматор внутренний – 3 мм, наружный – 5 мм, шаг – 10 мм)

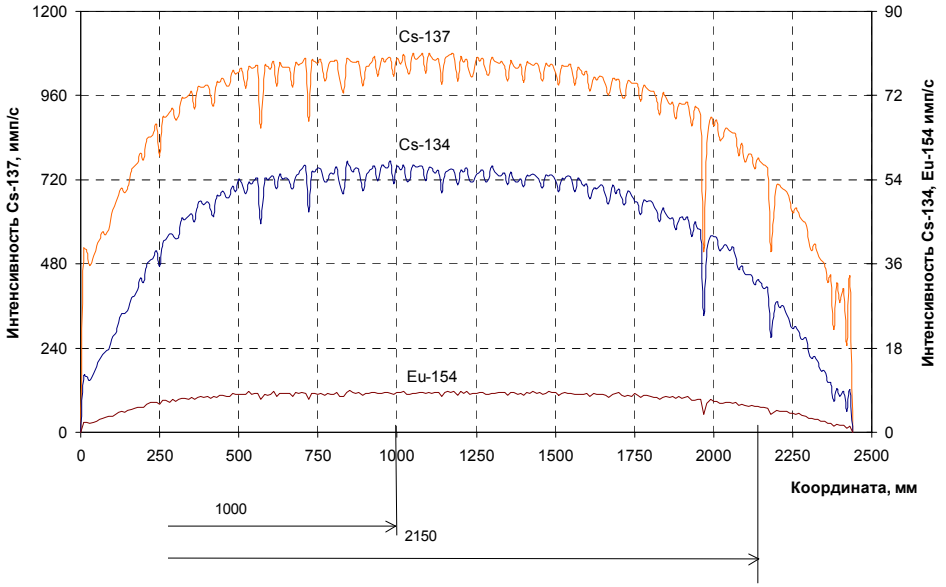


Рис.5.6

После отбора все образцы топлива отправлены для выполнения работ по растворению и для дальнейших радиохимических и масс-спектрометрических исследований выгорания и нуклидного состава. Анализ отобранных образцов позволит получить информацию по изотопному составу и содержанию тяжелых атомов и продуктов деления в топливе с выгоранием от ~22 до ~49 МВт·сут/кгU.

Таблица 5.1

Маркировка образцов, вырезанных из твэлов ТВС № 13626135

№ твэла	Координата от низа твэла, мм	№ Al-пенала с образцом топлива
65	100	182
	1000	21
	2150	69
67	1000	149
68	1000	162
69	100	135
	1000	79
	2150	57

6. Определение нуклидного состава и глубины выгорания топлива в образцах

В рамках задачи 6 проекта 2670р предусмотрены исследования нуклидного состава тяжелых атомов, продуктов деления и выгорания в 8-ми образцах облученного топлива твэлов №№65,67,68,69 ОТВС №13626135 ВВЭР-440 НВАЭС разрушающим радиохимическим методом.

Получение таких данных позволит уточнить коды по расчету реактивности отработавшего топлива и с учетом его выгорания устанавливать нормы безопасного хранения и транспортировки ОТВС.

Методики и средства определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива в образцах

Для проведения исследований по определению нуклидного состава тяжелых атомов, продуктов деления и выгорания нами разработана общая схема анализа облученного топлива (рис.6.1). Схема включает в себя следующие процедуры:

- растворение анализируемого образца;
- оценка требуемого в анализ количества раствора;
- проведение радиохимического разделения U, Pu, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Am, Cm и Cs для масс-спектрометрических измерений изотопного состава;
- повторение радиохимического разделения U, Pu, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Am, Cm и Cs в присутствии комплексной метки для измерения количества элементов;
- раздельное выделение Np, Tc, Ag, Mo, Ru, Rh и Pd по отдельным методикам.

Подробное описание процедур и методик выполнения радиохимического анализа топлива изложено в работе [7].

Основные процедуры выполнения радиохимического анализа состояли из следующих этапов:

Растворение образца

Образец облученного топлива массой от 2 до 10 г помещают в коническую колбу объемом 150-200 см^2. Растворение проводят раствором азотной кислоты с концентрацией 8 моль/л с добавлением плавиковой кислоты (0.1 моль/л) при слабом кипячении раствора.

Радиометрические измерения

После растворения образца из исходного раствора отбирается проба на определение суммарной α-активности и измерения α-, X-, γ-спектров. По результатам измерений оценивается количество раствора, необходимого для проведения анализа.

Общая схема анализа облученного топлива

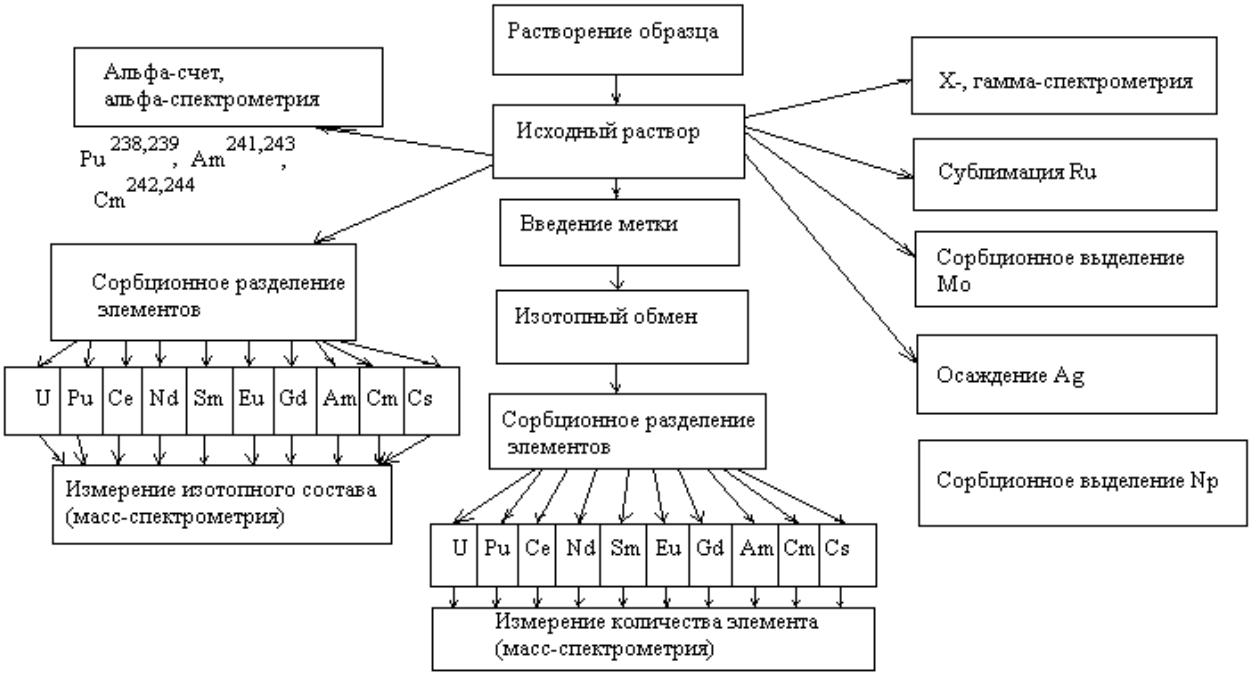


Рис.6.1

При выполнении работы для идентификации и количественного определения радионуклидов использовались ядерно-физические методы анализа: полупроводниковая α-, X-, γ-спектрометрия. Для калибровки спектрометров ядерного излучения использовались комплекты образцовых спектрометрических альфа- (ОСАИ) и гамма- (ОСГИ) источников. В табл.6.1 приведены схемы, тип и константы радиоактивного распада радионуклидов, которые еще присутствуют в облученном топливе на начало проведения работ по радиохимическому анализу.

Радиохимический анализ

Выделение и очистка элементов из исходного раствора образцов топлива выполнялись с использованием следующих физико-химических методов:

- для выделения урана, нептуния, плутония, редкоземельных продуктов деления, молибдена – комбинацию анионообменного и экстракционно-хроматографического методов;
- для выделения рутения сублимационный;
- для выделения серебра осадительный;

На рис.6.2 приведена схема радиохимического выделения урана, плутония, америция, кюрия, цезия, церия, неодима, самария, европия, гадолиния. Количественное определение содержания указанных элементов проводится методом изотопного разбавления с масс-спектрометрическим окончанием. Определение содержания нептуния, молибдена, рутения, серебра, технеция, родия и палладия выполняется с помощью специальных комплексных методов.

Таблица 6.1

Ядерно-физические характеристики исследуемых изотопов

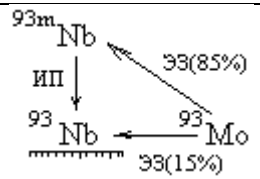
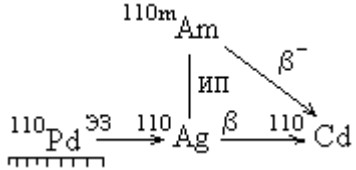
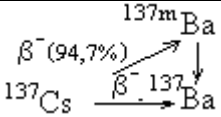
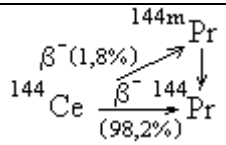
N/N	Изо-топ	Период полураспада	Тип распада	Энергии и интенсивности X-, γ-линий	Схема распада	Электрон.-физич. приборы
1	Mo^{93} ↓ЭЗ Nb^{93m}	$4*10^3$лет 13,6 лет	ЭЗ(100%) ИП	30,7 кэВ – 0,000503(19)% КХ16,86 кэВ – 48%		X-спектрометр, Ge-ОЧГ
2	Tc^{99}	$2,11*10^5$ лет	β^- (100%)	89,6 кэВ – 0,00065%		γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
3	Ag^{110m}	250 сут	β^- (98,6%)	658 кэВ – 94,2% 885 кэВ – 76,4% 938 кэВ – 32,4% 1384 кэВ – 26,8%		γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
4	Cs^{137}	30 лет	β^- (100%)	662 кэВ – 85,1% КХ 33 кэВ – 6,9 %		γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
5	Ce^{144} ↓ Pr^{144}	284,3 сут	β^- (100%)	КХ 36,8 кэВ – 9,1% 80 кэВ – 1,6% 133,5 кэВ – 11,1%		γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
6	Sm^{151}	90 лет	β^- (100%)	21,5 кэВ – 0,0314%		X-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
7	Eu^{154}	8,5 лет	β^- (~100%)	КХ 44 кэВ – 20,3% 123 кэВ – 40,5% 722 кэВ – 19,7% 1004 кэВ – 17,35% 1274 кэВ – 35,5%		γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50

Таблица 6.1(продолжение)

N/ N	Изо-топ	Период полураспада	Тип распада	Энергии и интенсивности X-, γ-линий	Схема распада	Электрон.-физич. приборы
8	Ru^{106} ↓ Rh^{106}	368,2 сут 29,9 с	β^- (100%) β^- (100%)	511,8 кэВ – 20,6% 622,1 кэВ – 9,94% 1050 кэВ – 1,48%	$^{106}Ru \xrightarrow{} {}^{106}Rh$	γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
9	Rh^{101}	3,3 лет	ЭЗ	КХ 19,64 кэВ – 80,8% 127 кэВ – 75% 198,4 кэВ – 79% 325,4 кэВ – 17%	$^{101}Ru \xleftarrow{ЭЗ} {}^{101}Ru$	γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
10	Ag^{108m}	127 лет	ЭЗ (92,3%) ИП(7,7%)	80 кэВ – 5,9% 434 кэВ – 88% 614,4 кэВ – 92,5%	$^{108m}Ag \xrightarrow{(7,7\%)\ ИП} {}^{108}Ag$; $^{108}Ag \xrightarrow{ЭЗ} {}^{108}Pd$; $^{108}Ag \xrightarrow{\beta^-} {}^{108}Cd$	γ-спектрометр, Ge(Li), DГDK-50
11	Gd^{150}	$1,79*10^6$ лет	α-распад	КХ Sm – 41 кэВ	$^{150}Gd \xrightarrow{\alpha} {}^{146}Sm$	X-спектрометр, Ge-ОЧГ
12	Pd^{107}	$6,5*10^6$ лет	β^- (100%)	нет γ, КХ Ag – 22,5кэВ	$^{107}Pd \xrightarrow{\beta^-} {}^{107}Ag$	X-спектрометр, Ge-ОЧГ

Схема радиохимического выделения

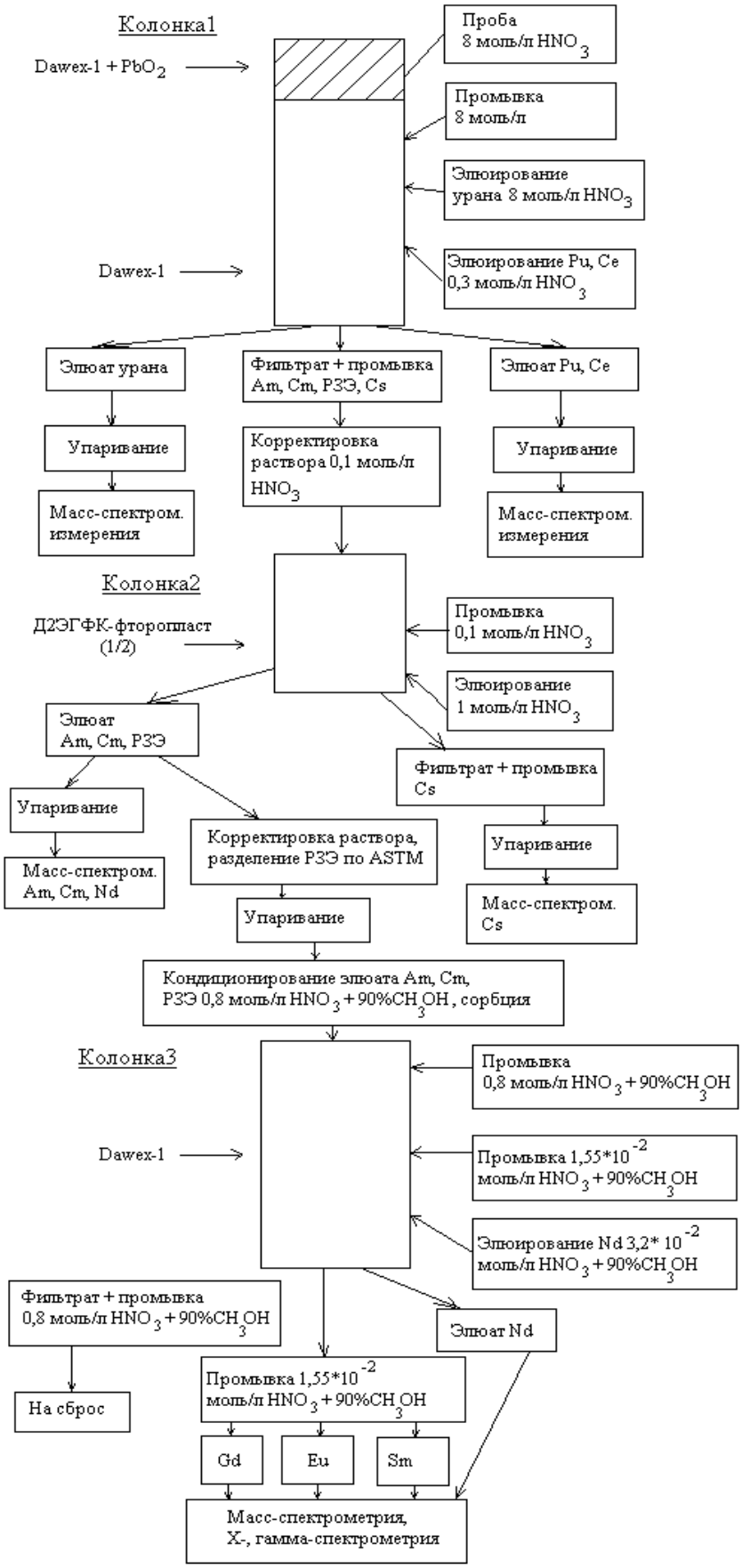


Рис.6.2

Определение глубины выгорания топлива в образцах

Глубину выгорания, рассчитываемую как отношение количества разделившихся за время облучения тяжелых ядер к их полному начальному содержанию в топливе, определяют двумя способами:

- по измеренному изотопному составу топлива до и после облучения с использованием расчетных выражений (метод тяжелых атомов МТА);
- по измеренному отношению числа атомов продукта деления – монитора выгорания к числу тяжелых атомов в растворенном образце топлива (метод накопления продуктов деления ПД).

Используемые в расчетах по МТА значения ядерных констант приведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Используемые ядерные константы.

Параметр	**Число нейтронов на акт деления, ν_i [10]**	**Отношение сечения захвата к сечению деления, α_i [10]**	**$Y_{145+146Nd}$, % [9]**	**Y_{137Cs}, % [9]**	**σ_i, барн [8]**
^{235}U	2.4251(17)	0.1687(7)	6.82±0.15	6.27±0.12	556
^{238}U	1.980(15)	0.089(1)	6.70±0.16	6.33±0.12	
^{239}Pu	2.877(3)	0.5870(16)	5.66±0.55	6.48±0.77	
^{241}Pu	2.937(3)	0.4200(28)	5.79±0.17	6.52±0.39	1550.0
^{236}U	-	-	-	-	85
ε	1.046 [8]				
λ_1,с	$1.53\cdot10^{-9}$[8]				

При определении выгорания по ПД в качестве мониторов использовали продукты деления тяжелых ядер ^{137}Cs, ^{148}Nd, а также суммарное накопление изотопов ^{145}Nd и ^{146}Nd [7]. Эти изотопы не входят в химический состав топлива необлученных твэлов, а их предшественники в цепочки радиоактивного распада являются короткоживущими нуклидами. В расчетах не учитывали влияния радиационного захвата нейтронов на убыль мониторов выгорания вследствие малого значения сечений захвата нейтронов.

Результаты радиохимического исследования образцов отработавшего топлива

Полученный в ходе настоящего исследования экспериментальный материал представлен в табл.6.3–6.13, снабженных необходимыми надписями. Результаты радиохимических анализов приведены к моменту окончания облучения.

Выгорание изотопов ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu и ^{241}Pu, их доли делений в общем выгорании, рассчитанные по МТА, приведены в табл.6.14, в которой также приведены расчетно-экспериментальные значения потока и флюенса нейтронов. При расчете глубины выгорания топлива принимали следующие расчетные значения эффективных выходов мониторов выгорания: $Y_{эф.137Cs}$ = 6.32 % ; $Y_{эф.148Nd}$ = 1,75 %; $Y_{эф.145+146Nd}$= 6.43 % [11].

Таблица 6.3.

Изотопный состав урана (масс.%)

№ образца	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,020(5) *	0,81(3)	0,55(3)	98,62(4)
149	0,020(5)	0,74(1)	0,56(1)	98,68(2)
162	0,020(5)	0,65(2)	0,57(2)	98,76(5)
79	0,010(5)	0,44(2)	0,56(2)	98,99(5)
57	0,011(5)	1,00(5)	0,51(2)	98,48(6)
135	0,025(4)	1,34(2)	0,46(1)	98,18(2)
182	0,014(4)	1,66(2)	0,420(16)	97,91(3)
69	0,018(5)	1,23(3)	0,49(1)	98,26(3)

* - цифры в скобках здесь и далее (для всех таблиц) означают границы общей погрешности результата измерения для доверительной вероятности P=0,95.

Таблица 6.4

Массовое содержание изотопов урана (кг оск./тUисх.)

№ образца	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U
21	0,189(47)	7,65(28)	5,19(28)	932,05(37)
149	0,189(47)	6,989(94)	5,289(94)	931,99(38)
162	0,188(46)	6,12(19)	5,37(19)	930,45(35)
79	0,094(68)	4,13(19)	5,26(19)	930,36(35)
57	0,105(47)	9,52(47)	4,85(19)	937,40(40)
135	0,240(38)	12,87(19)	4,419(96)	943,05(42)
182	0,135(36)	16,06(19)	4,06(19)	945,59(42)
69	0,172(46)	11,77(28)	4,692(95)	940,86(42)

Таблица 6.5

Изотопный состав плутоний (масс.%)

№ образца	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	1,95(19)	54,11(11)	23,04(8)	14,65(12)	6,25(4)
149	1,91(19)	52,36(8)	23,95(8)	14,82(5)	6,96(8)
162	2,35(9)	50,51(11)	24,46(9)	14,89(10)	7,79(10)
79	2,82(10)	49,57(11)	25,92(9)	13,42(10)	8,27(10)
57	1,55(9)	56,84(13)	22,29(14)	14,06(11)	5,26(10)
135	1,02(9)	61,30(9)	21,72(14)	12,34(6)	3,62(5)
182	0,86(9)	67,63(11)	18,72(9)	10,59(10)	2,20(10)
69	1,35(10)	60,44(11)	21,27(9)	13,04(10)	3,90(10)

Таблица 6.6

Массовое содержание изотопов плутония (кг оск./тUисх)

№ образца	^{238}Pu	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu
21	0,227(24)	6,308(14)	2,686(10)	1,708(12)	0,728(5)
149	0,228(23)	6,246(9)	2,857(9)	1,768(20)	0,830(9)
162	0,280(28)	6,019(8)	2,915(12)	1,775(20)	0,928(12)
79	0,329(33)	5,785(7)	3,025(13)	1,566(12)	0,965(14)
57	0,164(16)	6,019(8)	2,361(15)	1,489(12)	0,557(9)
135	0,0884(88)	5,315(10)	1,883(16)	1,070(5)	0,314(4)
182	0,0733(73)	5,769(9)	1,597(8)	0,903(6)	0,1876(85)
69	0,143(14)	6,408(11)	2,255(13)	1,382(12)	0,413(11)

Таблица 6.7

Изотопный состав америция и кюрия (масс.%).

№ образца	^{241}Am	^{242m}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm
21	30,96(10)	0,69 (1)	68,34(10)	93,3(46)	6,16(12)	0,54(7)
149	31,98(8)	0,52(1)	67,51(8)	95,4(47)	4,11(11)	0,49(8)
162	36,73(12)	0,20(5)	63,07(12)	94,0(47)	5,55(11)	0,45(8)
79	37,84(10)	0,24 (1)	61,92(10)	94,4(47)	5,28(11)	0,32(8)
57	34,84(5)	0,660(9)	64,50(8)	97,3(48)	2,7(5)	-
135	47,53(7)	1,060(9)	51,41(7)	95,82(48)	3,69(6)	0,49(7)
182	63,74(12)	1,480(7)	34,78(12)	96,16(48)	3,56(7)	0,28(4)
69	40,53(10)	0,97(2)	58,50(10)	93,7(47)	5,75(11)	0,55(6)

Таблица 6.8

Массовое содержание изотопов ТПЭ (кг оск./тUисх.)

№ образца	^{237}Np	^{241}Am	^{242m}Am $\cdot 10^3$	^{243}Am	^{244}Cm	^{245}Cm $\cdot 10^2$	^{246}Cm $\cdot 10^4$
21	1,43 (10)	0,0650 (17)	1,45 (10)	0,1435 (87)	0,0718 (36)	0,473 (9)	4,2 (4)
149	1,46 (10)	0,0672 (14)	1,09 (10)	0,1418 (90)	0,0877 (44)	0,378 (7)	4,5 (4)
162	1,49 (10)	0,0918 (61)	0,50 (6)	0,1576 (63)	0,1222 (61)	0,722 (14)	5,8 (6)
79	1,59 (11)	0,1627 (81)	1,03 (10)	0,266 (13)	0,1888 (94)	1,056 (21)	6,4 (6)
57	1,110 (78)	0,0557 (28)	1,05 (8)	0,1032 (52)	0,0486 (24)	0,135 (3)	-
135	0,780 (56)	0,0380 (19)	0,85 (5)	0,0412 (20)	0,01348 (67)	0,052 (1)	0,68 (7)
182	0,710 (50)	0,0446 (27)	1,04 (10)	0,0243 (12)	0,00675 (33)	0,0250 (5)	0,21 (2)
69	1,030 (71)	0,0486 (24)	1,16 (10)	0,0702 (42)	0,0224 (11)	0,138 (3)	1,32 (13)

Таблица 6.9

Изотопный состав неодима (масс.%)

№ образца	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0,66 (2)	21,65 (8)	23,40 (8)	20,14 (9)	18,42 (12)	10,61 (12)	5,12 (10)
149	0,70 (1)	21,31 (16)	23,75 (13)	20,06 (14)	18,48 (10)	10,60 (13)	5,10 (10)
162	0,72 (1)	20,85 (9)	24,18 (9)	19,93 (6)	18,59 (7)	10,61 (11)	5,12 (10)
79	0,77 (1)	19,76 (9)	25,58 (13)	19,64 (10)	18,86 (10)	10,48 (12)	4,91 (10)
57	0,54 (10)	22,66 (12)	22,80 (8)	20,38 (10)	18,22 (7)	10,49 (11)	4,91 (10)
135	0,48 (1)	24,18 (11)	21,43 (10)	20,64 (12)	17,98 (16)	10,43 (12)	4,86 (10)
182	0,32 (1)	25,54 (9)	20,26 (9)	20,90 (6)	17,78 (7)	10,41 (13)	4,80 (10)
69	0,39 (1)	23,71 (9)	21,79 (13)	20,58 (10)	18,08 (10)	10,53 (11)	4,93 (9)

Таблица 6.10

Массовое содержание неодима (кг оск./тUисх.)

№ образца	^{142}Nd	^{143}Nd	^{144}Nd	^{145}Nd	^{146}Nd	^{148}Nd	^{150}Nd
21	0.0294 (9)	0.965 (9)	1.043 (10)	0.898 (9)	0.821 (8)	0.473 (5)	0.228 (2)
149	0.0318 (9)	0.969 (9)	1.080 (11)	0.912 (9)	0.840 (8)	0.482 (5)	0.232 (2)
162	0.0339 (9)	0.981 (9)	1.137 (11)	0.937 (9)	0.874 (8)	0.499 (5)	0.241 (2)
79	0.0386 (9)	0.992 (10)	1.284 (13)	0.986 (9)	0.947 (9)	0.526 (5)	0.246 (2)
57	0.0206 (6)	0.864 (8)	0.869 (8)	0.777 (8)	0.695 (7)	0.400 (4)	0.187 (2)
135	0.0155 (5)	0.779 (8)	0.690 (7)	0.665 (6)	0.579 (6)	0.336 (3)	0.1570 (15)
182	0.00775 (23)	0.618 (6)	0.490 (5)	0.506 (5)	0.430 (4)	0.252 (2)	0.116 (1)
69	0.0131 (5)	0.797 (8)	0.733 (7)	0.692 (7)	0.608 (6)	0.354 (3)	0.166 (2)

Таблица 6.11

Изотопный состав цезия и церия(масс.%)

№ образца	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	38.93 (14)	3.43 (10)	13.96 (11)	43.68 (18)	43,00 (16)	39,28 (16)	17,71 (10)
149	38.74 (19)	4.25 (10)	13.36 (12)	43.66 (14)	43,01 (45)	39,28 (45)	17,71 (5)
162	39.19 (9)	3.42 (5)	12.79 (7)	44.61 (11)	43,02 (22)	39,29 (22)	17,69 (5)
79	39.37 (10)	3.41 (5)	11.99 (7)	45.23 (11)	42,89 (22)	39,31 (22)	17,80 (5)
57	39.66 (23)	4.27 (5)	14.21 (20)	41.86 (18)	42,89 (20)	39,31 (22)	17,80 (10)
135	39.43 (23)	5.18 (5)	15.17 (20)	40.22 (11)	42,81 (20)	39,27 (22)	17,92 (10)
182	38.63 (9)	4.96 (5)	17.70 (7)	38.71 (11)	42,77 (22)	39,26 (22)	17,97 (10)
69	37.97 (10)	5.97 (5)	15.74 (7)	40.31 (11)	42,89 (22)	39,29 (22)	17,82 (5)

Таблица 6.12

Массовое содержание изотопов цезия и церия (кг оск./тUисх.)

№ образ-ца	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{137}Cs	^{140}Ce	^{142}Ce	^{144}Ce
21	1,328 (46)	0,117 (6)	0,476 (19)	1,490 (50)	1,540 (50)	1,407 (50)	0,634 (51)
149	1,416 (50)	0,155 (7)	0,488 (19)	1,596 (50)	1,558 (50)	1,423 (50)	0,642 (52)
162	1,471 (51)	0,128 (6)	0,480 (18)	1,675 (50)	1,640 (51)	1,498 (60)	0,674 (55)
79	1,462 (50)	0,127 (6)	0,445 (16)	1,680 (67)	1,729 (60)	1,585 (61)	0,718 (56)
57	1,253 (43)	0,135 (6)	0,449 (16)	1,323 (53)	1,285 (53)	1,178 (50)	0,533 (50)
135	1,078 (38)	0,142 (7)	0,415 (17)	1,100 (44)	1,095 (44)	1,004 (50)	0,458 (37)
182	0,848 (34)	0,109 (5)	0,389 (16)	0,850 (40)	0,832 (40)	0,764 (38)	0,350 (35)
69	1,110 (36)	0,174 (8)	0,460 (17)	1,178 (47)	1,149 (46)	1,053 (53)	0,477 (38)

Таблица 6.13

Выгорание топлива (кг оск./т Uисх.)

№ образца	$^{145+146}Nd$	^{148}Nd	^{137}Cs	Среднее взвешенное
21	41,5 (12)	41,55 (83)	41,6 (15)	41,5 (15)
149	41,6 (14)	42,02 (84)	42,1 (16)	41,9 (15)
162	43,8 (15)	44,27 (88)	44,2 (16)	44,2 (14)
79	46,2 (16)	46,24 (94)	46,6 (17)	46,3 (14)
57	36,2 (12)	36,08 (72)	36,4 (14)	36,2 (12)
135	30,25 (91)	30,06 (60)	29,20 (89)	29,90 (91)
182	23,12 (76)	22,65 (45)	23,23 (77)	22,86 (72)
69	31,4 (11)	31,11 (62)	31,9 (11)	31,32 (98)

Таблица 6.14

Выгорание изотопов 235U, 238U, 239Pu и 241Pu,
их доли делений в общем выгорании

Параметр	Твэл №65 Обр. №21		Твэл №67 Обр. №149		Твэл №68 Обр. №162		Твэл №69 Обр. №79.	
	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %
F_5	22,07	53,66	22,55	53,71	23,22	53,03	25,05	54,51
F_8	4,52	11,00	4,62	11,00	4,82	11,02	5,05	11,00
F_9	12,67	30,82	12,83	30,56	13,52	30,89	13,55	29,48
F_1	1,86	4,52	1,98	4,71	2,21	5,06	2,30	5,01
$F_т$	41,12		41,98		43,77		45,95	
Флюенс, см $^{-2}$, 10^{21}	2,70		2,86		3,09		3,995	
Поток, 10^{13}, см $^{-2}$ с $^{-1}$	2,819		2,986		3,229		3,828	
$F_{взв.}$ ПД, кг/т U	41,5		41,9		44,2		46,3	

Продолжение таблицы 6.14

Выгорание изотопов 235U, 238U, 239Pu и 241Pu, их доли делений в общем выгорании

Параметр	Твэл №69. Обр. №57.		Твэл №69. Обр. №135.		Твэл №65 Обр. №182		Твэл №65 Обр. №69.	
	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %	Выгорание кг/т U	Доля делен.q_i, %
F_5	20,75	57,78	17,99	62,41	15,31	64,50	18,75	58,74
F_8	3,92	10,92	3,12	10,83	2,56	10,79	3,48	10,90
F_9	9,91	27,60	6,96	24,15	5,42	22,82	8,70	27,27
F_1	1,33	3,70	0,75	2,61	0,45	1,88	0,98	3,08
$F_т$	35,91		28,82		23,73		31,92	
Флюенс, см $^{-2}$, 10^{21}	2,328		1,794		1,396		1,936	
Поток, 10^{13}, см $^{-2}$ с $^{-1}$	2,429		1,872		1,457		2,021	
$F_{взв.}$ ПД, кг/т U	36,2		29,90		22,86		31,32	

Измерение содержания нуклидов-продуктов деления

При определении содержания нуклидов-продуктов деления выделение фракций отдельных элементов для последующего γ-спектрометрического, спектрофотометрического и масс-спектрометрического анализов, в основном, проводилось в соответствии со схемой и методиками, описанными в работе [7]. Изменения были внесены лишь в методики радиохимического разделения редкоземельных элементов.

Разделение редкоземельных элементов (Nd, Eu, Sm, Gd) проводили на колонках объемом 0,75 мл, заполненных анионитом Дауэкс 1×8 (Serwa) с размером зерен 200-400 меш. Сорбцию Nd, Eu, Sm, Gd проводили из 8 моль/л азотной кислоты в абсолютном метиловом спирте. Разделение Eu, Sm, Gd проводили элюированием раствором $2{,}0\cdot10^{-2}$ моль/л азотной кислоты в абсолютном метиловом спирте, элюирование Nd - раствором $3{,}0\cdot10^{-3}$ моль/л азотной кислоты в абсолютном метиловом спирте. Выделенные фракции Nd, Eu, Sm, Gd упаривали и передавали на масс-спектрометрические измерения изотопного состава.

При определении содержания Gd, Eu и Sm в растворе образца топлива методом изотопного разбавления в качестве меток использовали стандартные растворы этих элементов (комплексная метка [7,11]), приготовленные из образцов природного изотопного состава. Процедуры радиохимического выделения Nd, Eu, Sm, Gd из смеси аликвот раствора образца топлива и стандартных растворов меток для масс-спектрометрического анализа были идентичны использованным при определении изотопного состава этих элементов.

При определении массовой доли ^{95}Mo, ^{101}Ru, ^{109}Ag, ^{105,108}Pd методом изотопного разбавления стандартные растворы меток готовили из образцов молибдена, рутения, серебра и палладия природного изотопного состава. При определении содержания ^{99}Tc стандартный раствор готовили из образца технеция, в котором доля ^{98}Tc составляла 12 %. Образец технеция с таким содержанием ^{98}Tc был получен по реакции (n,2n) при облучении ^{99}Tc в ядерном реакторе.

Однако, несмотря на хорошие аналитические возможности этого метода, данные по содержанию ^{101}Ru являются лишь оценочными. Это связано с тем, что при растворении образцов топлива часть рутения могла быть потеряна вследствие очень высокой летучести этого элемента. Из-за сложности химического состава и, вследствие этого, возникших трудностей химического выделения элементов, наличия большого количества изобар в области масс исследованных нуклидов были сложности в обработке результатов измерений. Поэтому, полученные значения масс ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag, ^{105,108}Pd, считаем также оценочными.

Не определили массовую долю ^{103}Rh, поскольку в природном изотопном составе его доля равна 100% (моноизотоп). Также не были определены ^{242}Cm, ^{243}Cm и ^{244}Pu. ^{242}Cm за время выдержки практически весь распался, так как со времени выгрузки ТВС из реактора до радиохимического анализа топлива прошло более 28 периодов полураспада ^{242}Cm. Содержание ^{243}Cm и ^{244}Pu в топливе образцов было ниже пределов чувствительности методик, использованных при измерении кюрия и плутония.

Результаты измерений, приведенные ко времени окончания облучения, приведены в табл.6.15-6.19, снабженных необходимыми подписями.

Таблица 6.15

Изотопный состав самария (масс.%)

№ образца	147	148	149	150	151	152	154
182	37,84 (12)*	13,33 (8)	0,46 (1)	30,55 (8)	1,67 (2)	12,68 (9)	3,47 (7)
135	34,21 (12)	15,71 (10)	0,40 (1)	32,07 (9)	1,48 (3)	12,30 (8)	3,83 (6)
69	33,48 (14)	16,19 (10)	0,39 (1)	32,38 (8)	1,44 (2)	12,22 (8)	3,90 (6)
57	30,96 (12)	17,84 (11)	0,35 (1)	33,43 (9)	1,31 (2)	11,95 (8)	4,16 (6)
21	28,23 (10)	19,64 (10)	0,31 (1)	34,57 (10)	1,16 (2)	11,67 (8)	4,42 (6)
149	28,02 (12)	19,77 (12)	0,30 (1)	34,66 (8)	1,15 (2)	11,66 (9)	4,44 (7)
162	26,83 (10)	20,55 (12)	0,29 (1)	35,16 (9)	1,09 (2)	11,52 (9)	4,56 (7)
79	25,75 (10)	21,26 (11)	0,27 (1)	35,61 (8)	1,03 (2)	11,41 (9)	4,66 (8)

* - цифры в скобках здесь и далее означают границы абсолютной общей погрешности измерения для доверительной вероятности P=0,95, и относятся к последним значащим цифрам.

Таблица 6.16

Массовое содержание изотопов самария (кг.оск/т Uисх.)

№ образца	147	148	149	150	151	152	154
182	0.2543 (46)	0.0896 (16)	0.00309 (11)	0.2053 (37)	0.01122 (20)	0.0852 (15)	0.0233 (12)
135	0.2565 (47)	0.1178 (25)	0.00299 (11)	0.2405 (40)	0.01110 (20)	0.0922 (16)	0.0287 (15)
69	0.2630 (47)	0.1272 (23)	0.00306 (10)	0.2544 (46)	0.01131 (21)	0.0960 (17)	0.0306 (17)
57	0.2692 (50)	0.1551 (28)	0.00304 (10)	0.2907 (50)	0.01139 (22)	0.1039 (18)	0.0362 (20)
21	0.2776 (50)	0.1932 (33)	0.00305 (10)	0.3399 (55)	0.01148 (25)	0.1148 (20)	0.0435 (22)
149	0.2980 (52)	0.2103 (38)	0.00319 (13)	0.3686 (66)	0.01223 (22)	0.1240 (22)	0.0472 (24)
162	0.2882 (52)	0.2208 (41)	0.00312 (10)	0.3777 (60)	0.01171 (22)	0.1237 (22)	0.0490 (26)
79	0.2804 (51)	0.2315 (42)	0.00294 (10)	0.3878 (70)	0.01122 (20)	0.1243 (22)	0.0507 (25)

Таблица 6.17

Изотопный состав европия (масс.%)

№ образца	151	153	154	155
182	1.87 (2)	81.24 (10)	11.78 (8)	5.11 (7)
135	1.54 (2)	80.46 (10)	13.13 (8)	4.87 (6)
69	1.48 (2)	80.34 (10)	13.38 (9)	4.80 (7)
57	1.24 (2)	79.75 (10)	14.34 (9)	4.67 (7)
21	1.01 (1)	79.10 (10)	15.36 (10)	4.53 (7)
149	0.99 (1)	79.06 (11)	15.40 (10)	4.55 (6)
162	0.88 (1)	78.84 (9)	15.85 (10)	4.43 (6)
79	0.79 (1)	78.58 (10)	16.24 (10)	4.39 (6)

Таблица 6.18

Массовое содержание изотопов европия (кг.оск/т Uисх.)

№ образца	151	153	154	155
182	0.000460 (18)	0.0199 (10)	0.00289 (14)	0.00125 (11)
135	0.000429 (16)	0.0224 (11)	0.00366 (18)	0.00135 (12)
69	0.000409 (16)	0.0222 (11)	0.00370 (18)	0.00133 (12)
57	0.000338 (14)	0.0217 (11)	0.00390 (19)	0.00127 (11)
21	0.000283 (12)	0.0222 (11)	0.00431 (21)	0.00127 (11)
149	0.000268 (12)	0.0214 (11)	0.00416 (21)	0.00123 (11)
162	0.000228 (10)	0.0205 (10)	0.00412 (21)	0.00115 (10)
79	0.000153 (6)	0.0152 (7)	0.00314 (16)	0.00085 (7)

Таблица 6.19

Массовое содержание нуклидов-осколков деления (кг.оск/т Uисх.)

№ об-разца	^{95}Mo	^{99}Tc	^{101}Ru	^{105}Pd	^{108}Pd	^{109}Ag	^{155}Gd
182	0.533 (96)	0.55 (10)	0.531 (96)	0.261 (47)	0.064 (12)	0.0299 (84)	0.000746 (63)
135	0.69 (12)	0.72 (13)	0.70 (13)	0.348 (63)	0.091 (16)	0.038 (11)	0.000960 (82)
69	0.72 (13)	0.75 (14)	0.73 (13)	0.364 (66)	0.099 (17)	0.041 (11)	0.001000 (85)
57	0.78 (14)	0.82 (15)	0.82 (15)	0.439 (79)	0.115 (21)	0.046 (13)	0.001140 (97)
21	0.92 (17)	0.96 (17)	0.98 (18)	0.529 (96)	0.147 (26)	0.054 (15)	0.00134 (12)
149	0.93 (17)	0.96 (17)	0.99 (18)	0.552 (99)	0.155 (28)	0.054 (15)	0.00140 (13)
162	0.97 (17)	1.00 (18)	1.04 (19)	0.59 (11)	0.171 (31)	0.055 (16)	0.00143 (13)
79	1.01 (18)	1.02 (18)	1.08 (19)	0.58 (11)	0.166 (30)	0.051 (14)	0.00142 (13)

7. Анализ результатов исследований содержания нуклидов

Первоначально в топливе присутствуют только два делящихся нуклида – ^{235}U и ^{238}U. Вклад ^{238}U в выгорание незначителен и в исследованном интервале выгораний составляет 10-11%. Содержание ^{235}U с ростом выгорания уменьшается и при выгорании 44,2 кг/т $U_{исх.}$ составляет ~ 17% от начального. С ростом выгорания возрастает доля ^{236}U в топливе. Характер изменения содержания ^{235}U и ^{236}U приведен на рисунке 7.1.

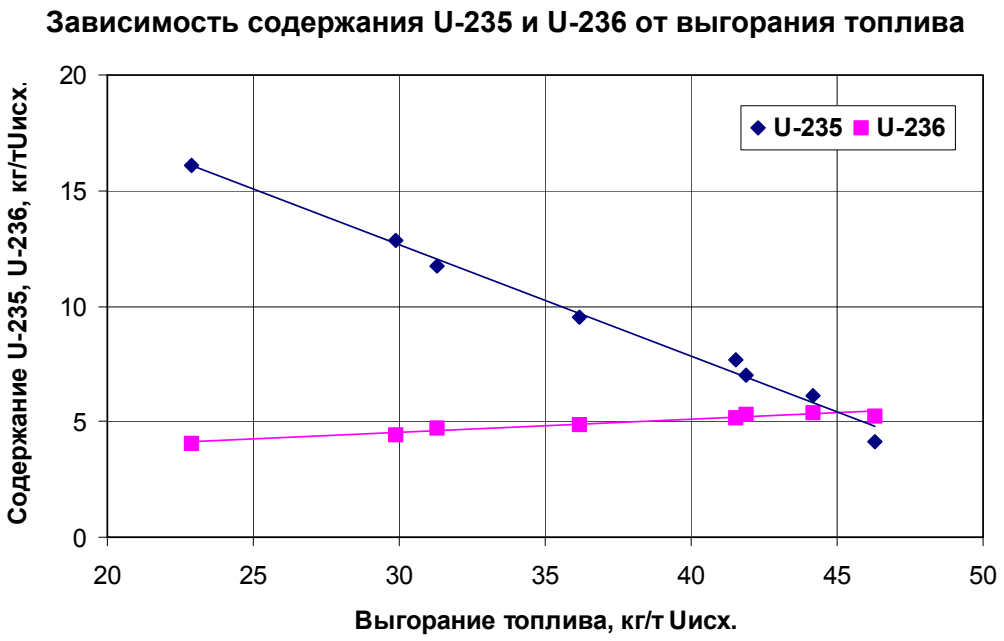


Рис.7.1

Уже при выгораниях ~ 20 кг/т $U_{исх}$ накапливается значительное количество ^{239}Pu, который в дальнейшем становится одним из основных делящихся нуклидов. При выгорании ~ 40 кг/т $U_{исх}$ накопление ^{239}Pu достигает максимального значения ($6 \div 7$ кг/т $U_{исх}$), и при дальнейшем росте плавно уменьшается (рис.7.2). Наряду с ^{239}Pu возрастает содержание и остальных изотопов плутония (рис.7.2, 7.3).

Суммарное накопление изотопов плутония при выгорании ~ 40 кг/т $U_{исх}$ составляет ~12-13 кг/т $U_{исх}$, и при дальнейшем росте выгорания изменяется незначительно. Уменьшение скорости накопления плутония, в первую очередь, происходит за счет увеличения доли поделившегося плутония. Изменение суммы накопившегося и выгоревшего плутония имеет прямолинейную зависимость от выгорания (рис.7.4), что позволяет прогнозировать вклад плутония в выгорание при увеличении продолжительности облучения. При выгорании 46,3 кг/т $U_{исх}$ вклад ^{239}Pu в суммарное выгорание составляет ~30 %, ^{235}U - ~ 54 %, ^{241}Pu - ~5 % (рис.7.5).

Зависимость накопления Pu-239 и Pu-241 от выгорания топлива

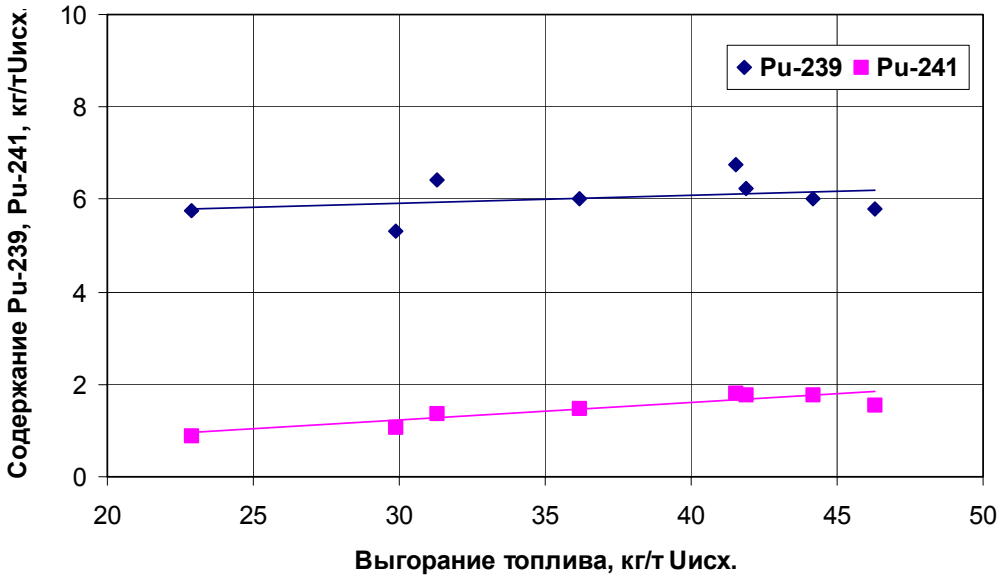


Рис.7.2

Зависимость накопления Pu-240 и Pu-242 от выгорания топлива

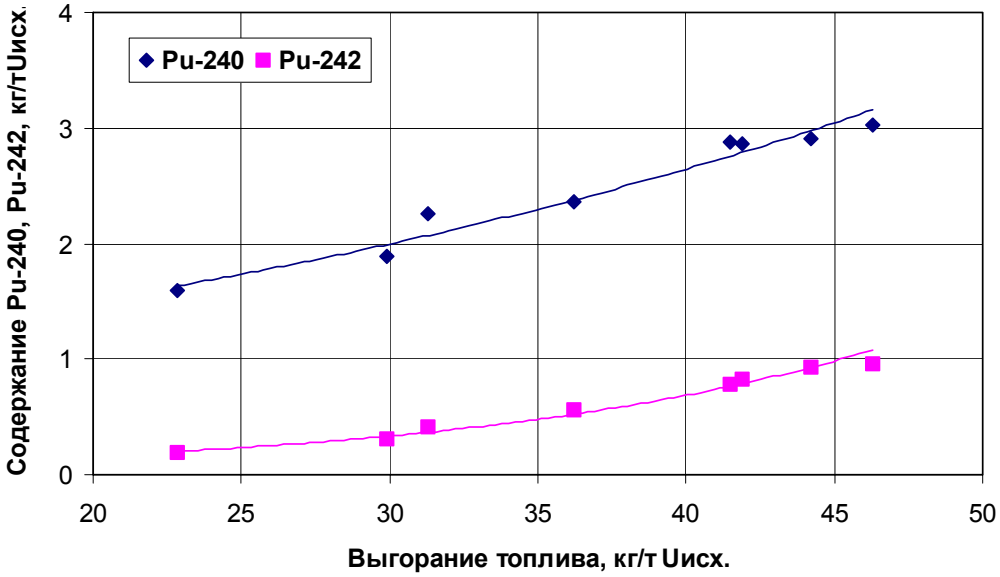


Рис.7.3

Зависимость накопления и выгорания плутония от выгорания топлива

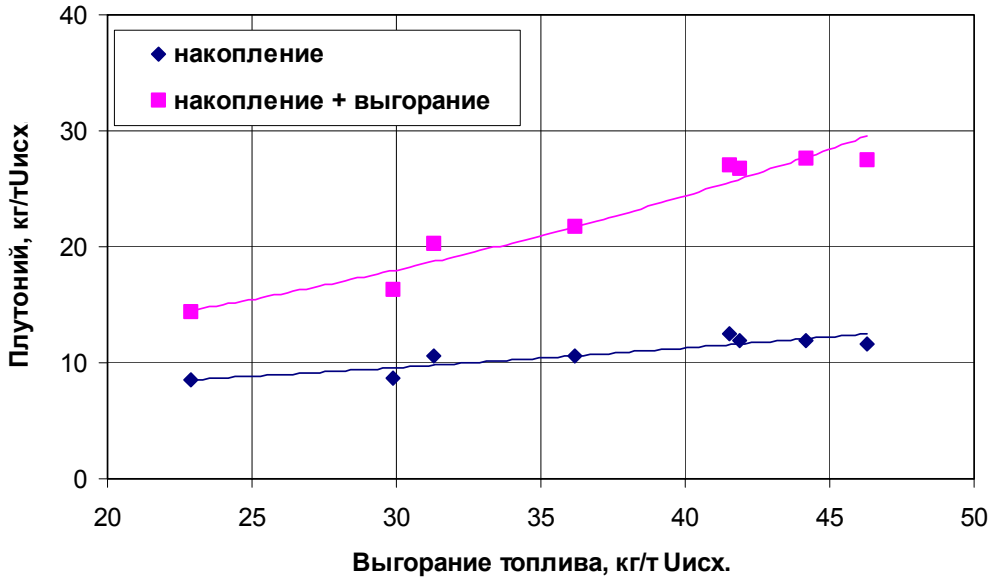


Рис.7.4

Вклад делящихся нуклидов в выгорание топлива

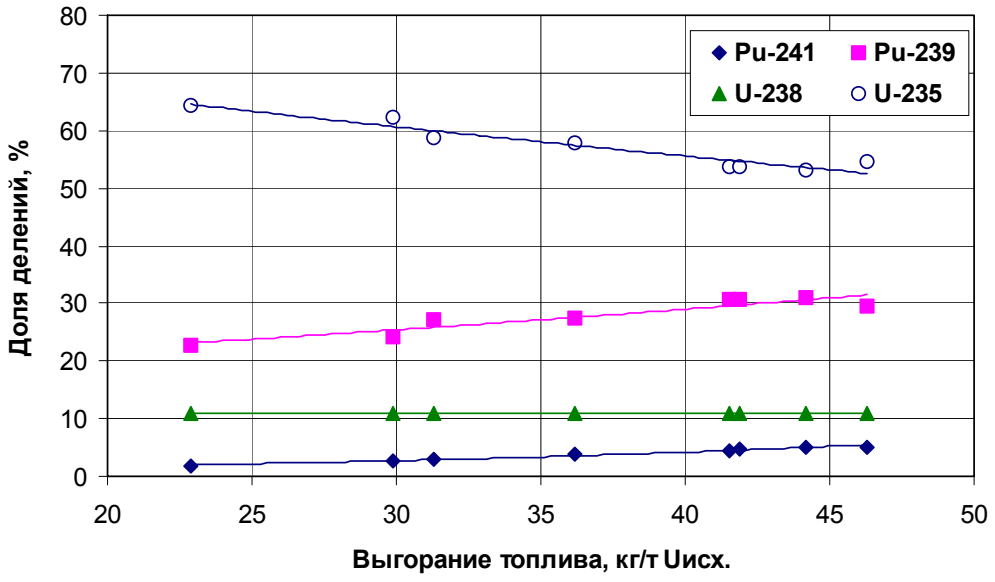


Рис.7.5

При выгораниях выше 35 кг/т $U_{исх}$ заметно возрастает накопление ТПЭ. Так, при выгорании 46,3 кг/т $U_{исх}$ накопление ^{244}Cm составляет ~0,189 кг/т $U_{исх}$, , ^{243}Am - ~0,270 кг/т $U_{исх}$ и ^{237}Np ~ 1,5 кг/т $U_{исх.}$ (рис.7.6, 7.7).

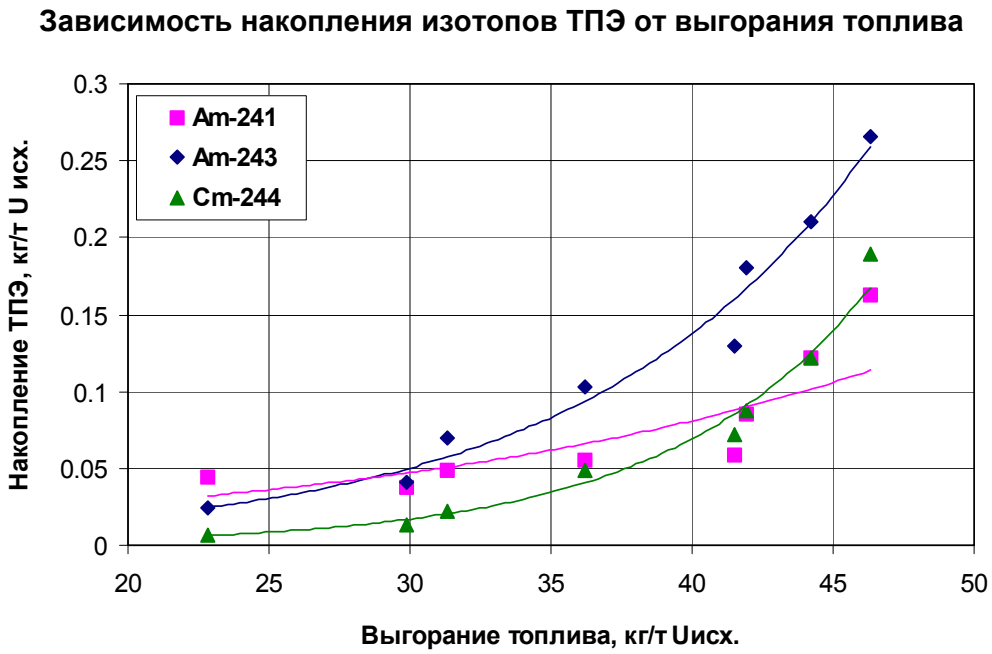


Рис.7.6

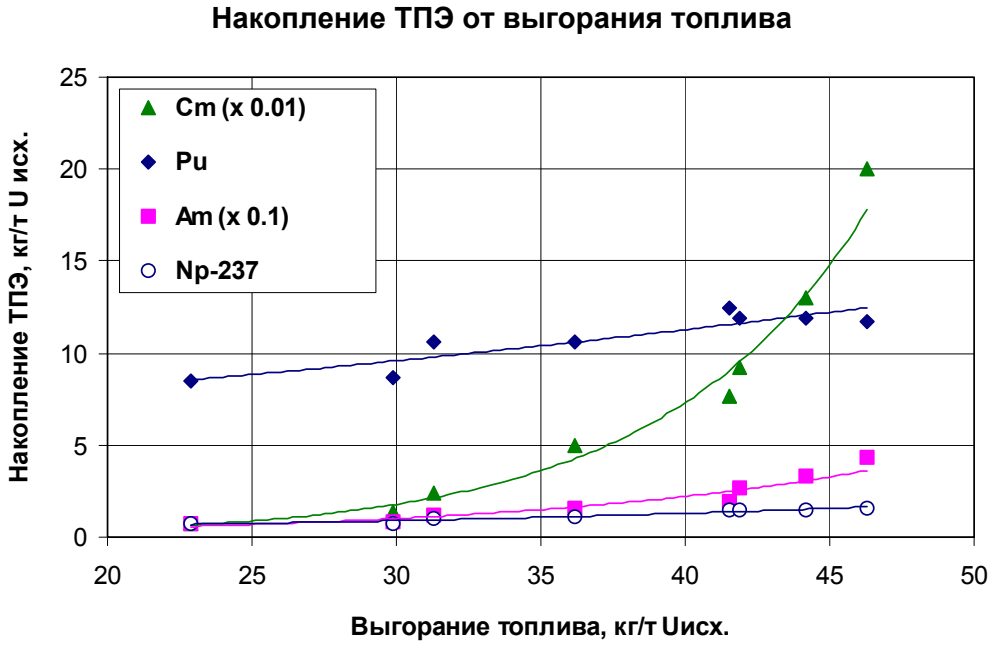


Рис.7.7

Для измерения выгорания в качестве монитора выгорания используются изотопы неодима. При проведении химических операций по подготовке проб к масс-спектрометрическим измерениям существует опасность загрязнения природным неодимом. Для контроля используют зависимость содержания ^{142}Nd от выгорания

(рис.7.8). Этот изотоп при делении не образуется, а накапливается за счет захвата нейтронов ядрами ^{141}Pr. Отклонение результатов от прямолинейной зависимости позволяет судить о возможном попадании в пробу природного неодима.

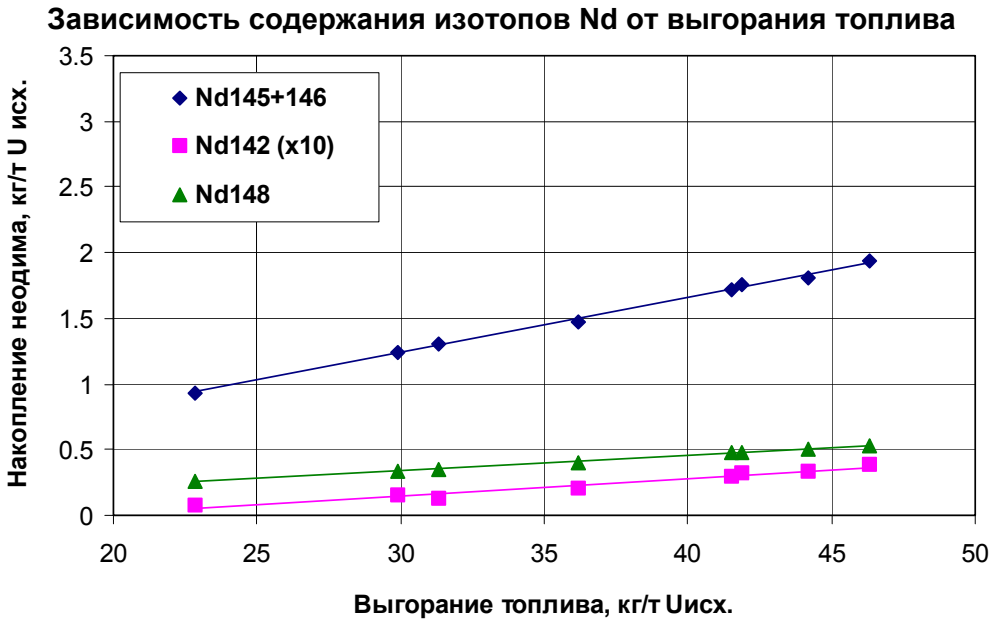


Рис.7.8

В качестве монитора выгорания часто используются изотопы ^{148}Nd и $^{145+146}$Nd. Использование пары ^{145}Nd и ^{146}Nd обусловлено необходимостью учета захвата нейтронов ядрами ^{145}Nd. С ростом выгорания соотношение ^{145}Nd/^{146}Nd уменьшается (рис.7.9). Прямолинейный характер этой зависимости позволяет использовать соотношение ^{145}Nd/^{146}Nd для определения выгорания.

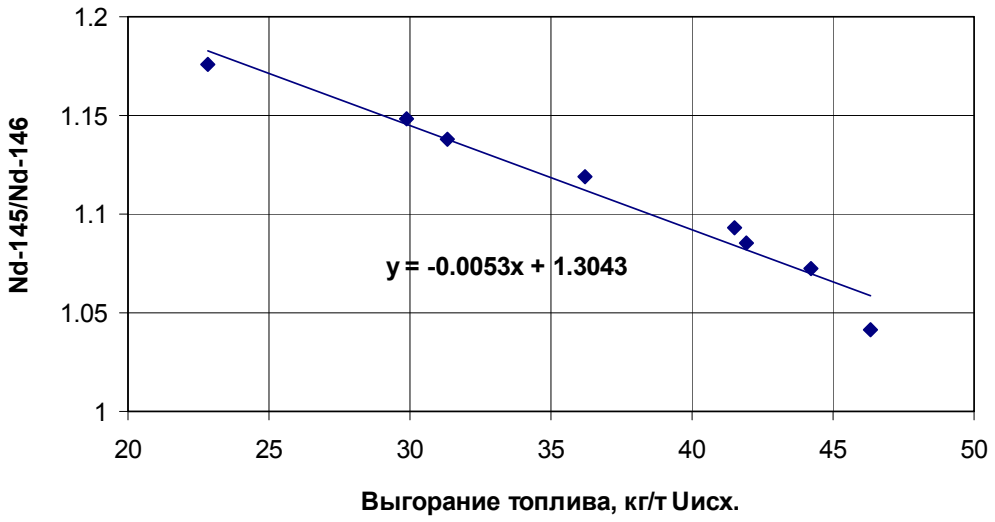


Рис.7.9

Заключение

1. В рамках задачи 1 проекта 2670р выполнен анализ технологических и эксплуатационных характеристик ТВС ВВЭР-440 с целью отбора твэлов для проведения неразрушающих исследований и определения выгорания и нуклидного состава топлива. На основании проведенной работы [1] выполнено следующее:

- Для исследований выбрана ТВС 13626135 с исходным обогащением 3.6% по урану-235, отработавшая на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х топливных циклов до среднего выгорания ~38.5 МВт·сут/кгU.
- Отобраны четыре твэла (№№65,67,68 и 69) для проведения неразрушающих и разрушающих исследований. Твэл 69 имеет максимальное выгорание топлива для данной ТВС, а твэл 65 – минимальное; твэлы 67 и 68 имеют промежуточное значение выгорания.
- Определены координаты отбора восьми образцов топлива для радиохимического анализа. Из твэлов 65 и 69 образцы топлива отбираются с координатами ~100, ~1000 и ~2150 мм от низа твэлов; из твэлов 67 и 68 образцы отбираются с координатами ~1000 мм от низа твэлов.

2. В рамках задачи 2 описано исходное состояние компонентов рабочей кассеты ВВЭР-440, приведены геометрические параметры топливных таблеток, нуклидный и химический составы топливной композиции, параметры твэлов и ТВС в целом [2].

3. В рамках задачи 3 выполнены расчеты нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора 4-го блока НВ АЭС. Подробно представлены характеристики 4 исследуемых твэлов (выгорание, линейная мощность, температура оболочки) [3].

4. В рамках задачи 4 изложены основные результаты неразрушающих исследований четырех твэлов ТВС ВВЭР-440. Проведено сравнение их состояния с параметрами остальных твэлов сборки. Сделана оценка корректности отбора этих твэлов для разрушающих исследований изотопного состава отработавшего топлива [4].

5. В рамках задачи 5 изложено описание технологии отбора образцов для радиохимического анализа с целью определения содержания продуктов деления и тяжелых атомов. Приведены схемы разделки отобранных твэлов из ТВС ВВЭР-440 №Д26135, краткая характеристика образцов и их маркировка [6].

6. В рамках задачи 6 описаны методики, используемые при выполнении радиохимического анализа топлива. Приведены результаты определения изотопного состава и содержания U, Pu, Np, Am, Cm, Nd, Cs, Ce, а также определены методом тяжелых атомов и по продуктам деления значения выгорания в образцах отработавшего топлива ВВЭР-440. Выполнен количественный анализ на содержание ^{237}Np в этих образцах. Приведены результаты по определению содержания нуклидов Eu, Sm, Gd, ^{95}Mo, ^{99}Tc, ^{109}Ag, ^{101}Ru, ^{103}Rh, ^{105,108}Pd в исследованных образцах. Приведены зависимости содержания нуклидов от выгорания топлива [7,11].

Список использованных источников

1. Методология выбора ТВС, твэлов и образцов для определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива. Промежуточный отчет по задаче 1. Кредит выгорания. Проект (2670р), 2003.

2. Исходное состояние рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт сут/кг $U_{исх.}$. Промежуточный отчет по задаче 2. Кредит выгорания. Проект (2670р)., 2003.

3. История облучения рабочей кассеты №13626135 ВВЭР-440, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС в течение 4-х ТЦ до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU.. Промежуточный отчет по задаче 3. Кредит выгорания. Проект (2670р)., 2003.

4. Неразрушающие послереакторные исследования твэловТВС ВВЭР-440 №13626135, отработавшей на 4-м блоке НВАЭС. до среднего выгорания 38.5 МВт·сут/кгU.. Промежуточный отчет по задаче 4. Кредит выгорания. Проект (2670р)., 2003.

5. Методика выполнения измерений длины твэлов, рег.№74-96, Димитровград, 1996 г.

6. Отбор и подготовка образцов для радиохимического анализа изотопного состава топлива ТВС №13626135 ВВЭР-440. Промежуточный отчет по задаче №5 проекта “Кредит выгорания (2670р)”, 2003.

7. Методики и средства определения нуклидного состава, массы изотопов и глубины выгорания топлива в образцах. Промежуточный отчет по задаче №6 (часть 1). Кредит выгорания (2670р), 2003.

8. ASTM E-244-80 Standard Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Mass Spectrometric Method).

9. Nuclear Data Science and Tehnology, vol.1. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1973(621).

10. Neutron Gross Section. Academic Press. JNC., vol.2, 1984.

11. Радиохимическое исследование нуклидного состава массы изотопов и глубины выгорания топлива в образцах. Промежуточный отчет по задаче №6 (часть 2). Кредит выгорания (2670р), 2004.