

# АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР

**О.Г. Герасимчук\*, В.И. Орлов\*\*, В.Ф. Украинцев\*\*\***

*\* - Концерн «Росэнергоатом», г. Москва*

*\*\* - Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС)*

*\*\*\* - Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



В работе получены и проанализированы зависимости характеристик топливоиспользования в топливных циклах повышенной длительности: длительности кампании, глубины выгорания, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), удельного расхода природного урана и топливной составляющей себестоимости электроэнергии в зависимости от обогащения топлива и количества загружаемых ТВС.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время концерн «Росэнергоатом» и АЭС России уделяется большое внимание проблеме улучшения характеристик топливоиспользования в топливных циклах, особенно в перспективных циклах повышенной длительности.

Эти характеристики оценивают по нескольким параметрам (критериям)

- длительность кампании;
- глубина выгорания топлива;
- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ);
- удельный расход природного урана;
- топливная составляющая себестоимости электроэнергии.

В работе исследовалось поведение этих характеристик в зависимости от обогащения топлива и количества загружаемых тепловыделяющих сборок (ТВС).

За последнее время произошли прогрессивные изменения в конструкции тепловыделяющих элементов и ТВС, которые позволяют ставить вопросы о возможности и целесообразности использовании топливных циклов повышенной длительности (до 470 суток).

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛАМ

Сначала определим КИУМ. Поскольку длительность рассматриваемых топливных загрузок близка к календарному году, то для корректного сравнения различных топливных загрузок КИУМ должен усредняться за достаточно большой период времени. В настоящей работе в качестве такого периода принимается проектный срок службы реактора - примерно 30 лет.

Таким образом, в простейшем случае

$$\text{КИУМ} = T_{\text{раб}}/T_{\text{экс}}$$

где  $T_{\text{раб}}$  - эффективное время работы реактора на номинальной мощности;  $T_{\text{экс}}$  - календарное время эксплуатации.

В упрощенном виде после преобразований можно представить КИУМ в виде

$$\text{КИУМ} = \frac{T_{\text{загр}}^k}{T_{\text{загр}}^k + T_{\text{ппр}}} + 0.005, \quad (1)$$

где  $T_{\text{загр}}^k$  - календарное время работы одной (к-той) загрузки;  $T_{\text{загр}}$  - эффективная длительность работы одной загрузки;  $T_{\text{ппр}}$  - календарная длительность ППР.

Теперь остановимся подробнее на характеристиках и критериях топливоиспользования [1].

Глубина выгорания топлива, выраженная в энергетических единицах, равна выработке энергии на килограмм тяжелых ядер загрузки (МВт\*сут/кгU<sub>мет</sub>). Глубина выгорания может также выражаться количественно как масса подвергшихся делению ядер, отнесенная к единице массы топлива. Таким образом, средняя глубина выгорания характеризует энергетическую эффективность использования ядерного топлива, т.е. чем больше глубина выгорания, тем больше энергии получается от единицы массы ядерного топлива.

Однако в реакторах используется топливо разного обогащения, и одинаковую глубину выгорания можно получить, используя различное обогащение и различное количество загружаемых ТВС. Поэтому для сравнения эффективности топливных циклов с разным обогащением и количеством загружаемых ТВС необходим другой критерий. Таким критерием, позволяющим сравнивать различные топливные циклы и различные типы реакторов, является удельный расход природного урана, кгU/МВт\*сут, т.е. расход ядерного топлива на единицу полученной тепловой (электрической) энергии.

Удельный расход природного урана  $g_{\text{пр}}$  для стационарных топливных загрузок может быть определен по формуле

$$g_{\text{пр}} = \frac{G_x}{N_T T_{\text{эфф}}} \cdot \frac{x - x_{\text{отв}}}{x_{\text{пр}} - x_{\text{отв}}}, \quad (2)$$

где  $G_x$  - расход урана за кампанию, кг;  $N_T$  - тепловая мощность блока, МВт;  $T_{\text{эфф}}$  - длительность кампании, эфф.сутки;  $x$  - обогащение топлива, %;  $x_{\text{отв}}$  - обогащение топлива в отвале, %;  $x_{\text{пр}}$  - обогащение природного урана, %.

Удельный расход природного урана (натуральный показатель) - является хорошим критерием эффективности для начальной стадии ядерного топливного цикла (ЯТЦ) - получение закиси-окси ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ), обогащение урана, изготовление твэлов и ТВС.

Для центральной стадии ЯТЦ, которой является использование топлива на АЭС, где суммируются затраты на ядерное топливо и оценивается общая эффективность его использования, необходим стоимостный критерий, позволяющий учитывать стоимость ТВС различного обогащения и различных конструкций. Стоимостный критерий должен показывать какой топливный цикл является предпочтительнее для эксплуатации с точки зрения затрат на ядерное топливо.

Таким критерием, позволяющим сравнивать различные топливные циклы с точки зрения затрат на ядерное топливо, является топливная составляющая себестоимости электроэнергии (ТСС), руб/МВт\*сут, которая для стационарных топливных загрузок может быть определена по формуле

$$\text{ТСС} = \frac{3_T}{N_T \cdot T_{\text{эфф}} \cdot \text{КПД}}, \quad (3)$$

где  $Z_T$  - затраты на свежее топливо в данную кампанию, руб; КПД - коэффициент полезного действия блока, отн.ед.

Таким образом, в данной работе рассматриваются соотношения между КИУМ и удельным расходом природного урана, между КИУМ и ТСС для различных топливных циклов.

Для реализации топливных циклов повышенной длительности можно либо использовать ТВС повышенного обогащения, либо загружать большее количество свежих ТВС, т.е. уменьшать кратность перегрузок (под кратностью перегрузок понимается отношение полного количества ТВС в активной зоне к числу перегружаемых ТВС), либо и то и другое; при этом будет меняться удельный расход природного урана и ТСС.

Анализы характеристик реакторов ВВЭР были проведены как для ВВЭР-440 (проекты В-330,230), так и для ВВЭР-1000 (проект 320). Здесь приводятся результаты только для ВВЭР-1000 как более перспективного в плане новых блоков.

Расчеты удельного расхода природного урана проводились по формуле (2), а расчеты КИУМ по формуле (1); при этом в качестве исходных брались следующие значения:  $x_{OTB} = 0.3\%$ ,  $x_{ПР} = 0.714\%$ ,  $N_T = 3000$  МВт,  $T_{ПР} = 67$  суток.

Результаты этих оценок приведены в сжатом виде в табл. 1, а для наглядности и удобства анализа построены их кривые.

Из таблицы видно, какую длительность кампании можно получить при использовании различных топливных циклов. Очевидно, что длительность кампании увеличивается с ростом обогащения и числа загружаемых ТВС. Для реализации топливных циклов длительностью от 400 эфф. суток до 550 эфф. суток необходимо увеличить обогащение до 5.0% и (или) увеличивать ежегодную загрузку до 84 ТВС.

Из этой же таблицы видно, какое среднее выгорание можно получить для различных топливных циклов, например, для топливного цикла с ежегодной загрузкой 73 ТВС обогащением 4.8%, длительность которого 500 эфф.суток, средняя глубина выгорания составляет 48 МВт·сут/кгU. Очевидно, что глубина выгорания увеличивается с ростом среднего обогащения ТВС и увеличением кратности перегрузок.

Зависимость КИУМ от обогащения топлива при различном количестве загружаемых ТВС представлена на рис.1, который подтверждает рост КИУМ с увеличением

Таблица 1

**Основные характеристики топливных циклов ВВЭР-1000**

Номера вариантов	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
Количество загружаемых ТВС, шт.	37	37	43	43	49	49	49	55	55	61	61	67	67	73	73
Среднее обогащение загружаемого топлива, %	4.09	5.24	4.12	5.28	3.72	4.10	5.25	4.12	5.28	4.10	5.26	4.11	5.24	4.16	5.10
Длительность кампании, эфф.сут.	253	324	287	367	287	316	407	349	447	373	479	400	513	433	531
Среднее выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кг U	47.6	61.0	46.5	59.5	40.8	45.0	57.9	44.2	56.7	42.6	54.7	41.6	53.3	41.4	50.8
Удельный расход природного урана, кг/МВт-сут	0.193	0.197	0.200	0.204	0.204	0.206	0.208	0.210	0.214	0.217	0.220	0.223	0.225	0.227	0.230
ТСС без отправки ОТВС, отн.ед.	0.922	0.880	0.950	0.908	1.00	0.980	0.929	1.000	0.954	1.033	0.984	1.061	1.006	1.078	1.036
ТСС с отправкой ОТВС, отн.ед.	1.073	0.997	1.104	1.029	1.175	1.139	1.053	1.162	1.080	1.201	1.115	1.232	1.140	1.251	1.117
КИУМ, %	79.6	83.4	81.6	85.1	81.6	83.0	86.4	84.4	87.5	85.3	88.2	86.2	88.9	87.1	89.3

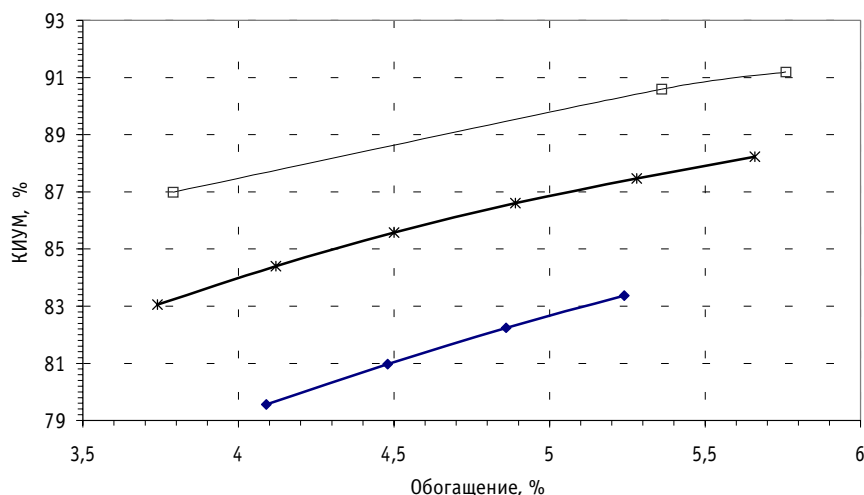


Рис. 1. Зависимость КИУМ от обогащения для разного количества загружаемых кассет. Количество загружаемых кассет: □ 84; \* 55; ◆ 37

обогащения топлива и с уменьшением кратности перегрузок (которая является отношением числа загружаемых ТВС к числу ТВС в активной зоне). Отметим, что темп роста КИУМ замедляется с увеличением количества загружаемых ТВС.

Из рисунка следует, что, увеличивая обогащение топлива от 3.7 до 5.0%, можно получить увеличение КИУМ не более чем на 3.5% (в [2] кроме того показано, что использование в ВВЭР-1000 ТВС с обогащением более 5.0% будет затруднено вследствие достижения температурой повторной критичности своего предельного значения).

За счет уменьшения кратности перегрузок с 5 до 2 (количество загружаемых ТВС изменяется от 37 до 84) можно получить увеличение КИУМ на 7.5%.

Таким образом, суммарно можно получить максимальное увеличение КИУМ в 11% на всем диапазоне изменения обогащения и кратности перегрузок.

#### **Об удельном расходе природного урана.**

Из табл.1. видно, что имеет место слабая зависимость удельного расхода природного урана от обогащения и сильная зависимость от количества загружаемых ТВС. Расход природного урана растет при уменьшении кратности перегрузок. При увеличении обогащения топлива от 3.7 до 5.0% при постоянной кратности перегрузок удельный расход урана увеличивается только на 2.0%, а при увеличении числа загружаемых ТВС от 37 до 84 штук удельный расход природного урана увеличивается на 22%.

Рассмотрим, как меняется удельный расход природного урана при изменении КИУМ.

На рис. 2. представлена зависимость удельного расхода природного урана от коэффициента использования установленной мощности при разном количестве загружаемых ТВС (пунктирные линии - это линии постоянного обогащения).

Из рисунка следует, что увеличение КИУМ на 1% за счет увеличения обогащения при фиксированном количестве загружаемых ТВС в среднем приводит к увеличению удельного расхода природного урана всего на 0.6%.

Зависимость удельного расхода природного урана от КИУМ за счет изменения числа загружаемых ТВС сложнее. Мы уже отмечали, что темп роста КИУМ замедляется с увеличением количества загружаемых ТВС; это приводит к росту удельного рас-

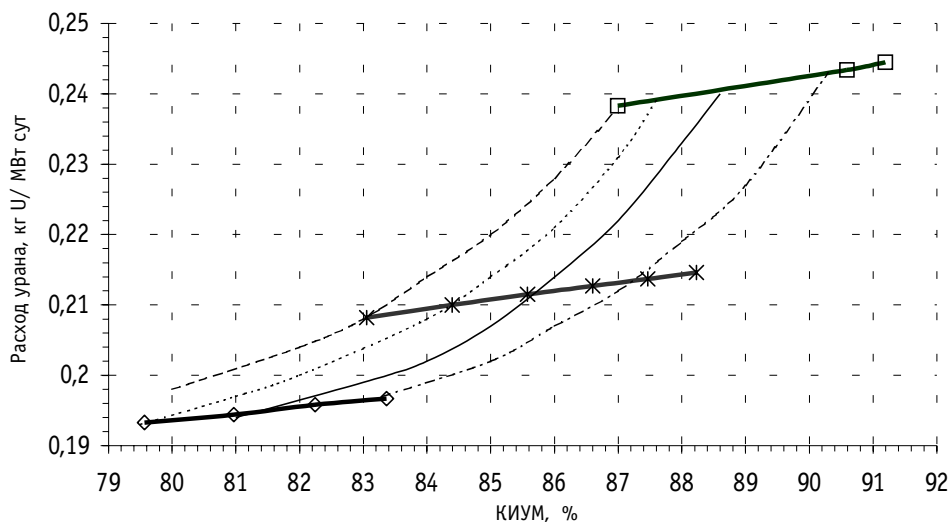


Рис. 2. Зависимость расхода природного урана от КИУМ для разного количества загружаемых кассет (пунктиром изображены линии равных обогащений). Количество загружаемых кассет и обогащение: □ 84; \* 55; ◆ 37; — 3,75%; ..... 4,10%; — 4,50%; ..... 5,25%

хода природного урана на 1% изменения КИУМ при увеличении количества загружаемых ТВС (пунктирные линии становятся более вертикальными).

Для определения увеличения расхода урана от КИУМ при изменении числа загружаемых ТВС необходимо двигаться по пунктирным линиям до пересечения с интересующей линией, показывающей число загружаемых ТВС.

Для определения увеличения расхода урана при изменении КИУМ на 1% необходимо двигаться по пунктирным линиям до соответствующего пересечения с вертикальной линией координатной сетки.

Из рисунка следует, что увеличение количества ТВС на 6 штук приводит к увеличению КИУМ от 2,0 до 0,6%; при этом расход урана увеличивается приблизительно на 2,8%, увеличение же КИУМ на 1% за счет увеличения числа загружаемых ТВС приводит к увеличению расхода урана от 1,5 до 4,5%, в зависимости от сравниваемых топливных циклов.

Отсюда следует важный вывод, что темп роста КИУМ замедляется с уменьшением кратности перегрузок, т.е. эффективность, например, каждых шести последующих загружаемых ТВС уменьшается по сравнению с предыдущими с точки зрения увеличения КИУМ; при этом темп роста удельного расхода урана практически не изменяется.

Рассмотрим как меняется **топливная составляющая себестоимости** (ТСС) электроэнергии в зависимости от различных параметров и проанализируем ее изменение при изменении КИУМ.

В отличие от расхода урана для ТСС мы получим оценочные результаты, показывающие только основные тенденции и диапазон изменения параметров, т.к. принятая зависимость относительной стоимости ТВС от обогащения достаточно приближенная.

Из представленных в табл.1 данных видно, что имеет место слабая зависимость ТСС от изменения обогащения (это касается и оценок с учетом и без учета стоимости вывоза отработанных ТВС-ОТВС).

Из этой же таблицы видно, что имеет место сильная зависимость ТСС от количества загружаемых ТВС, ТСС растет при увеличении количества загружаемых ТВС (т.е.

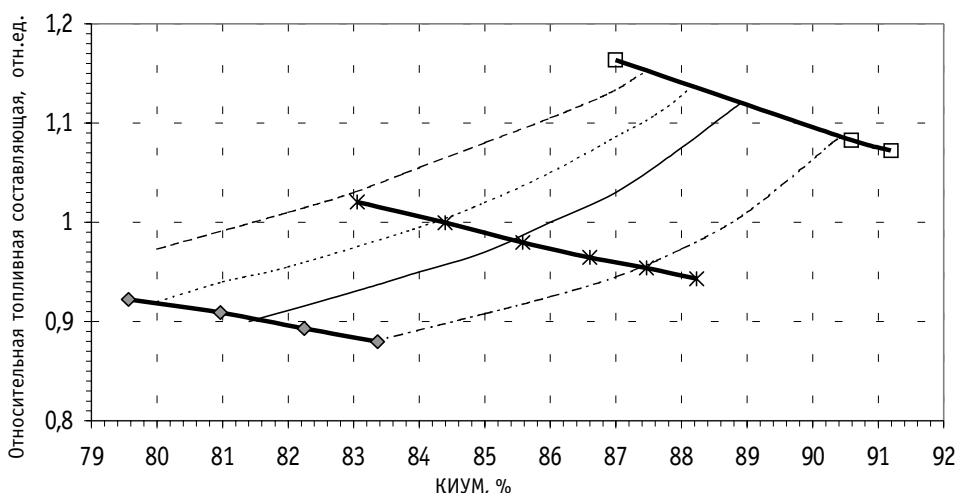


Рис. 3. Зависимость относительной топливной составляющей от КИУМ для разного количества загружаемых кассет (пунктиром изображены линии равных обогащений). Количество загружаемых кассет и обогащение: □ 84; \* 55; ◆ 37; ..... 3,75%; ..... 4,10%; — 4,50%; ..... 5,25%

с уменьшением кратности перегрузок). При увеличении числа загружаемых ТВС от 37 до 84 штук ТСС увеличивается на 22% (в то же время отметим, что во всем диапазоне изменения обогащений от 3,7 до 5,0% ТСС уменьшается лишь на 5%). Кроме того, с ростом обогащения уменьшение ТСС замедляется. Так как обогащение загружаемого топлива в настоящее время около 4%, то реально уменьшить ТСС за счет увеличения обогащения только на 4%.

Таким образом, пятигодичный топливный цикл по ТСС экономичнее двухгодичного топливного цикла на 22%, а четырехгодичный (загрузка 49 ТВС) и трехгодичный экономичнее двухгодичного на 18 и 14,5% соответственно.

Рассмотрим как меняется топливная составляющая себестоимости электроэнергии при изменении коэффициента использования установленной мощности.

На рис. 3 представлена зависимость ТСС от КИУМ при разном количестве загружаемых ТВС (пунктирные линии - это линии постоянного обогащения).

Из рисунка следует, что увеличение КИУМ на 1% за счет увеличения обогащения при фиксированном количестве загружаемых ТВС уменьшает ТСС не более чем на 1,5%.

Из анализа приведенного выше, как уже говорилось, следует, что реально увеличить КИУМ за счет увеличения обогащения возможно на 2,5%. Таким образом, за счет увеличения обогащения от 4,0 до 5,0% возможно увеличить КИУМ на 2,5% и уменьшить ТСС на 4%.

Зависимость ТСС от КИУМ за счет изменения числа загружаемых ТВС сложнее. Замедление роста КИУМ с увеличением количества загружаемых ТВС (см. рис.1) приводит к росту ТСС на 1% изменения КИУМ при увеличении количества загружаемых ТВС (пунктирные линии становятся более вертикальными).

Для определения увеличения значения ТСС от КИУМ при изменении числа загружаемых ТВС необходимо двигаться по пунктирным линиям до пересечения с интересующей линией, показывающей число загружаемых ТВС.

Для определения увеличения ТСС при изменении КИУМ на 1% необходимо двигаться по пунктирным линиям до соответствующего пересечения с вертикальной линией координатной сетки.

Из рисунка следует, что увеличение количества ТВС на 6 штук приводит к увели-

чению КИУМ от 2.0 до 0.6%, но при этом ТСС увеличивается в среднем на 2.8%, т.е. темп роста ТСС практически не зависит от кратности перегрузок. Увеличение же КИУМ на 1% за счет увеличения числа загружаемых ТВС приводит к увеличению ТСС от 1.3 до 4.8% в зависимости от того, какие топливные циклы мы рассматриваем, т.е. замедление темпа роста КИУМ приводит к увеличению темпа роста ТСС.

Представленные зависимости позволяют оценить выигрыш в КИУМ и проигрыш в ТСС при переходе от одного топливного цикла к другому.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что КИУМ растет с увеличением обогащения топлива и количества загружаемых ТВС; при этом темп роста КИУМ замедляется с увеличением обогащения и количества загружаемых ТВС. На всем диапазоне изменения обогащения и кратности перегрузок максимальное изменение КИУМ для ВВЭР-1000 составляет 11% (при этом за счет изменения обогащения на 3.5% и за счет изменения числа загружаемых ТВС - на 7.5%).

Таким образом, с точки зрения наименьшего увеличения удельного расхода природного урана целесообразно увеличивать КИУМ сначала за счет увеличения обогащения и только потом за счет увеличения числа загружаемых ТВС.

Темп роста КИУМ замедляется с уменьшением кратности перегрузок, т.е. эффективность каждых шести последующих загружаемых ТВС уменьшается с точки зрения увеличения КИУМ; при этом темп роста удельного расхода природного урана практически не изменяется. Для ВВЭР-1000 увеличение загружаемых ТВС на 6 штук приводит к увеличению КИУМ от 2.0 до 0.6%, при этом расход природного урана увеличивается примерно на 2.8%.

При формировании длинных топливных циклов с увеличенным КИУМ за счет увеличения обогащения топлива и уменьшения кратности перегрузок происходит значительное увеличение ТСС за счет уменьшения кратности перегрузок и незначительное ее снижение за счет увеличения обогащения. Поэтому выгодно увеличивать КИУМ за счет увеличения обогащения, однако это возможно в небольших пределах.

Анализ и сопоставление приведенных показателей достаточно полно отражают картину формирования топливных циклов увеличенной длительности. Но для более полной и реальной картины экономический анализ необходимо, кроме того, проводить по таким показателям, как себестоимость электроэнергии, прибыль, а также учитывать влияние на экономические показатели работы на мощностном эффекте реактивности.

Однако необходимо четко осознавать, что стремление к увеличению только КИУМ может приводить к снижению других характеристик, например топливоиспользования.

Вопрос каковые из них сделать приоритетными на данный момент может быть обусловлен как чисто экономическими причинами (и тогда приоритетными надо брать экономические характеристики), так и другими причинами, например политикой и борьбой за рынки (тогда КИУМ действительно может быть приоритетным).

## Литература

1. Шевелев Я.В., Клименко А.В. Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. - М.: РГТУ, 1996. - 734с.
2. Орлов В.И., Маханько А.С., Диданин Л.Л. и др. Повышение КИУМ и эффективность топливоиспользования на АЭС с ВВЭР. 3 Межд. Научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». - М.: ВНИИАЭС, АО «Машинир», 2002. - С. 64.

Поступила в редакцию 07.08.2002

Issues on ecology with large-capacity production of motor fuels from coal and heavy petroleum residues were discussed. In Russia an efficient universal technology has been developed for coal reprocessing into motor fuel by hydrogenation under low hydrogen pressure of 6-10 MPa, instead of 20-30 MPa in foreign processes. The most significant increase in efficiency of coal reprocessing can be achieved with the use of highly reliable, environmentally safe nuclear reactors of BN type as part of industrial complex for power supply and intensification of technological process of synthetic liquid fuel production. This will allow to improve sharply ecological situation in mining areas and coal reprocessing sites.

**УДК 574.4.631**

*Ecological risk assessment. 2. Estimation of exposition at definition of risk in agrosphere* \E.S. Fesenko, B.I. Synzynys; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 11 pages, 1 table. – References, 10 titles.

In this article are considered the general principles of an estimation of exposition of animals and plants at hit in ecosystems of chemical substances or radionuclides.

The main ways and points of influence of chemical or radioactive substances in agrosphere, ways of distribution of chemical and radioactive substances, a route of influence are described.

**УДК 621.039.54**

*The analysis of the VVER reactor characteristics for prolonged duration fuel cycles* \O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 2 titles.

Loading factors and characteristics of fuel using were derived and analyzed in fuel cycles of prolonged duration such as fuel campaign duration; burn up; natural uranium expenditure; specific portion of electricity cost price in dependency of fuel enrichment and quantity of loaded fuel assemblies.

**УДК 621.039.54**

*The analysis and prediction of the VVER reactors fuel cycle economical characteristics* \O.G. Gerasimchuk, V.I. Orlov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 9 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 4 titles.

The main economical characteristics of fuel cycle are derived and analyzed such as: the prime cost of electricity and cumulative economical profit while producing electricity on the VVER reactors depending on enrichment of fuel, number of loading fuel assemblies, duration of campaign and loading factor, and with account of modification of costs structures. On their basis the forecasts on an intrusion of optimum fuel cycles of prolong duration for the VVER reactor are made.