

# Усовершенствование активных зон реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС. Внедрение уран-эрбиевого топлива

**Борис Воронцов,**

**Георгий Кривошеин,**

**Андрюс Юркиявичюс**

*Игналинская АЭС, Литва  
эл. почта: jurkevicius@mail.lei.lt*

**Александр Федосов,**

**Александр Краюшкин**

*РНЦ „Курчатовский институт“,  
Россия*

Рассмотрена одна из самых важных модификаций активной зоны реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС, связанная с внедрением нового вида ядерного топлива, содержащего выгорающий поглотитель нейтронов. Представлены результаты влияния уран-эрбиевого топлива 2,4%, 2,6% и 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на основные нейтронно-физические характеристики реакторов РБМК-1500 и технико-экономические показатели работы энергоблоков. Показано влияние внедрения уран-эрбиевого топлива на топливную составляющую себестоимости производимой электроэнергии. Обсуждены дальнейшие перспективы, связанные с внедрением уран-эрбиевого топлива 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на 2-ом энергоблоке Игналинской АЭС.

**Ключевые слова:** реактор РБМК-1500, уран-эрбиевое топливо

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Игналинская атомная электростанция расположена в северо-восточной части Литвы на берегу озера Друкшяй. На Игналинской АЭС (ИАЭС) расположены два энергоблока с канальными реакторами кипящей воды РБМК-1500. 1-ый энергоблок ИАЭС был введен в эксплуатацию в конце 1983 г., 2-ой энергоблок – в августе 1987 г. В настоящее время эксплуатируется только 2-ой энергоблок. 1-ый энергоблок 31-12-2004 был остановлен для снятия с эксплуатации.

Реакторы РБМК-1500 являются усовершенствованной версией реакторов РБМК-1000, имеющей более развитую систему локализации аварий и усовершенствованные системы безопасности. Проектная тепловая мощность реакторов РБМК-1500 составляет 4800 МВт(т). В настоящее время тепловая мощность 2-го энергоблока ограничена величиной 4200 МВт(т). Максимальная электрическая мощность энергоблока достигает 1360 МВт(э).

Тепловыделяющие сборки (ТВС) в реакторах РБМК-1500 расположены в отдельных технологических каналах. Всего в каждом реакторе имеется 1661 технологический канал и теплоноситель равномерно распределяется между ними. Активная зона реакторов РБМК-1500 разделена на две ветви охлаждения. Каждая ветвь охлаждается через контур многократной принудительной циркуляции тремя работающими главными циркуляционными насосами [1].

Мощность реакторов и энерговыделение в активной зоне регулируются специальными стержнями управления с поглотителем нейтронов. На реакторах РБМК-1500 установлены 211 стержней управления и защиты.

## 2. ВНЕДРЕНИЕ УРАН-ЭРБИЕВОГО ТОПЛИВА

Для повышения ядерной безопасности реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС в середине 1990-ых годов были разработаны долгосрочные мероприятия по улучшению нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1500 Игналинской АЭС. В частности, для снижения парового коэффициента реактивности начали использовать топливо повышенного обогащения, содержащее выгорающий поглотитель нейтронов. Данное мероприятие стало решающим для дальнейшей эксплуатации реакторов РБМК-1500, так как оно позволило не только повысить их безопасность, но и впоследствии существенно улучшить технико-экономические показатели работы энергоблоков ИАЭС.

В результате проведенных научных исследований было решено на реакторах Игналинской АЭС начать использовать уран-эрбиевое топливо 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ , содержащее 0,41% выгорающего поглотителя эрбия. Оптимальное содержание эрбия в топливе выбиралось исходя из следующих условий:

- энерговыработка выгружаемого топлива должна быть выше 2400 МВт × суток в случае, когда из активной зоны выгружены все дополнительные поглотители;

- паровой коэффициент реактивности меньше  $+1,0\beta_{эф}$ ;

- максимальная мощность свежей тепловыделяющей сборки с топливом 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  не превышает соответствующего уровня для ТВС с топливом 2,0%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ .

После детального обоснования возможности использовать такой вид топлива в реакторах РБМК-1500 в 1995 г. на 2-ом энергоблоке ИАЭС была впервые выполнена загрузка опытной партии уран-эрбиевого топлива 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  в количестве 150 шт. ЭТВС. Во время загрузки этой опытной партии уран-эрбиевого топлива было установлено, что нейтронно-физические характеристики реактора, и в первую очередь паровой коэффициент реактивности, улучшаются, а эксплуатационные пределы и пределы безопасной эксплуатации не превышаются [3].

После экспериментальной проверки правильности теоретических исследований в 1996 г. на 1-ом и 2-ом энергоблоках Игналинской АЭС начат поэтапный перевод реакторов РБМК-1500 на уран-эрбиевое топливо 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ , во время которого осуществлялась постепенная выгрузка из активной зоны дополнительных поглотителей (ДПК) (рис. 1). Порядок загрузки эрбиевых тепловыделяющих сборок (ЭТВС) и выгрузки дополнительных поглотителей устанавливался в зависимости от условия поддержания характеристик ядерной безопасности в допустимых пределах.

Использование уран-эрбиевого топлива 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  позволило существенно повысить как среднее выгорание выгружаемого отработавшего топлива, так и среднюю энерговыработку ТВС в реакторе (рис. 2). По сравнению с состоянием перед началом внедрения уран-эрбиевого топлива 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  увеличение средней энерговыработки ТВС в реакторе РБМК-1500 1-го энергоблока Игналинской АЭС составило ~40% (с 850 до 1200 МВт × суток), в реакторе РБМК-1500 2-го энерго-блока – 47% (с 850 до 1250 МВт × суток).

Среднее выгорание выгружаемого отработавшего топлива увеличилось соответственно на 37% (с 1600 до 2200 МВт × суток) в 1-ом энергоблоке, на 40% (с 1650 до 2300 МВт × суток) во 2-ом энергоблоке и практически достигло первоначальной проектной величины. Кроме того, вследствие роста средней энерговыработки ТВС в реакторе с 3,5–4,0 до 2,0 ТВС/эф.сутки снизился темп перегрузок ТВС, соответственно уменьшились количество выгружаемого отработавшего топлива и объемы радиоактивных отходов (рис. 3).

Следует отметить, что снижение числа перегрузок в день также повышает безопасность при эксплуатации реакторов, так как каждая перегрузка топлива – это ядерно-опасная работа, требующая специальной регулировки поля энерговыделения в локальной зоне реактора вокруг каждого перегружаемого канала. Это связано с необходимостью обеспечить соблюдение более жестких ограничений по таким технологическим параметрам реактора, как мощность перегружаемого канала,

коэффициент запаса до кризиса кипения теплоносителя, расход воды через канал.

Опыт эксплуатации уран-эрбиевого топлива 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на 1-ом и 2-ом энергоблоках ИАЭС в 1996–2001 гг. показал, что этот вид топлива вполне приемлем, однако не является оптимальным для реакторов РБМК-1500. В частности, установившаяся величина парового коэффициента реактивности  $\alpha_{\phi}$  на 1-ом и 2-ом

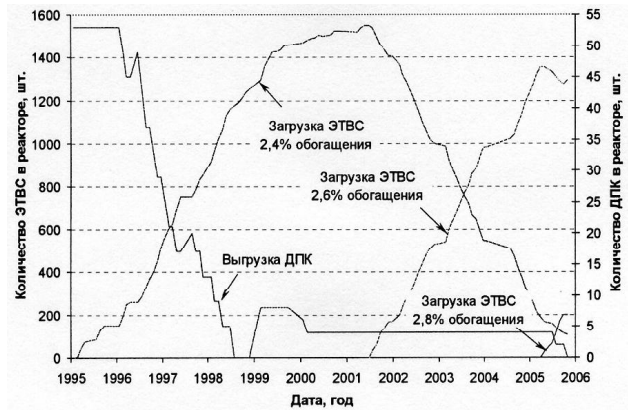


Рис. 1. Загрузка уран-эрбиевого топлива и выгрузка ДПК на 2-ом энергоблоке ИАЭС

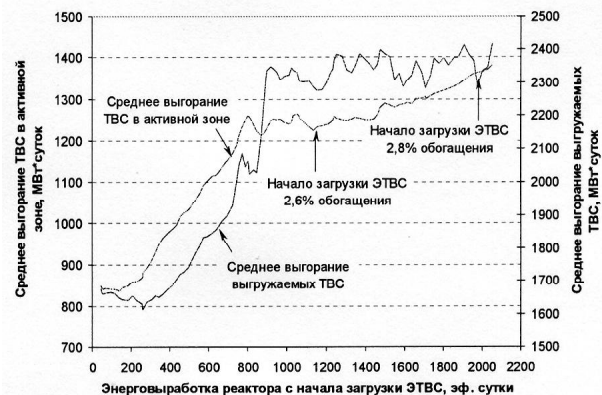


Рис. 2. Рост средней энерговыработки ТВС в активной зоне и выгорания выгружаемого отработавшего топлива на 2-ом энергоблоке ИАЭС

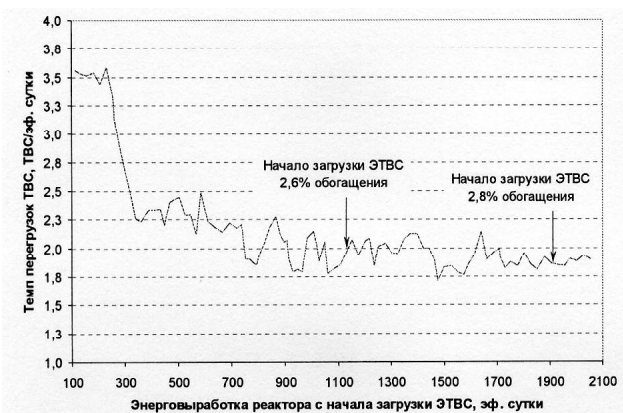


Рис. 3. Снижение темпа перегрузок в процессе внедрения уран-эрбиевого топлива на 2-ом энергоблоке ИАЭС

энергоблоках не позволяла осуществить выгрузку последних ДПК, а также произвести некоторые другие работы по модернизации активных зон реакторов РБМК-1500, связанные с заменой последних партий стержней регулирования сб. 2091 на стержни модернизированной конструкции сб. 2477.

Наилучшее решение этой проблемы – повысить обогащение уран-эрбиевого топлива с одновременным повышением содержания в топливе выгорающего поглотителя эрбия. В качестве промежуточного варианта было принято решение на реакторах РБМК-1500 Игналинской АЭС начать загрузку уран-эрбиевого топлива 2,6%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ , содержащего 0,5% выгорающего поглотителя эрбия.

Внедрение уран-эрбиевого топлива 2,6%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на 2-ом энергоблоке Игналинской АЭС было начато в конце 2001 г., на 1-ом энергоблоке – в середине 2002 г. Процесс загрузки эрбиевых ТВС 2,6%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на реакторе 2-го энергоблока показан на тех же рисунках 1–3, что и для ЭТВС 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ .

На момент остановки 1-го энергоблока для снятия с эксплуатации 31-12-2004 загрузка реактора составила: 59% – ЭТВС 2,6%-ного, 36% – ЭТВС 2,4%-ного и 5% – ТВС 2,0%-ного обогащения. С начала внедрения уран-эрбиевого топлива на 1-ом энергоблоке ИАЭС удалось выгрузить 52 ДПК.

На 2-ом энергоблоке после тщательного анализа и расчетов было принято решение о целесообразности дальнейшего повышения обогащения ядерного топлива, и в середине 2005 г. была начата загрузка первой опытной партии уран-эрбиевого топлива 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ , содержащего 0,6% эрбия.

Загрузка опытной партии ЭТВС 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  на 2-ом энергоблоке была завершена 01-02-2006; на тот момент загрузка 2-го энергоблока составила: 12% – ЭТВС 2,8%-ного, 77% – ЭТВС 2,6%-ного, 7% – ЭТВС 2,4%-ного и 4% – ТВС 2,0%-ного обогащения. С начала внедрения уран-эрбиевого топлива на 2-ом энергоблоке ИАЭС удалось выгрузить все 53 ДПК, причем последние 4 ДПК – с внедрением ЭТВС 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$ .

Средняя энерговыработка ТВС в реакторе РБМК-1500 2-го энергоблока увеличилась до 1350 МВт × суток, среднее выгорание выгружаемого отработавшего топлива – до 2400 МВт × суток (рис. 2).

Процесс внедрения уран-эрбиевого топлива на реакторах РБМК-1500 1-го и 2-го энергоблоков Игналинской АЭС сопровождался периодическими измерениями нейтронно-физических и динамических характеристик. Результаты экспериментальных измерений парового коэффициента реактивности  $\alpha_p$  с начала внедрения уран-эрбиевого топлива на 2-ом энергоблоке ИАЭС приведены на рис. 4.

Из представленных результатов измерений видно, что в процессе внедрения уран-эрбиевого топлива паровой коэффициент реактивности  $\alpha_p$  в реакторах РБМК-1500 поддерживался в пределах  $0,5-0,8 \beta_{эф}$ , несмотря на выгрузку

дополнительных поглотителей и увеличение средней энерговыработки ТВС в активной зоне.

Мощностный коэффициент реактивности  $\alpha_w$  [2] также поддерживался в пределах  $-(1,8-2,5) \times 10^{-4} \beta_{эф}/\text{МВт}$ . В результате увеличения периода развития первой азимутальной гармоники энергораспределения  $\tau_{01}$  с 20 до 40–60 мин. повысилась стабильность нейтронного поля и улучшилась управляемость реакторов РБМК-1500.

Кроме того, выгрузка ДПК позволила снизить радиальную неравномерность поля энерговыделения и соответственно снизить максимальную температуру графита в активной зоне, что в свою очередь снизило энергонапряженность активной зоны и повысило надежность эксплуатации реакторов (рис. 5).

Предполагается, что дальнейшая загрузка ЭТВС 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  позволит повысить среднее выгорание выгружаемого отработавшего топлива до 2900 МВт × суток и одновременно снизить паровой коэффициент реактивности  $\alpha_p$  до  $0,4 \beta_{эф}$ . Следует также отметить, что дальнейшая загрузка ЭТВС 2,8%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  позволит с середины 2006 г. на 2-ом энергоблоке начать загрузку для дожигания отработавшего ядерного топлива, перевезенного с 1-го энергоблока.



Рис. 4. Результаты измерений парового коэффициента реактивности на 2-ом энергоблоке в процессе внедрения уран-эрбиевого топлива и выгрузки ДПК

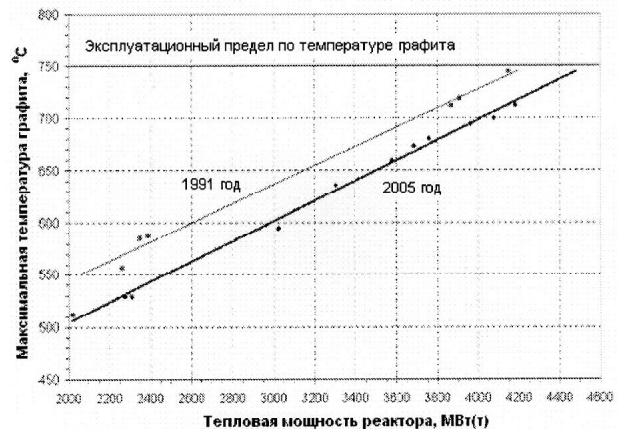


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры графита в активной зоне от тепловой мощности реактора

Таким образом, будут значительно сокращены как потребность в свежем топливе, так и объемы радиоактивных отходов.

### 3. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВНЕДРЕНИИ УРАН-ЭРБИЕВОГО ТОПЛИВА

Игналинская АЭС является крупнейшим производителем электроэнергии в Литве. В 2005 г. на единственном действующем 2-ом энергоблоке Игналинской АЭС выработано 10,34 млрд.кВтч электроэнергии, что составляет 70% всего ее годового количества электроэнергии, произведенной в Литве.

Таким образом, оценка технико-экономических показателей работы энергоблоков Игналинской АЭС при переводе реакторов РБМК-1500 на уран-эрбиевое топливо повышенного обогащения была бы неполной без оценки влияния этого топлива на себестоимость производимой электроэнергии и топливную составляющую себестоимости.

В 1994 г. до загрузки уран-эрбиевого топлива 2,4%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  топливная составляющая себестоимости электроэнергии, характеризующая затраты на приобретение ядерного топлива, составляла 2,28 цт./кВтч. С внедрением уран-эрбиевого топлива 2,4% и 2,6%-ного обогащения  $^{235}\text{U}$  топливная составляющая себестоимости постепенно снижалась и в 2005 г. составила 1,27 цт./кВтч (рис. 6). Это происходило несмотря на то, что топливо повышенного обогащения закупалось по более высокой цене. При этом топливная составляющая себестоимости электроэнергии – это лишь около 20% от всей себестоимости электроэнергии, производимой на ИАЭС.

Снижение топливной составляющей себестоимости электроэнергии связано с ростом средней глубины выгорания выгружаемых из реактора отработавших ТВС и соответственно со снижением темпа перегрузок (рис. 3). Таким образом, снижение расхода свежего топлива на производство 1 кВтч электроэнергии влечет за собой и снижение топливной составляющей себестоимости электроэнергии. В этом плане снижение темпа перегрузок способно компенсировать даже некоторый рост стоимости свежего ядерного топлива, связанного с повышением обогащения  $^{235}\text{U}$  с 2,0 до 2,8%.

Следует подчеркнуть, что себестоимость электроэнергии, производимой на Игналинской АЭС, по меньшей мере в два раза ниже себестоимости электроэнергии, производимой на тепловых электростанциях. Например, всего лишь топливная составляющая себестоимости электроэнергии, производимой на электростанции „Летувос электрине“, составляет 12,38 цт./кВтч [3]. Соответственно различается и цена, по которой электроэнергия продается энергосистеме. ИАЭС электроэнергию продает по 6,58 цт./кВтч, „Летувос электрине“ – по 13,77 цт./кВтч.

В связи с постепенным уменьшением топливной составляющей себестоимости производимой на ИАЭС электроэнергии при внедрении уран-эрбиевого топлива

общая экономия затрат на производство электроэнергии с 1995 г. составила 750 млн. Лт.

Кроме того, в связи с уменьшением темпа перегрузок с 1995 г. количество отработавших ТВС сократилось на 5400 шт. Соответственно снизились и затраты на хранение отработавшего ядерного топлива и расходы на приобретение контейнеров для хранения отработавших ТВС, число которых уменьшилось более, чем на 100 шт.

Относительно стабильная цена на ядерное топливо и низкая себестоимость электроэнергии, производимой на

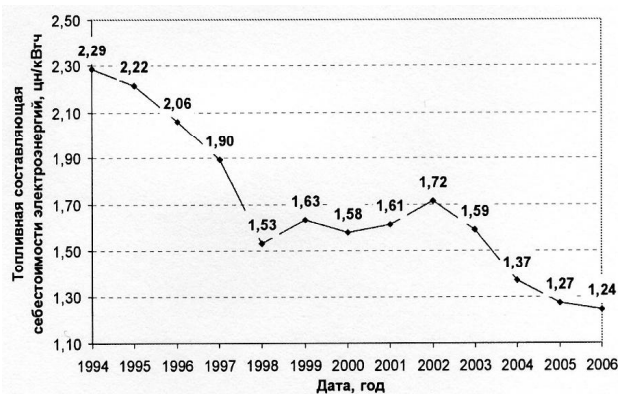


Рис. 6. Изменение топливной составляющей себестоимости электроэнергии с внедрением уран-эрбиевого топлива



Рис. 7. Средние месячные цены на электроэнергию. Источник [www.le.lt/lt/main/market/el\\_trade/price](http://www.le.lt/lt/main/market/el_trade/price).



Рис. 8. Изменение мировых цен на нефть и природный газ (Источник [www.eia.doe.gov/cabs/opeec.html](http://www.eia.doe.gov/cabs/opeec.html), [www.gazprom.ru/articles/article18121.shtml](http://www.gazprom.ru/articles/article18121.shtml))

Игналинской АЭС, являются основным фактором, влияющим и на стабильность отпускаемой в Литве на рынок цены электроэнергии, которая практически не зависит от роста мировых цен на нефть и газ (рис. 7). При этом следует отметить, что цены на нефть с 2001 г. по 2006 г. увеличились в среднем примерно с \$24 до \$60 за баррель, а цены на газ – с \$14 до \$40 за 1000 м<sup>3</sup> и продолжают расти (рис. 8).

В заключение следует также отметить, что в связи с дальнейшим увеличением средней глубины выгорания выгружаемого отработавшего топлива при внедрении уран-эрбиевого топлива 2,8%-ного обогащения <sup>235</sup>U, а также в связи с началом дожигания отработавшего ядерного топлива, пере-везенного из 1-го энергоблока, и соответственно снижением потребности свежего топлива, ожидается еще большее снижение топливной составляющей себестоимости электроэнергии. Все это в конечном итоге будет отражаться на конкурентоспособности производимой на Игналинской АЭС электроэнергии среди других производителей.

#### 4. ВЫВОДЫ

Внедрение уран-эрбиевого топлива повышенного обогащения в реакторах РБМК-1500 позволило существенно улучшить нейтронно-физические характеристики активных зон, повысить ядерную безопасность реакторов и технико-экономические показатели работы энергоблоков Игналинской АЭС.

Дальнейшее внедрение уран-эрбиевого топлива 2,8%-ного обогащения <sup>235</sup>U на 2-ом энергоблоке Игналинской АЭС позволит обеспечить как ядерную безопасность реактора и высокие экономические показатели, так и конкурентоспособность производимой на ИАЭС электроэнергии.

Малая доля топливной составляющей в себестоимости электроэнергии, а в случае ИАЭС еще и дальнейшее ее снижение демонстрируют преимущество ядерной энергетики перед тепловой. И это еще более очевидно при постоянном росте мировых цен на нефть и газ, обуславливающим рост себестоимости электроэнергии, производимой на тепловых электростанциях.

#### В работе приняли участие:

Б. Воронцов, Г. Кривошеин, А. Маркелов, А. Тарасов, А. Юрковичус, В. Власкин, Т. Шевелева, Ю. Саулис.

Поступило 14 04 2006

Подготовлено 27 02 2007

#### Литература

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 1998. 197 p.
2. Gylys J. Branduolinės inžinerijos įvadas. Kaunas: Technologija, 1997. 294 p.
3. Шевалдин В. Н., Негривода Г. П., Воронцов Б. А., Роботко А. В., Бурлаков Е. В., Краюшкин А. В., Федосов А. М., Тишкин Ю. А., Новиков В. Г., Паношкин А. К., Купалов-Ярополк А. И., Николаев В. А., Бибилашвили Ю. К., Ямников В. С. Опыт использования уран-эрбиевого топлива на Игналинской АЭС // Атомная энергия. 1998. Т. 85. Вып. 2. С. 91–95.
4. Ašmantas L. Dėl Nacionalinės energetikos strategijos // www.elektroklubas.lt/Lietuva/index.htm

**Boris Voroncev, Georgij Krivošein, Andrius Jurkevičius, Aleksandr Fedosov, Aleksandr Krajuškin**

#### IMPROVEMENT OF RBMK-1500 REACTOR CORES OF THE IGNALINA NPP. IMPLEMENTATION OF URANIUM–ERBIUM FUEL

##### Summary

One of the most significant Ignalina NPP RBMK-1500 reactor core modifications related with a new type nuclear fuel with burnable neutron absorber implementation is overviewed. The implementation results of the 2.4%, 2.6% and 2.8% uranium-erbium fuel enriched with <sup>235</sup>U and its influence on the reactor neutron-physical and economic parameters are presented. The implementation perspectives of uranium–erbium fuel 2.8% enriched with <sup>235</sup>U on the 2-unit reactor are discussed.

**Key words:** RBMK-1500 reactor, uranium–erbium fuel

**Boris Voroncev, Georgij Krivošein, Andrius Jurkevičius, Aleksandr Fedosov, Aleksandr Krajuškin**

#### IGNALINOS AE RBMK-1500 REAKTORIŲ AKTYVIŲJŲ ZONŲ PATOBULINIMAS. URANO–ERBIO KURO ĮDIEGIMAS

##### Santrauka

Apžvelgta viena pačių svarbiausių Ignalinos AE RBMK-1500 reaktorių aktyviosios zonos modifikacijų, susijusių su naujo tipo branduolinio kuro, kuriame yra išdegantis neutronų sugėriklis, įdiegimu. Pateikiami rezultatai apie 2,4, 2,6, 2,8% įsodrinimo <sup>235</sup>U urano–erbio kuro įdiegimo įtaką pagrindiniams RBMK-1500 reaktorių fizikiniams neutroniniams parametrų ir techniniams ekonominiams rodikliams. Aptartos tolesnės perspektyvos, susijusios su 2,8% įsodrinimo <sup>235</sup>U urano–erbio kuro įdiegimu Ignalinos AE 2-ame energijos bloke.

**Raktažodžiai:** RBMK-1500 reaktorius, urano–erbio kuras