

Микроэкономика повышения безопасности АЭС на основе толерантного топлива

Семенов Евгений Вадимович

аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, evsmv@bk.ru

Харитонов Владимир Витальевич

доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, vvkharitonov@mephi.ru

Аннотация. Приведена аналитическая методика оценки критериев микроэкономической эффективности инвестиций в АЭС с инновационным толерантным ядерным топливом, устойчивым к авариям. Показаны основные направления текущих исследований в мире по разработке различных вариантов толерантного ядерного топлива. Для оценки конкурентоспособности АЭС с топливом, устойчивым к авариям, предложено использовать коэффициенты влияния толерантного топлива на капитальные, операционные и топливные затраты, а также на эффективность использования установленной мощности реактора.

Получены аналитические выражения, содержащие коэффициенты влияния, для оценки основных критериев эффективности инвестиций в АЭС с таким топливом: внутренней нормы доходности, приведенной стоимости электроэнергии, дисконтированного периода окупаемости и чистого дисконтированного дохода. Приведены результаты анализа чувствительности микроэкономических критериев к предложенным коэффициентам влияния, что позволяет определить наиболее важные направления для детального анализа экономических эффектов от внедрения толерантного топлива в ядерную энергетику.

Ключевые слова: безопасность АЭС, толерантное топливо, критерии микроэкономической эффективности, коэффициенты влияния толерантного топлива, чувствительность микроэкономических критериев

Для цитирования: Семенов Е.В., Харитонов В.В. Микроэкономика повышения безопасности АЭС на основе толерантного топлива // Микроэкономика. 2021. №5. С. 49–61. <https://doi.org/10.33917/mic-5.100.2021.49–61>

ECONOMY OF FUEL AND ENERGY COMPLEX

Original article

MICROECONOMICS OF IMPROVING THE SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS BASED ON USING OF ACCIDENT TOLERANT FUEL**Evgeny V. Semenov***postgraduate student, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, evsmv@bk.ru***Vladimir V. Kharitonov***doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Professor, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia, vvkharitonov@mephi.ru*

Annotation. An analytical methodology for evaluating the criteria of microeconomic efficiency of investments in nuclear power plants with innovative accident tolerant nuclear fuel is presented. The main directions of current research in the world on the development of various variants of accident tolerant nuclear fuel are shown. To assess the competitiveness of nuclear power plants with accident tolerant fuel, it is proposed to use the coefficients of the influence of tolerant fuel on capital, operating and fuel costs, as well as on the efficiency of using the installed reactor capacity. Analytical formula containing influence coefficients are obtained to evaluate the main criteria for the effectiveness of investments in nuclear power plants with such type of fuel: internal return rate, levelized cost of electricity, discounted payback period and net present value. The results of the analysis of the sensitivity of microeconomic criteria to the proposed influence coefficients are presented. This approach allows us to determine the most important directions for a detailed analysis of the economic effects of the integration of accident tolerant fuel into nuclear power.

Keywords: *safety of nuclear power plant, accident tolerant fuel, criteria of microeconomic efficiency, coefficients of influence of tolerant fuel, sensitivity of microeconomic criteria*

For citation: *Semenov E. V., Kharitonov V.V. Microeconomics of improving the safety of nuclear power plants based on using of accident tolerant fuel. Microeconomics. 2021;5: 49–61 (In Russ.). [https://doi.org/10.33917/mic-5.100.2021.49–61](https://doi.org/10.33917/mic-5.100.2021.49-61)*

**ТРЕБОВАНИЯ
К КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИКЕ**

В 32 странах мира, где проживает более 2/3 человечества, производят электроэнергию 443 энергетических ядерных реактора (на июнь 2021 г.), на долю которых приходится чуть больше 10% произведенной в мире электроэнергии (за 2020 г.). В 13 странах доля ядерного электричества превышает 30% (во Франции более 70%) [1]. Высокими темпами развивается ядерная энергетика в Китае, где планируется довести число действующих энергетических ядерных реакторов до 300 к 2050 г. [2] (на июнь 2021 г. работал 51 реактор, больше только в США — 93 и Франции — 56 [1]). В предстоящие три десятилетия ожидается темп роста производства электроэнергии в мире око-

ло 2%/год. Чтобы сохранить или увеличить долю производства электроэнергии на АЭС с нынешних 10% темп развития мировой ядерной энергетике должен превышать 2%/год [3, 4]. В условиях активной политики декарбонизации энергетике и прогнозируемого исчерпания углеводородного топлива все более осознается роль ядерной энергетике как важнейшего элемента «зеленого квадрата» — концепции ускоренного развития гидроэнергетике, солнечной, ветровой и ядерной энергетике.

Социальная приемлемость крупномасштабной ядерной энергетике возможна при соблюдении ряда требований, впервые сформулированных в работах [5, 6], а затем в международном проекте ИНПРО [7]. В редакции [8] эти 5 требований выглядят так:

«1) снятие ограничений по топливным ресурсам за счет эффективного использования уранового сырья при многократном рециклировании ядерного топлива в замкнутом ядерном топливном цикле (ЯТЦ);

2) исключение тяжелых аварий на АЭС с радиационными последствиями, требующими эвакуации или отселения населения;

3) технологическое усиление режима нераспространения ядерного оружия;

4) замыкание ядерного топливного цикла с захоронением радиоактивных отходов в радиационно-эквивалентном и онко-эквивалентном состоянии по отношению к добываемому урановому сырью;

5) экономическая конкурентоспособность по отношению к другим источникам энергии» [8].

Согласно [5, 6, 8] в наибольшей степени всем этим требованиям удовлетворяет реактор-размножитель на быстрых нейтронах с плутониевым топливом и свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ, соответствующий парадигме «чем безопаснее, тем дешевле». При усилении экологических ограничений, как показано в работе [9], «дополнительное развитие АЭС обеспечивает не только экономию топливных, но и капитальных затрат в электроэнергетике. При этом последний фактор становится все более значимым», поскольку высокая стоимость современных моделей АЭС с тепловыми реакторами — это прежде всего плата за безопасность [8].

Однако, существенный вклад быстрых реакторов в мировую ядерную энергетику вряд ли состоится ранее второй половины текущего века. А пока общественное мнение относительно ядерной энергетики будет формироваться на основе безопасности действующих и строящихся тепловых реакторов, в основном, типа PWR (ВВЭР). Последствия двух крупных аварий на АЭС с реактором РБМК (Чернобыль, СССР, апрель 1986 г.) и с 4-мя реакторами BWR (Фукусима, Япония, март 2011 г.) были значительно усугублены так называемой паро-циркониевой реакцией, в результате которой выделяется взрывоопасный водород. Цирконий используется практически во всех водо-охлаждаемых реакторах в качестве оболочки тепловыделяющих

элементов (ТВЭЛ), поскольку почти не поглощает нейтроны, а также обладает хорошей коррозионной устойчивостью при нормальных режимах работы. Однако, при аварийном (неконтролируемом) росте температуры в активной зоне реакторов цирконий вступает в химическое взаимодействие (экзотермическое) с парами воды при температуре выше 800°C: $Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2+5.8$ МДж/кг. Поэтому фактически с 2011 г. в научной среде формируется повестка, предполагающая создание новых типов ядерного топлива, устойчивого к авариям. Данный вид топлива принято называть в литературе «толерантным» — от английского определения «Accident Tolerant Fuel» (далее — ATF) [10–19]. Практически все производители ядерного топлива вступили в гонку по разработке ATF. Очевидно, кто первым выйдет на рынок с новым референтным продуктом, тот обеспечит себе преимущественное положение на рынке на многие годы. Для отечественной топливной компании АО «ТВЭЛ» данная тенденция, с одной стороны, создает окно возможностей, которое может позволить выйти на рынок топлива АЭС зарубежного дизайна (ТВС-квадрат), с другой — усиливает угрозу не только лишиться этого рынка, но и потерять почти 100%-ю долю на рынке АЭС отечественного дизайна за рубежом.

ВИДЫ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА

В настоящее время практически во всех энергетических реакторах используется топливо в виде диоксида (двуоксида) урана UO_2 , отличающегося высокой температурой плавления (более 3000°C) и химической устойчивостью. Диоксид урана с обогащением по изотопу ^{235}U до 5% (в природном уране концентрация этого делящегося изотопа всего 0,711% по массе) в форме таблеток диаметром около 8 мм помещается в трубчатую оболочку ТВЭЛ из циркониевого сплава. Такое топливо показывает высокую работоспособность в нормальных условиях эксплуатации. Недостатком диоксида урана является низкая теплопроводность, из-за которой рабочая температура в центре топливной таблетки повышается до 1500°C, способствуя высокому теплосохранению и низкому удержанию газообраз-

ных и летучих продуктов деления в топливной матрице, в то время как температура оболочки твэла остается относительно невысокой — около 330°C.

Топливо, устойчивое к авариям (толерантное топливо — ATF), призвано исключить или существенно замедлить паро-циркониевую реакцию и компенсировать недостатки диоксида урана. В обзорном докладе [12] экспертов из 35 учреждений, представляющих 15 стран-членов Ядерного энергетического агентства (Nuclear Energy Agency — NEA), выделено 5 направлений исследования толерантного топлива:

1) Цифровые показатели и сценарии, демонстрирующие безопасность, конкурентоспособность и экономичность АЭС с ATF.

2) Материалы и покрытия оболочки твэлов и регулирующих стержней:

— защитные покрытия традиционных циркониевых оболочек твэлов (например, металлические покрытия из хрома толщиной 7–10 мкм [14], из сплавов на основе хрома Cr-Al или Cr/FeCrAl (фехраль); керамические покрытия из нитридов хрома CrN и CrAlN, титана TiN и TiAlN и др. [12]);

— стальные оболочки (например, из хромоникелевых сплавов FeCrNi марки 304SS в США или 42ХНМ в России [13], и хромоалюминиевых сплавов FeCrAl [12]);

— оболочки из тугоплавких металлов (например, из молибдена);

— оболочки из карбида кремния SiC, армированные SiC-волокнами (SiC/SiC-композиты); оболочки из карбида кремния являются полностью инновационным материалом для водо-охлаждаемых реакторов.

3) Усовершенствованный состав топлива:

— легированный диоксид урана UO_2 с повышенной теплопроводностью за счет оксидной легирующей добавки (Cr_2O_3 и $Al_2O_3-Cr_2O_3$); композитное топливо, в котором в металлической матрице распределяют фрагменты керамического ядерного топлива называют керметным топливом (CER от ceramic UO_2 и MET от metallic additive)[12];

— высокоплотное и высокотеплопроводное топливо, отличающееся более высоким содержанием урана в единице объема (урано-

емкостью) топлива (нитридное уран-плутониевое топливо U (Pu) N; силицидное топливо U_3Si_2 ; карбидное уран-плутониевое топливо U (Pu) C);

— микро-капсулированное топливо (называемое TRISO-SiC-composite pellets) в виде сферических топливных частиц диаметром менее 1 мм, покрытых тонкими слоями карбида кремния SiC и помещенных в матрицу из SiC. Топливные микрочастицы могут быть изготовлены как из диоксида урана UO_2 , так и из карбида UC или карбонитрида урана U(C, N).

4) Оценка уровня технологической готовности ATF с конкретной комбинацией топлива и оболочки твэла. Степень готовности определяется на основе анализа технологии фабрикации твэлов и тепловыделяющих сборок (ТВС), поведения твэлов при облучении в реакторе, уровня безопасности при нормальной работе, ожидаемом нарушении нормальной эксплуатации и проектных и за-проектных авариях.

5) Проблемы взаимодействия между топливом и оболочкой твэлов

Отечественной топливной компанией АО «ТВЭЛ» по данным [13–16, 20] проведен ряд циклов реакторных испытаний ATF с нанесением хромового покрытия на оболочки твэлов из традиционного циркониевого сплава Э110, заменой Э110 на хром-никелевый сплав 42ХНМ и заменой диоксида урана на металлическое уран-молибденовое топливо. Планируется приступить к облучению в реакторе вариантов ATF с перспективным топливом дисилицидом урана и оболочками из SiC/SiC-композита.

Варианты ATF с традиционным или легированным диоксидом урана и хромированной оболочкой из циркониевого сплава отмечаются в качестве более простых с точки зрения технической реализуемости. Другие сочетания топлива и оболочки твэлов в той или иной мере изучались и применялись в транспортных или исследовательских реакторах. Однако их применение в коммерческих энергетических реакторах предполагает более длительные исследования и более дальний горизонт внедрения (до 20 лет).

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ
КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНВЕСТИЦИЙ В АЭС**

Затраты на разработку толерантного топлива, создание новых технологических линий для производства его компонентов и фабрикация (изготовления) ТВС, а также на обращение с отработавшим ATF могут вызвать увеличение топливных затрат АЭС по сравнению с затратами на традиционное топливо. Для прогнозирования условий, при которых ATF может улучшить не только безопасность, но и экономику АЭС, воспользуемся аналитической методикой, представленной в работе [21] для оценки критериев эффективности инвестиций в энергоблок АЭС. Для целей настоящей работы достаточно ограничиться так называемым базовым вариантом, в котором денежные потоки постоянны во времени. Учет инфляции, эскалации цен, рисков и других трудно прогнозируемых факторов можно сделать по методике [22]. Рассмотрим сначала прогнозируемые критерии конкурентоспособности АЭС.

Главным микроэкономическим критерием эффективности инвестиционного проекта, характеризующим его прибыльность, служит чистый дисконтированный доход *NPV* — по существу, приведенная к некоторому моменту времени T_c чистая дисконтированная прибыль, накопленная за период жизненного цикла проекта — периоды сооружения и эксплуатации энергоблока АЭС. Задачей инвестиционного анализа является нахождение инженерно-экономических параметров проекта (энергоблока), определяющих ежегодные затраты и доходы, при которых чистый дисконтированный доход имеет наибольшее положительное значение. При $NPV < 0$ проект убыточен. В работе [21] традиционным суммированием дисконтированных затрат и доходов (выручки) с учетом их разновременности получена новая наглядная рабочая формула для аналитического расчета *NPV* при неизменной ставке дисконтирования r в следующем виде:

$$NPV = - \sum_{t=1}^{T_c} \frac{K_t}{(1+r)^{t-T_c}} + \sum_{t=T_c+1}^{T_c+T_3} \frac{R_t - Y_t}{(1+r)^{t-T_c}} = -K\varphi_c + \frac{R-Y}{r}\varphi_3, \quad (1)$$

где $K = \sum_{t=1}^{T_c} K_t$ — суммарные капитальные затраты (руб) за период сооружения энергоблока T_c (лет), R_t и R — текущая и среднегодовая (за все время эксплуатации) выручка (руб/год), Y_t и Y — текущие и среднегодовые эксплуатационные затраты (руб/год). Безразмерные коэффициенты приведения φ_c и φ_3 учитывают соответственно период сооружения T_c и эксплуатации T_3 энергоблока и определяются формулами, вытекающими из определения средневзвешенной величины:

$$\varphi_c = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^{T_c} \frac{K_t}{(1+r)^{t-T_c}} \approx \frac{(1+r)^{T_c} - 1}{rT_c}; \quad (2)$$

$$\varphi_3 = \frac{r}{R-Y} \sum_{t=T_c+1}^{T_c+T_3} \frac{R_t - Y_t}{(1+r)^{t-T_c}} \approx 1 - (1+r)^{-T_3}. \quad (3)$$

Правые части выражений (2) и (3) соответствуют базовому варианту при постоянных ежегодных затратах и выручке. Коэффициенты приведения соответствуют привязке момента приведения денежных потоков к началу эксплуатации энергоблока и указывают на отличие реального проекта от «идеального», для которого $\varphi_c = \varphi_3 = 1$. Например, при длительности строительства энергоблока 7 лет, эксплуатации 60 лет и ставке дисконтирования 5%/год из выражений (2) и (3) получаем коэффициенты приведения $\varphi_c = 1,16$ и $\varphi_3 = 0,95$.

Из математического определения *NPV* вытекают три вспомогательных, но популярных и важных для анализа критерия конкурентоспособности: внутренняя норма доходности *IRR*, приведенная (минимальная) стоимость отпускаемой электроэнергии *LCOE* (Levelized Costs of Electricity) и дисконтированный период окупаемости θ , отсчитываемый от начала эксплуатации АЭС. Величина *IRR* служит ограничением сверху на ставку дисконтирования (доходность проекта $r < IRR$) и, соответственно, на процентную ставку привлеченных финансовых ресурсов (кредита) и определяется из условия $NPV(r = IRR) = 0$ выражениями:

$$IRR \frac{\varphi_c(r = IRR)}{\varphi_3(r = IRR)} = IRR_0; \quad IRR_0 = \frac{R-Y}{K}. \quad (4)$$

Здесь IRR_0 (1/год или %/год) — норма доходности «идеального проекта» (при $\varphi_c = \varphi_3 = 1$), равная отношению среднегодовой прибыли к капитальным затратам, причем $IRR < IRR_0$. Например, при $IRR_0 = 10\%/год$, $T_c = 7$ лет и $T_3 = 60$ лет получаем согласно (2) — (4) $IRR = 7,7\%/год$. Чем выше IRR , тем устойчивее проект и тем больше возможностей найти необходимое количество кредитных предложений на рынке. Как следует из (4) внутренняя норма доходности тем больше, чем больше среднегодовая прибыль $R - Y$ и чем меньше капитальные затраты K . Поскольку годовая выручка энергоблока пропорциональна среднегодовому производству продаваемой электроэнергии E (кВт·ч/год) и отпускной цене электроэнергии C (руб/кВт·ч), то есть

$$R = E \cdot C; E = W \cdot \Delta t \cdot \text{КИУМ}, \quad (5)$$

то с ростом E и C величина IRR растет. Здесь W — установленная (проектная) мощность реактора (кВт), $\Delta t = 8760$ час/год — число часов в году, КИУМ — коэффициент использования установленной мощности реактора (КИУМ < 1), характеризующий отношение проданной на рынке электроэнергии за год к ее максимально возможному производству $W \cdot \Delta t$. Заметим, что в формулы для критериев эффективности инвестиций входит именно проданное (оплаченное) количество электроэнергии в годовом исчислении.

Цена отпускаемой энергоблоком электроэнергии должна превышать минимально допустимую, соответствующую условию $NPV = 0$ в (1), и называемую приведенной стоимостью электроэнергии $LCOE$:

$$LCOE = \frac{AK + Y}{E}; A = r \frac{\varphi_c}{\varphi_3} \approx \frac{(1 + r)^{T_c} - 1}{T_c(1 - (1 + r)^{-T_3})}. \quad (6)$$

В этих выражениях A — эффективная норма амортизационных отчислений, $A > r$. При отпускной цене электроэнергии, равной $LCOE$, проект окупается в конце жизненного цикла, то есть через $T_3 = 60$ лет после начала эксплуатации энергоблока. Для обеспечения конкурентоспособности и прибыльности АЭС величина $LCOE$ должна быть ниже рыночной цены C в регионе расположения АЭС. Из сравнения выражений (4) — (6) следует, что для прибыль-

ности проекта внутренняя норма доходности IRR_0 должна превышать норму амортизации A .

Дисконтированный период окупаемости инвестиций Θ (после начала эксплуатации реактора) определяется в общем случае последовательным расчетом $NPV(t)$ как функции времени реализации проекта и соответствует моменту времени, когда $NPV(t = T_c + \Theta) = 0$. В итоге из (1) — (3) получаем:

$$\Theta = \frac{-\ln\left(1 - \frac{r}{IRR_0} \varphi_c\right)}{\ln(1 + r)}. \quad (7)$$

Здесь: φ_c — безразмерный коэффициент приведения (2), $\varphi_c \geq 1$. В интересах инвестора величина периода окупаемости должна быть минимальной (существенно меньше периода эксплуатации). Например, при $IRR_0 = 10\%/год$ и $T_c = 7$ лет период окупаемости энергоблока составит $\Theta > 18$ лет, если ставка дисконтирования превышает 5%/год (табл. 1). Как видно, условия прибыльности проекта требуют низких ставок дисконтирования и, соответственно, дешевых кредитов.

Таким образом, с помощью выражений (1) — (7) можно аналитически оценить основные критерии прибыльности проектов АЭС. Требования к ключевым факторам, влияющим на прибыльность проектов, то есть на высокие положительные значения NPV и внутренней нормы доходности IRR , минимальные $LCOE$ и период окупаемости Θ , таковы: снижение капитальных и эксплуатационных затрат и сроков сооружения энергоблоков, увеличение производства электроэнергии за счет роста мощности и КИУМ, а также облегчение доступа к дешевому финансированию (низким ставкам дисконтирования). Для примера в табл. 1 приведены типичные инженерно-экономические параметры энергоблока с реактором типа PWR установленной электрической мощностью 1200 МВт с традиционным топливом при ставках дисконтирования 3, 5 и 7%/год.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЛИЯНИЯ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА НА МИКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АЭС

Толерантное топливо может влиять на экономические параметры АЭС ($K, R, Y, \text{КИУМ}$)

Таблица 1. Инженерно-экономические параметры инвестиционного проекта одноблочной АЭС с реактором типа PWR

№ п/п	Параметр	Базовое значение		
	Установленная мощность реактора (электрическая), МВт	1200		
	КИУМ	0,85		
	Годовая выработка электроэнергии E , ТВт·ч/год	8,9		
	Капитальные затраты K , млрд долл. США	5		
	Эксплуатационные затраты Y , млн долл. США/год	150		
	Срок строительства энергоблока T_c , лет	7		
	Срок эксплуатации энергоблока $T_э$, лет	60		
	Отпускная цена электроэнергии C , долл. США/МВт·ч	72		
	Годовая выручка $R = EC$, млн. долл. США/год	643		
	Норма доходности (макс.) IRR_0 , %/год	9,9		
	Норма доходности IRR , %/год	7,7		
	Ставка дисконтирования r , %/год	3	5	7
	Коэффициент приведения φ_c	1,09	1,16	1,24
	Коэффициент приведения $\varphi_э$	0,83	0,95	0,98
	Норма амортизации A , %/год	3,9	6,1	8,8
	Приведенная стоимость электроэнергии $LCOE$, долл. США/МВт·ч	39	51	66
	Дисконтированный период окупаемости θ , лет	14	18	31
	Чистый дисконтированный доход NPV , млрд долл. США	8,1	3,5	0,7

по нескольким каналам в зависимости от вида топлива.

Капитальные затраты. За последние 20 лет капитальные затраты на сооружение блока АЭС в некоторых странах возросли (в текущих ценах) в несколько раз и достигли величин $K \approx 5-8$ млрд долл. США [24]. Соответственно, удельные капитальные затраты ($q = K/W$, в расчете на кВт установленной мощности) составляют более 3000–5000 долл. США/кВт (эл.). Одним из главных факторов роста капитальных затрат является сооружение новых инженерных барьеров для обеспечения безопасности АЭС. Известный призыв к новой пара-

дигме «чем безопаснее, тем дешевле» за счет принципов «естественной безопасности» пока не нашел всеобъемлющей поддержки проектировщиков АЭС. Технология ATF может в некоторой степени способствовать приближению к вышеназванной парадигме. Благодаря повышенной устойчивости толерантного топлива к аварийным ситуациям возможно сокращение затрат на некоторые инженерные барьеры безопасности. Например, возможно упразднение систем нейтрализации водорода из-за отсутствия паро-циркониевой реакции, замена специальных дизель-генераторов на более дешевые стандартные, уменьшение

площади санитарно-защитной зоны вокруг АЭС и др. Допустим, что в этом случае инвестиции на сооружение блока АЭС сократились по сравнению с традиционным энергоблоком на величину ΔK , относительную величину которой $\mu_K = \Delta K/K$ назовем коэффициентом влияния ATF на капитальные затраты.

Эксплуатационные затраты. Эксплуатационные затраты АЭС принято разделять на операционные $Y_{O\&M}$ и топливные Y_F : $Y = Y_{O\&M} + Y_F$. Изменение топливных затрат ΔY_F при использовании ATF связано с изменением состава и обогащения топлива или (и) изменения материала (или технологии обработки) оболочек твэлов, а также с изменением годовой потребности энергоблока в топливе в связи с изменением глубины его выгорания (и, соответственно, длительности топливной кампании). Затраты на обращение с отработавшим ATF также входят в состав Y_F . В итоге коэффициент влияния ATF на топливные затраты (со знаком плюс или минус в зависимости от вида ATF) обозначим через $\mu_F = \Delta Y_F/Y$.

Влияние ATF на операционные затраты связано в основном, по-видимому, с сокращением страховых выплат вследствие снижения рисков усугубления аварий благодаря устойчивости толерантного топлива (снижение вероятности аварии и наносимого ею ущерба). Соответствующий коэффициент влияния обозначим $\mu_R = \Delta Y_{O\&M}/Y$ (индекс от слова Risk).

Производство электроэнергии. При заданной установленной мощности реактора объем отпущенной (проданной) электроэнергии зависит только от величины КИУМ. Если отсутствуют внеплановые отключения реактора, то величина КИУМ зависит от затрат энергии на собственные нужды АЭС (около 6%) и от длительности процесса перегрузки топлива и совмещенного с ним планово-предупредительного ремонта. На современных АЭС перегрузка топлива (замена трети или четверти ТВС на свежие) в 18-месячном топливном цикле занимает до 1,5 месяцев. Использование ATF с плотным топливом (U-Mo, U₃Si₂ и др.) позволит увеличить глубину выгорания топлива и длительность топливной кампании до 24 месяцев с соответствующим ростом КИУМ. Коэффициент влияния ATF на производство электроэнергии обозна-

чим $\mu_E = \Delta E/E$. С учетом доли η_{CH} затрат электроэнергии на собственные нужды (5–7%) величина КИУМ не может превышать величины $КИУМ < 1 - \eta_{CH} \approx 0,93 - 0,95$.

Повышение глубины выгорания топлива B (МВт·сут/кгU), необходимое для удлинения топливной кампании реактора со среднегодовой тепловой мощностью $Q = W \cdot КИУМ/\eta$ (МВт), ведет к пропорциональному снижению среднегодовой потребности реактора в топливе P (кг/год) [25]

$$P = \frac{Q}{B} 365 \left(\frac{\text{сут}}{\text{год}} \right), \quad (8)$$

что может сказаться на снижении затрат при производстве топлива и на уменьшении топливного коэффициента влияния μ_F вплоть до отрицательных значений (η — КПД-нетто энергоблока, около 34%) [25].

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ К КОЭФФИЦИЕНТАМ ВЛИЯНИЯ ATF

Критерии эффективности инвестиций в энергоблок АЭС с толерантным топливом получаем из выражений (4), (6) и (7) при подстановке в них коэффициентов влияния ATF:

$$IRR_{0ATF} = \frac{(1 + \mu_E)R - (1 + \mu_R + \mu_F)Y}{(1 + \mu_K)K}; \quad (9)$$

$$LCOE_{ATF} = \frac{(1 + \mu_K)AK + (1 + \mu_R + \mu_F)Y}{(1 + \mu_E)E}; \quad (10)$$

$$\Theta_{ATF} = \frac{-\ln \left(1 - \frac{r}{IRR_{0ATF}} \varphi_C \right)}{\ln(1 + r)}. \quad (11)$$

В этих формулах параметры R , Y , K и E относятся к энергоблоку с традиционным топливом. Изменяя коэффициенты влияния (в характерных для них диапазонах) можно по формулам (9) — (11) оценить чувствительность критериев эффективности инвестиций к коэффициентам влияния ATF и определить наиболее важные направления для детального анализа экономических эффектов от внедрения толерантного топлива в ядерную энергетику.

Результаты расчета чувствительности критериев эффективности инвестиций в проект

АЭС к коэффициентам влияния толерантного топлива представлены на рис. 1–3. Диапазон коэффициентов влияния выбран от «-0,3» до «+0,3» за исключением коэффициента μ_E , увеличение которого ограничено верхним значением КИУМ $\approx 0,95$. Равенство $\mu_R = \mu_F$ на графиках означает одинаковое влияние операционных и топливных затрат на критерии эффективности инвестиций.

Рисунок 1. Чувствительность внутренней нормы доходности проекта АЭС (IRR_0 , %/год) к коэффициентам влияния ATF на капитальные затраты (μ_K), эксплуатационные затраты (операционные μ_R и топливные μ_F) и производство электроэнергии на продажу (μ_E) при ставке дисконтирования 5%/год и параметрах энергоблока из табл. 1.

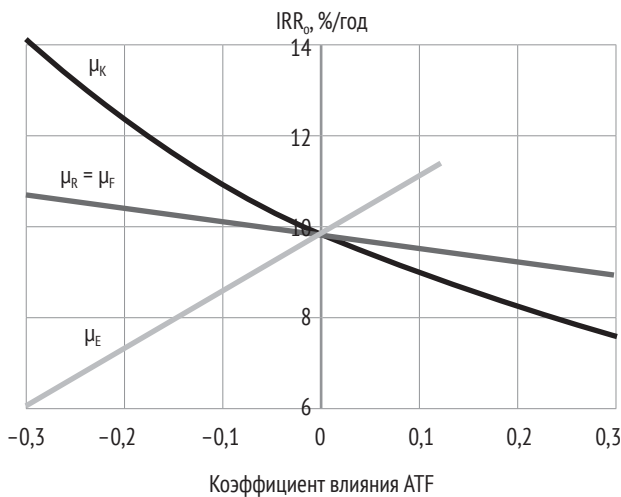


Рисунок 2. Чувствительность приведенной стоимости электроэнергии АЭС (LCOE, долл. США/МВт·ч) к коэффициентам влияния ATF на капитальные затраты (μ_K), эксплуатационные затраты (операционные μ_R и топливные μ_F) и производство электроэнергии на продажу (μ_E) при ставке дисконтирования 5%/год и параметрах энергоблока из табл. 1.

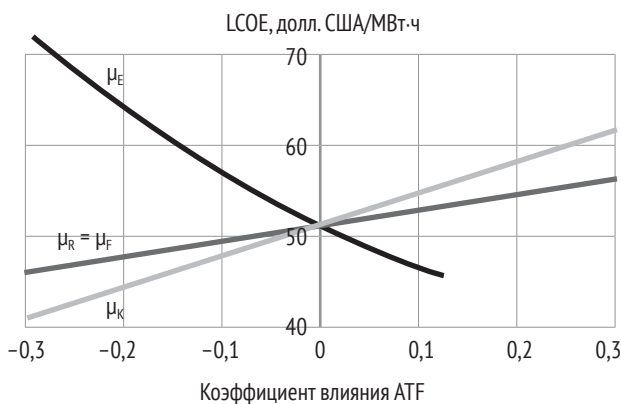
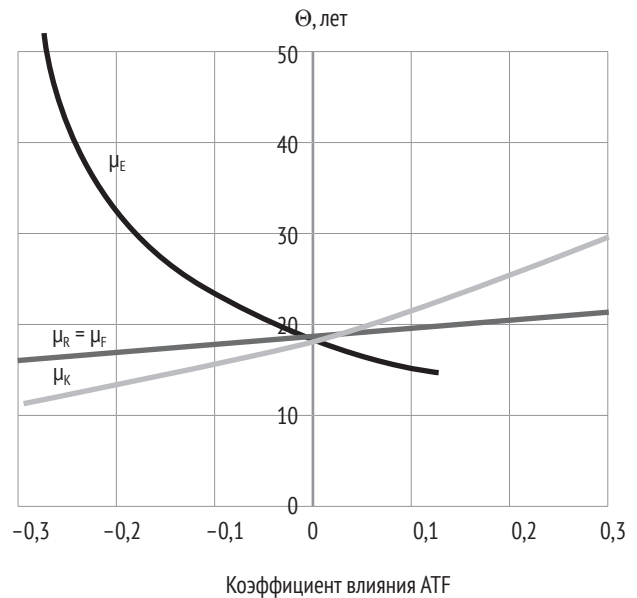


Рисунок 3. Чувствительность дисконтированного периода окупаемости проекта АЭС (Θ , лет от начала эксплуатации энергоблока) к коэффициентам влияния ATF на капитальные затраты (μ_K), эксплуатационные затраты (операционные μ_R и топливные μ_F) и производство электроэнергии на продажу (μ_E) при ставке дисконтирования 5%/год и параметрах энергоблока из табл. 1.



Как следует из рис. 1–3 желательное увеличение внутренней нормы доходности проекта АЭС, а также снижение стоимости электроэнергии и периода окупаемости достигается в большей степени эффектом снижения капитальных затрат и увеличения КИУМ, нежели эффектом снижения операционных и топливных затрат. Однако, совместное влияние снижения операционных и топливных затрат может дать эффект, соизмеримый со снижением капитальных затрат. Возможное удорожание толерантного топлива (по сравнению с традиционным) может быть компенсировано снижением на ту же величину операционных затрат (например, за счет сокращения страховых выплат) в силу почти линейной зависимости критериев эффективности инвестиций от коэффициентов влияния ATF на операционные и топливные затраты.

В качестве примера рассмотрим влияние увеличения выгорания толерантного топлива с 50 до 70 МВт·сут/кгU и периода времени между перегрузками топлива (длительности

непрерывной работы реактора) с 18 до 24 месяцев. В этом случае, согласно выражению (8), среднегодовая потребность реактора в топливе снижается на 40%. Увеличение на 40% выгорания топлива при неизменной загрузке активной зоны требует увеличения обогащения топлива также на 40% (приблизительно). Среднегодовые затраты АЭС на свежее топливо составляют [25]

$$Y_F = (C_X + C_\Phi)P; C_X = \frac{x-y}{c-y}C_F + \frac{R}{P}C_R + \frac{x-c}{c-y}C_D. \quad (12)$$

Здесь обозначено: $C_X + C_\Phi$ — стоимость свежей тепловыделяющей сборки (ТВС) в расчете на 1 кг U в ней (долл. США/кгU), C_X — стоимость обогащенного гексафторида урана с обогащением x , C_Φ — стоимость фабрикации ТВС (около 350 долл. США/кгU для традиционного топлива). Стоимость обогащенного гексафторида урана C_X , как показано во второй формуле (12), зависит от затрат на покупку природного урана в форме гексафторида урана (с концентрацией ^{235}U $c = 0,711\%$) по цене C_F , затрат на процесс обогащения природного урана при цене единицы работы разделения C_R и на утилизацию обедненного (отвального) гексафторида урана по цене C_D (около 8,5 долл. США/кгU). Стоимость обогащенного гексафторида урана минимальна при некоторой оптимальной концентрации ^{235}U в отвале y , зависящей только от отношения цен $(C_F + C_D)/C_R$ [25]. При рыночных котировках 2020 г. на природную окись-закись урана, конверсию ее в гексафторид урана и на работу разделения получаем $C_F = 96$ долл. США/кгU и $C_R = 49$ долл. США/ЕРР, что дает $(C_F + C_D)/C_R = 2,14$ и $y = 0,153\%$. Затраты работы разделения в расчете на единицу массы обогащенного продукта зависят от концентраций урана-235 в сырье и продуктах обогатительного производства [25]

$$\frac{R}{P} = V(x) + \frac{x-c}{c-y}V(y) - \frac{x-y}{c-y}V(c). \quad (13)$$

Здесь $V(z) = (1-2z)\ln \frac{1-z}{z}$ — так называемый разделительный потенциал, $z = x, y$ или c .

Так, современное ядерное топливо с 18-месячным топливным циклом характеризуется обогащением $x=4,4\%$, средней глубиной выгорания $V=50$ МВт·сут/кгU и стоимостью то-

плива 1530 долл. США/кгU (при вышеприведенных рыночных ценах). Реактор с установленной электрической мощностью 1200 МВт и среднегодовой тепловой мощностью 3000 МВт (при КИУМ = 0,85 и КПД = 34%) потребляет ежегодно 22 тU, что при цене топлива 1530 долл. США/кгU дает среднегодовые расходы на свежее топливо $Y_F = 33,5$ млн долл. США/год и вклад в стоимость электроэнергии $Y_F/E = 3,8$ долл. США/МВт·ч.

Толерантное топливо с 24-месячным топливным циклом с глубиной выгорания 70 МВт·сут/кгU способствует повышению КИУМ на 9%, но требует увеличения обогащения до 6,3% и стоимости обогащенного урана до 1810 долл. США/кгU, что в 1,5 раза дороже обогащения стандартного топлива. Если бы стоимость фабрикации толерантного топлива осталась на уровне 350 долл. США/кгU, то при уменьшении расхода толерантного топлива до 16,6 т/год (на 32% вследствие роста выгорания и КИУМ) годовые затраты реактора на его приобретение составили бы $Y_F = 34,6$ млн долл. США/год, а их вклад в стоимость электроэнергии Y_F/E остался бы практически неизменным, то есть коэффициент влияния $\mu_F = 0$.

Приведенный пример свидетельствует о необходимости комплексного анализа инженерно-экономических параметров АЭС для определения коэффициентов влияния толерантного топлива на экономику АЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ведущих ядерно-энергетических компаниях и университетах мира ведутся разработки ядерного топлива, устойчивого к авариям (толерантного топлива — АТФ), призванного исключить или существенно замедлить парциркониевую реакцию и компенсировать недостатки традиционного топливного материала коммерческих реакторов — диоксида урана. В настоящей работе показаны основные направления текущих исследований в мире по разработке различных вариантов толерантного ядерного топлива.

Приведена аналитическая методика оценки критериев микроэкономической эффективности инвестиций в АЭС (внутренней нормы доходности, приведенной стоимости элек-

троэнергии, дисконтированного периода окупаемости и чистого дисконтированного дохода) с инновационным толерантным ядерным топливом, устойчивым к авариям. Для оценки конкурентоспособности АЭС с топливом, устойчивым к авариям, предложено использовать коэффициенты влияния толерантного топлива на капитальные, операционные и топливные затраты, а также на эффективность использования установленной мощности реактора.

Представлены результаты анализа чувствительности микроэкономических критериев к предложенным коэффициентам влияния, что позволяет определить наиболее важные направления для детального анализа экономических эффектов от внедрения толерантного топлива в ядерную энергетику. Отмечена необходимость комплексного анализа инженерно-экономических параметров АЭС для определения коэффициентов влияния толерантного топлива на экономику АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Information Library (June, 2021). World Nuclear Association. URL: <https://www.world-nuclear.org/>
2. *Y. Guoan, Z. Weifang, H. Hui, Z. Hua.* The Strategy of Closed Nuclear Fuel Cycle based on Fast Reactor and its Back-End R&D Activities. Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the past, enabling the future. // Proceedings of an International Conference organized by the International Atomic Energy Agency in cooperation with the OECD Nuclear Energy Agency, the European Commission and the World Nuclear Association and held in Vienna, 24–28 June 2019. IAEA, Vienna, 2020. P. 63–72.
3. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. 2020 Edition. IAEA, Vienna, 2020. 137 p.
4. *Ульянин Ю.А., Харитонов В.В., Стоянов А.Д.* Сценарии развития мировой ядерной энергетики в условиях ограниченности ископаемых ресурсов // Экономические стратегии. 2021. Т. 23, №3 (177). С. 24–31.
5. *Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. и др.* Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) // Атомная энергия. 1992. Т. 72, вып. 4. С. 317–328.
6. Белая книга ядерной энергетики. Монография под общей редакцией проф. Е.О. Адамова. М.: НИКИЭТ, 2001. 270 с.
7. Введение в использование методологии ИНПРО для оценки ядерно-энергетических систем. Доклад в рамках Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО). (Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment). NP-T-1.12. Вена, МАГАТЭ, 2011. 49 с.
8. *Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В.* Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии // Атомная энергия. 2020. Т. 129, №4. С. 185–194.
9. *Адамов Е.О., Толстоухов Д.А., Панов С.А., Веселов Ф.В., Хоршев А.А., Соляник А.И.* Роль АЭС в электроэнергетике России с учетом ограничений выбросов углерода // Атомная энергия. 2021. Т. 130, №3. С. 123–131.
10. Increased Accident Tolerance of Fuels for Light Water Reactors. Workshop Proceedings OECD/NEA Headquarters Issy-les-Moulineaux, France, 10–12 December 2012. NEA-OECD, 2013. 534 p.
11. Development of LWR Fuels with Enhanced Accident Tolerance. Task 4 — Preliminary Business Plan. Westinghouse Electric Company LLC, General Atomics, Southern Nuclear Company. RT-TR-13-20, October 2, 2013. 33 p.
12. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. NEA-OECD, 2018. 372 p.
13. *Карпюк Л.А., Кузнецов В.И., Маслов А.А., Новиков В.В., Орлов В.К., Рыкунов Д.В., Титов А.О.* Топливо с хромовым покрытием оболочки твэла, устойчивое к аварии // Атомная энергия. 2021. Т. 130, №3. С. 142–148.
14. *Карпюк Л.А., Савченко А.М., Леонтьева-Смирнова М.В., Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В.* Перспективы применения стальных оболочек для твэлов реакторов типа ВВЭР в рамках концепции топлива, устойчивого к аварийным ситуациям // Атомная энергия. 2020. Т. 128, №4. С. 203–208.

15. Карпюк Л.А., Лысиков А.В., Маслов А.А., Михеев Е.Н., Новиков В.В., Орлов В.К., Титов А.О. Перспективное металлическое уран-молибденовое топливо, устойчивое к авариям // Атомная энергия. 2021. Т. 130, №3. С. 148–152.

16. Карпюк Л.А., Новиков В.В., Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Леонтьева-Смирнова М.В., Голубничий А.А., Иванов С.И., Макаров Ф.В., Глебов А.В. Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям // Атомная энергия. 2021. Т. 130, №4. С. 211–215.

17. Крицкий В.Г., Калинин Б.А. Коррозия оболочек твэлов в жизненном цикле ТВС легководных реакторов: монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. 200 с.

18. Ирина Дорохова. Курс на толерантность // Атомный эксперт, октябрь 2020, №7 (84). С. 12–17.

19. Patrick A. Champlin. Techno-economic Evaluation of Cross-cutting Technologies for Cost Reduction in Nuclear Power Plants. Masters of Science in Nuclear Science and Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, June, 2018. 104 p.

20. Nikipelova N. Viewpoint: How ATF could shape the nuclear fuel market. World Nuclear news, 02 June 2021. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Viewpoint-How-ATF-could-shape-the-nuclear-fuel-mar> (Русский перевод: «Через 10–20 лет на рынке топлива для АЭС будет доминировать толерантное ядерное топливо». URL: <https://www.atomic-energy.ru/statements/2021/06/03/114492>).

21. Харитонов В.В., Косолапова Н.В., Ульянин Ю.А. Прогнозирование эффективности инвестиций в многоблочные электростанции // Вестник НИЯУ МИФИ. 2018. Т. 7, №6. С. 545–562.

22. Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants. 1999 Edition. Technical Reports Series No. 396, IAEA, Vienna, 2000. 224 p.

23. Харитонов В.В., Калинин Б.А., Силенко А.Н., Ульянин Ю.А. Инженерно-экономический анализ применения толерантного топлива в ядерной энергетике / Тезисы докладов XI конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 27–31 мая 2019 г. С. 84–90.

24. Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders. NEA. OECD, 2020. 134 p.

25. Харитонов В.В. Динамика развития ядерной энергетике. Экономико-аналитические модели. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 328 с.

REFERENCES

1. Information Library (June, 2021). World Nuclear Association. URL: <https://www.world-nuclear.org/>

2. Y. Guoan, Z. Weifang, H. Hui, Z. Hua. The Strategy of Closed Nuclear Fuel Cycle based on Fast Reactor and its Back-End R&D Activities. Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the past, enabling the future // Proceedings of an International Conference organized by the International Atomic Energy Agency in cooperation with the OECD Nuclear Energy Agency, the European Commission and the World Nuclear Association and held in Vienna, 24–28 June 2019. IAEA, Vienna, 2020. P. 63–72.

3. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. 2020 Edition. IAEA, Vienna, 2020. 137 p.

4. Ulyanin Yu.A., Kharitonov V.V., Stoyanov A.D. Scenarios for the development of world nuclear energy in conditions of limited fossil resources. Economic Strategies. 2021; (23) 3 (177):24–31. (In Russ.).

5. Orlov V.V., Avrorin E.N., Adamov E.O., etc. Unconventional concepts of nuclear power plants with natural safety (new nuclear technology for large-scale nuclear power of the next stage). Atomic Energy. 1992; (72) 4:317–328. (In Russ.).

6. The White Book of nuclear energy / Monograph under the general editorship of prof. E.O. Adamov. Moscow: NIKIET, 2001. 270 p. (In Russ.).

7. Introduction to the use of the INPRO methodology for the assessment of nuclear power systems. Report within the framework of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). (Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment). NP-T-1.12. Vienna, IAEA, 2011. 49 p.

8. Adamov E.O., Kaplienko A.V., Orlov V.V., Smirnov V.S., Lopatkin A.V., Lemekhov V.V., Moiseev A.V. Fast reactor with lead coolant BREST: from concept to technology implementation. Atomic Energy/ 2020; (129) 4:185–194. (In Russ.).

9. Adamov E.O., Tolstoukhov D.A., Panov S.A., Veselov F.V., Khorshev A.A., Solyanik A.I. The role of nuclear power plants in the Russian electric power industry taking into account carbon emission restrictions. *Atomic Energy*. 2021; (130) 3:123–131. (In Russ.).
10. Increased Accident Tolerance of Fuels for Light Water Reactors. Workshop Proceedings OECD/NEA Headquarters Issy-les-Moulineaux, France, 10–12 December 2012. NEA-OECD, 2013. 534 p.
11. Development of LWR Fuels with Enhanced Accident Tolerance. Task 4 — Preliminary Business Plan. Westinghouse Electric Company LLC, General Atomics, Southern Nuclear Company. RT-TR-13-20, October 2, 2013. 33 p.
12. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. NEA-OECD, 2018. 372 p.
13. Karpyuk L.A., Kuznetsov V.I., Maslov A.A., Novikov V.V., Orlov V.K., Rykunov D.V., Titov A.O. Accident-resistant fuel with a chrome coating of the fuel element shell. *Atomic Energy*. 2021; (130) 3:142–148. (In Russ.).
14. Karpyuk L.A., Savchenko A.M., Leontieva-Smirnova M.V., Kulakov G.V., Kononov Yu.V. Prospects for the use of steel shells for fuel rods of VVER-type reactors within the framework of the concept of fuel resistant to emergency situations. *Atomic Energy*. 2020; (128) 4:203–208. (In Russ.).
15. Karpyuk L.A., Lysikov A.V., Maslov A.A., Mikheev E.N., Novikov V.V., Orlov V.K., Titov A.O. Promising metallic uranium-molybdenum fuel resistant to accidents. *Atomic energy*. 2021; (130) 3:148–152. (In Russ.).
16. Karpyuk L.A., Novikov V.V., Kulakov G.V., Kononov, Y. V., Leont'eva-Smirnova M.V. golubnichy A. A., Ivanov S.I., Makarov F.V., Glebov A.V. 42XHM Alloy and silicon carbide as the material of the cladding resistant to accidents. *Atomic Energy*. 2021; (130) 4:211–215. (In Russ.).
17. Kritsky V.G., Kalin B.A. Corrosion of cladding of fuel assemblies in the life cycle of light-water reactors: monograph. M.: NRNU MEPhI, 2020. 200 p. (In Russ.).
18. Irina Dorokhova. The course on tolerance / / *Atomic Expert*, October 2020; 7(84):12–17. (In Russ.).
19. Patrick A. Champlin. Techno-economic Evaluation of Cross-cutting Technologies for Cost Reduction in Nuclear Power Plants. Masters of Science in Nuclear Science and Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, June, 2018. 104 p.
20. Nikipelova N. Viewpoint: How ATF could shape the nuclear fuel market. *World Nuclear news*, 02 June 2021. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Viewpoint-How-ATF-could-shape-the-nuclear-fuel-mar>
21. Kharitonov V.V., Kosolapova N.V., Ulyanin Yu.A. Forecasting the efficiency of investments in multi-unit power plants. *Bulletin of the MEPhI Research Institute*. 2018; (7) 6:545–562. (In Russ.).
22. Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants. 1999 Edition. Technical Reports Series No. 396, IAEA, Vienna, 2000. 224 p.
23. Kharitonov V.V., Kalin B.A., Silenko A.N., Ulyanin Yu.A. Engineering and economic analysis of the use of tolerant fuel in nuclear power. Abstracts of the XI Conference on Reactor Materials Science. Dimitrovgrad, May 27–31, 2019. P. 84–90. (In Russ.).
24. Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders. NEA. OECD, 2020. 134 p.
25. Kharitonov V.V. Dynamics of the development of nuclear energy. Economic and analytical models. Moscow: NRU MEPhI, 2014. 328 p. (In Russ.).

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию: 29.08.2021;
одобрена после рецензирования 27.09.2021;
принята к публикации 29.09.2021.

The article was submitted 29.08.2021;
approved after reviewing 27.09.2021;
accepted for publication 29.09.2021.