

## МОЖЕТ ЛИ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА СТАТЬ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ НА СВОБОДНОМ РЫНКЕ ЭНЕРГИИ

**А.В. Клименко**

*НИЯУ МИФИ, г. Москва*



На основании расчетов, полученных с помощью программного комплекса TOBAS, показано, что ЯЭУ в ближайшие десятилетия могут быть вытеснены с рынка энергии традиционными ЭУ на угле и природном газе. Чтобы новые ЯЭУ имели запас «экономической прочности» их следует проектировать по экономическому критерию со ставками дисконтирования не ниже 15%/год. При этом должна быть гарантирована вероятность тяжелой аварии не более  $10^{-6}$  1/реакторолет, а разработчики ЯЭУ и технологических процессов ЯТЦ должны владеть современными методами и инструментами оптимизации.

**Ключевые слова:** ядерная энергетическая установка, ядерный топливный цикл, эффективная процентная ставка, рынок энергии, математическая оптимизация, конкурентоспособность, оптимальный план.

**Key words:** nuclear power installation, nuclear fuel cycle, the effective interest rate, the energy market, mathematical optimization, competitiveness, the optimum plan.

### ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособна ли ядерная энергетика (ЯЭ), состоящая из сегодняшних и перспективных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), на свободном рынке энергии в сравнении с энергетическими установками (ЭУ) на угле и природном газе?

Заметим, что свободного рынка нет нигде, он не существует. Под свободным рынком энергии мы понимаем такой, который кроме всех атрибутов рынка имеет еще одну степень свободы – жесткую конкуренцию энерготехнологий с применением ядерной энергии, угля, природного газа.

В каждый момент времени интервала оптимального планирования длительностью  $T = 150$  лет численно сравним между собой множество параметров всех энерготехнологий согласно модели оптимизации энергосистемы [2–4].

Если энерготехнология вводится в эксплуатацию в какой-то момент  $t_1$  времени интервала оптимального планирования, а затем с течением времени (быть может, даже не выработав свой срок службы) в момент  $t_2$  вытесняется с рынка энергопроизводства другой энерготехнологией, то это означает, что множество параметров первой энерготехнологии численно оптимально только на интервале  $(t_1, t_2)$ . Если же первая энерготехнология далее до конца интервала оптимального планирования больше не возобновляет свою работу, то это означает, что ее множество оптимизируемых параметров численно неоптимально на интервале  $(t_2, T)$ . Следовательно, можно говорить о неоптимальности этой технологии. Если бы множество оптимизируемых параметров первой энерготехнологии было оптимально (т.е. оптимально с момента ввода энерготехнологии в эксплуатацию до конца интервала оптимального планирования), то никакая другая энерготехнология не смогла бы вытеснить первую с рынка.

© А.В. Клименко, 2013

Если в результате жесткой конкуренции предприятие (ЭУ) вынуждено закрыться, то кроме корректного (включающего в себя все затраты вплоть до превращения в «зеленую лужайку») вывода его из эксплуатации предусмотрена выплата каждому работнику единовременного страхового пособия в размере 100 000 \$. В эту сумму не входят доходы от продажи жилья работником по месту закрываемого предприятия; выплата предназначена для возможного переезда на другое место жительства и обучения новой специальности.

Эта ситуация была пояснена в [1] на основании цен и стоимостей, сложившихся к 2002 г. Чрезмерное увлечение мировым рынком «деривотивами» (вторичными ценными бумагами) породило скачок цен, вызванный разрывом между материальным балансом товаров, услуг, работ и их ценовой интерпретацией, так что к 2007 г. в мире возник другой, более высокий уровень цен на товары, услуги, работы, т.е. ценностный баланс, обязательный в любой сбалансированной экономике, оказался нарушенным.

Проиллюстрируем сказанное выдержками из расчетов энергетических систем, выполненных автором с помощью оптимизационного комплекса TOBAS [2–4]. (Комплекс создавался автором и его учителем Я.В. Шевелевым с 1977 г. и в настоящее время представляет собой серьезный инструмент принятия решений в задачах оптимизации большой размерности.)

Проведем анализ оптимальных планов для энергетики России при условиях и данных, которые были заложены в расчеты.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Исходные данные для расчетов составляют часть базы данных компьютерного оптимизационного комплекса (кода) TOBAS.

В качестве исходных возьмем данные для энергетики России и стран, прежде входивших в Совет экономической взаимопомощи (СЭВ) [1, 2, 5–16].

#### Спрос на энергию

На рисунке 1 показаны графики для нижнего (НУ) и верхнего (ВУ) уровней спроса на всем интервале оптимального планирования (оптимизационные расчеты).

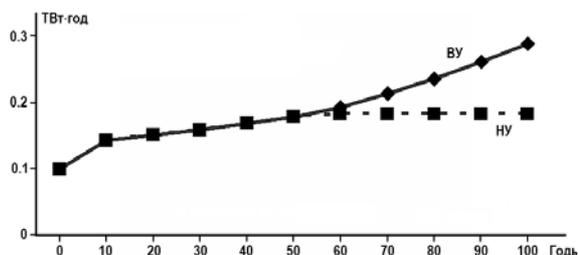


Рис.1. Свободный рынок энергопроизводства. Спрос на энерговыработку для России: ВУ – суммарный верхний уровень; НУ – суммарный нижний уровень

#### Виды энергоустановок

В ЯЭ России разрешен ввод в эксплуатацию на всем интервале оптимального планирования ЯЭУ с реакторными установками восьми типов (рис. 2 – 7):

- 1) **В-0** – ВВЭР-0-1000 (U) – урановый водо-водяной энергетический (тепловой) реактор для работы в открытом ЯТЦ;
- 2) **В-3** – ВВЭР-3-1000 (U) – уран-плутониевый водо-водяной энергетический (тепловой) реактор для работы в замкнутом ЯТЦ;
- 3) **В-Пу** – ВВЭР-3-1000 (Pu); уран-плутониевый водо-водяной энергетический (тепловой) реактор для работы в замкнутом ЯТЦ (все делящиеся материалы заменены на плутоний);
- 4) **СВБР** – СВБР-100(U-Pu-MA)-3 – свинцово-висмутовый энергетический (быстрый) реактор с топливом из урана, плутония, минорных актиноидов (МА) для работы в замкнутом ЯТЦ;

- 5) **БН** – БН-1200-3 – натриевый уран-плутониевый энергетический (быстрый) реактор для работы в замкнутом ЯТЦ;
- 6) **БРЕСТ** – БРЕСТ-1200-3 – свинцовый уран-плутониевый энергетический (быстрый) реактор для работы в замкнутом ЯТЦ;
- 7) **ВК** – ВККБР-1035-3 – водяной кипящий корпусной быстрый энергетический реактор для работы в замкнутом ЯТЦ;
- 8) **ЖСР** – ЖСР-1650-3 – жидкосолевой энергетический (быстрый) реактор для работы в замкнутом ЯТЦ. Вырабатывает электроэнергию и сжигает минорные актиноиды (МА).

Суммарная мощность таких ЯЭУ и режимы их работы оптимизировались в каждый момент времени так, чтобы к концу интервала планирования (150 лет) склад МА всей энергосистемы России был пуст (т.е. запас склада МА был равен нулю). Для ЯЭУ с РУ типов 3) – 8) разрешен ввод в эксплуатацию с 30-го года интервала оптимального планирования.

Традиционная энергетика (тепловые электростанции – ТЭС) представлена двумя ЭУ (каждая со своей энерготехнологией) для угольной энергетике и двумя ЭУ для энергетике на природном газе.

Энергетика на угольном топливе включала в себя ЭУ типа **У1** с удельным расходом топлива 335 г у.т./кВт·ч и ЭУ типа **У2** с удельным расходом топлива 300 г у.т./кВт·ч.

Энергетика на природном газе включала в себя ЭУ типа **Г1** с удельным расходом топлива 260 г у.т./кВт·ч и ЭУ типа **Г2** с удельным расходом топлива 230 г у.т./кВт·ч.

Вредные выбросы в окружающую среду от различных топливных циклов и значения денежных штрафов учитывались согласно [2].

#### Некоторые стоимостные характеристики

Удельные капиталовложения  $K_{уд}$  на установленную электрическую мощность, \$/кВт(э), принимались без процентов согласно [5–7]:  $K_{уд}^{ЯЭУ} = 4000.0$ ;  $K_{уд}^{Уголь} = 2300.0$ ;  $K_{уд}^{Газ} = 850.0$ .

Использовались значения отношений  $K_{уд}^{ЯЭУ}/K_{уд}^{Газ} = 4.71$  и  $K_{уд}^{ЯЭУ}/K_{уд}^{Уголь} = 1.74$ .

Сегодня капиталовложения в ЯЭУ с быстрым реактором в 1.2 – 1.5 раза выше, чем капиталовложения в ЯЭУ с тепловым реактором. Чтобы узнать, имеют ли перспективу ЯЭУ с быстрыми реакторами, если их оптимизировать, в расчетах принимались одинаковыми удельные капиталовложения для ЯЭУ с быстрыми и тепловыми реакторами.

Цена угля принималась для начала интервала оптимального планирования равной 104 \$/т<sub>нэ</sub> (т<sub>нэ</sub> – тонна нефтяного эквивалента). Цена газа (любого происхождения) на начало интервала оптимального планирования принималась равной 240 \$/(1000 м<sup>3</sup>) [5–7].

Эскалация цен принималась на топливо всех видов 0.5 %/год, на другие составляющие затрат – 1.0 %/год.

Оплата (без процентов) ущерба от тяжелой аварии типа Чернобыльской принималась равной 100 млрд. \$. По разным оценкам авария на ЧАЭС нанесла ущерб от 100 до 800 млрд. \$. На устранение аварии на АЭС «Фукусима» правительство Японии уже выделило 80 млрд. \$, и эта сумма будет еще корректироваться.

Срок службы любой установки принимался равным 60-ти годам.

За начало (нуль) интервала оптимального планирования принят 2000 г.

Критерий принятия решения (критерий оптимизации плана) – минимум интегральных приведенных (дисконтированных) затрат на всю программу развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России на всем интервале планирования.

#### УРОВЕНЬ СТАВКИ ПРОЦЕНТА

Важным инструментом, с помощью которого балансируется и регулируется макроэкономика государства, является уровень ставки процента.

Уровень рыночных процентных ставок восходит к формуле Фишера (XIX в.) [17, 18]. Современное ее представление имеет вид

$$k = r + x + p + m, \quad (1)$$

где  $k$  – наблюдаемый уровень рыночной процентной ставки;  $r$  – реальная ставка процента;  $x$  – ожидаемый уровень инфляции;  $p$  – премия (плата) за риск непогашения обязательства;  $m$  – премия (плата) за риск срока погашения обязательства.

В развитой экономике, например, США, в течение длительного времени эти величины поддерживались на уровне значений  $r = 4\%$ /год;  $x = 5\%$ /год;  $p = 3\%$ /год;  $m = 3\%$ /год, так что

$$k = r + x + p + m = 15\%/год.$$

#### **Частная собственность на средства производства**

Даже в США при низкой учетной ставке процента в последние годы (назначаемой Федеральной резервной системой – ФРС, т.е. негосударственным частным аналогом Центрального Банка США), равной величине свободного от риска процента

$$(r + x) = 0.25\%/год,$$

коммерческие банки выдают кредиты (с учетом  $p > 3\%$ /год и  $m > 3\%$ /год) под ставку

$$k = r + x + p + m > 8...12\%/год.$$

При таких процентных ставках ЯЭ либо нерентабельна, либо находится на грани потери рентабельности.

В США в 1979–1980 гг. эффективная процентная ставка измерялась двузначным числом, а темп инфляции доходил до 13%/год. Кредиты выдавались под более чем 17%/год. В этих условиях было прекращено строительство АЭС. Автору представляется надуманным объявленный в это время в США официальный повод прекращения развития ЯЭ и, в частности, строительства ЯЭУ с быстрыми реакторами, выразившийся в заботе о нераспространении нарабатывающегося в реакторах плутония. Причина не в плутонии, она проще – высокие процентные ставки сделали невыгодными применение ядерных энерготехнологий.

#### **Общественная собственность на средства производства (рыночный социализм)**

Если бы вся крупная собственность на средства производства России по закону принадлежала всему народу России и была сосредоточена у единого собственника средств производства – государства, например, в виде акционерной собственности ОАО «РОССИЯ», то в формуле (1)

$$k = r + x + p + m,$$

и государство всем своим капиталом гарантировало бы всем субъектам хозяйственной деятельности (большинство из них – дочерние компании ОАО «РОССИЯ») величины  $p = 0\%$ /год и  $m = 0\%$ /год.

Тогда коммерческие банки будут выдавать кредиты под  $k = r + x < 10\%$ /год.

Собственные расходы коммерческих банков и других финансовых учреждений будут покрываться не маржой, а, как и у большинства предприятий, относиться на себестоимость продукции (услуг). А в своей деятельности они (банки), как и другие предприятия, должны пользоваться кредитами. Возможны и некоммерческие банки и финансовые учреждения.

Это гарантирует рентабельность ЯЭ и других капиталоемких мероприятий.

Автор считает, что заменой капиталистического способа производства (основанного на частной собственности на средства производства) на социалистический (основанного на общественной собственности на средства производства) можно в одночасье сделать рентабельной капиталоемкую дорогую инфраструктуру экономики, каковой является ЯЭ, ее ЯТЦ, весь ТЭК страны.

Частная собственность на средства производства удорожает производство энергии на свободном рынке и, следовательно, жизнь людей. Движение России по пути приватизации и разгосударствления, перевода общественной (государственной) собственности в частную собственность на средства производства увеличивает процентные ставки на все жизненно важные ресурсы. Это автоматически сворачивает (выбрасывает)

инфраструктурные проекты, т.е. проекты для всех членов общества, включая ЯЭ.

Иногда встречается мнение, что частная собственность средств производства эффективнее и управляется эффективнее, чем общественная собственность средств производства. Это неверно. Можно построить хозяйственный механизм (рыночный социализм) [19, 20], где субъектом хозяйственного интереса будет менеджер-слуга народа, добывающей себе и обществу максимальную прибыль, не нарушая действующие законы общества и Природы. Не следует забывать, что производственные отношения – это прежде всего отношения собственности.

### ОПТИМАЛЬНЫЕ ПЛАНЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ ДЛЯ ЭКОНОМИК С РАЗНОЙ ЦЕНОЙ ВРЕМЕНИ

Цена времени в экономике страны (или ассоциации стран) определяется функцией ценности времени, которую чаще называют функцией дисконтирования. Традиционно эта функция представляется в виде экспоненты, в показателе которой присутствует «темп изменения» этой экспоненты, называемый нормой дисконтирования. Численно эту норму дисконтирования можно приравнять к эффективной процентной ставке [2–4]. Будем ситуационно различать экономики России по значению эффективной процентной ставки.

Оптимальный или локально-оптимальный план в комплексе TOBAS характеризуют более чем 10000 переменных, анализ значений каждой из которых – предмет отдельного отчета.

Далее на всех рисунках оптимальные планы представлены графиком только одной характеристики – текущей мощности (загрузки) во времени как отдельных энерготехнологий, так и суммарной по всем энерготехнологиям. Выделенные площади на рисунках представляют собой энерговыработку для указанной энерготехнологии. В обозначениях ЯЭ представлена энерготехнологиями СВБР, В-0, В-3, В-Рц, БН, БРЕСТ, ВК, ЖСР; энергетика на угле – У1, У2; энергетика на природном газе – Г1, Г2.

Функционал – суммарные приведенные затраты на всю программу развития ТЭК России – измеряется в Т\$, т.е. в  $10^{12}$  \$.

#### Экономика России с эффективной процентной ставкой 5%/год

Вначале рассмотрим энергетику России без ЯЭ. На рисунке 2 показаны графики текущей мощности (загрузки) во времени в локально-оптимальных планах развития энергетики России, полученные при ранее приведенных исходных данных, для НУ- и ВУ-спроса на энерговыработку России согласно рис. 1.

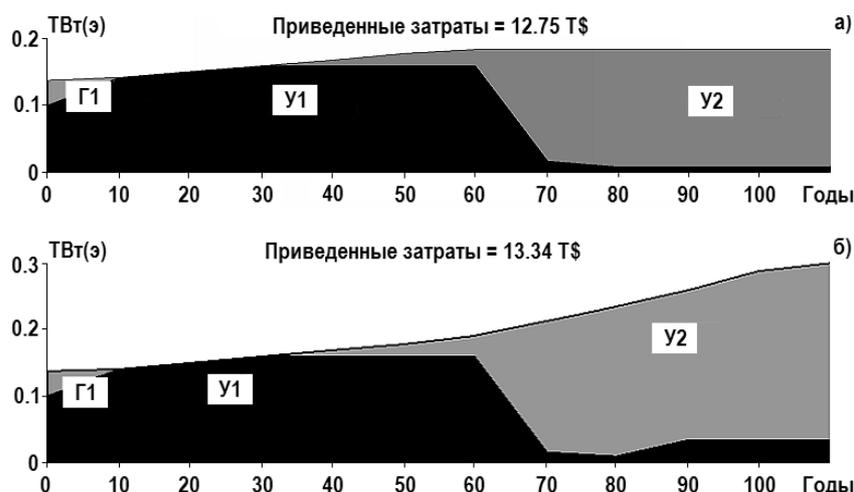


Рис. 2. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане при эффективной процентной ставке 5% в год: а) – для нижнего уровня; б) – для верхнего уровня спроса на энерговыработку России

Для принятых исходных данных только в начале интервала оптимального планирования работают ЭУ на природном газе. Угольные ЭУ работают на всем интервале оптимального планирования, обеспечивая всю энерговыработку России. Функционал (приведенные затраты) составляет величину примерно от 12.7 до 13.4 Т\$.

Рассмотрим энергетику России, в которой наряду с традиционной энергетикой используется ЯЭ. На рисунке 3 показаны графики текущей мощности (загрузки) во времени в локально-оптимальных планах развития энергетики России, полученные при ранее приведенных исходных данных, для ну- и ву-спроса на энерговыработку России.

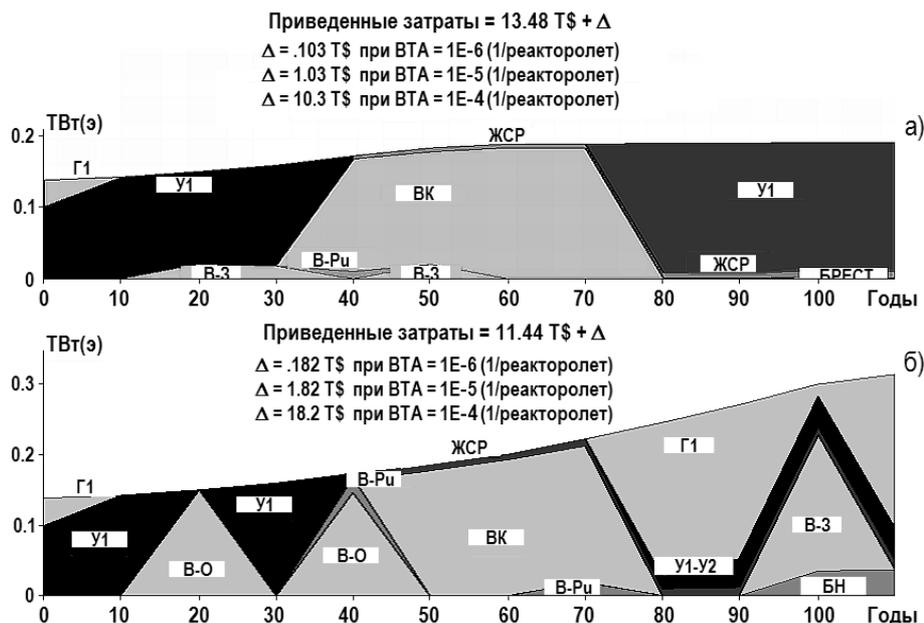


Рис. 3. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане: а) – для ну-спроса; б) – для ву-спроса на энерговыработку России при эффективной процентной ставке 5 % в год

На рисунке 3а наряду с ЭУ на природном газе и ЭУ на угле в энерговыработке участвуют ЯЭУ с реакторными установками В-3 и В-Пу. Эти ЯЭУ работают примерно с 10-го до 60-го года интервала оптимального планирования (т.е. до 2060 г.). С 31-го по 80-й год работают ЯЭУ с реакторами ВК, причем с 31-го года по 50-й ЯЭУ типа В-3, В-Пу и ВК одновременно входят в локально-оптимальный план. К ним присоединяется с 41-го года ЯЭУ типа ЖСР. Это означает, что удельная (на выработанный киловатт-час) прибыль в виде дифференциальной ренты (разность между оптимальной ценой вырабатываемой энергии энергосистемой и себестоимостью производства энергии) у них разная, но у всех она неотрицательна, а у ЯЭУ типа ВК по величине она наибольшая. С 51-го года ЯЭУ типа В-Пу, а с 61-го года и ЯЭУ типа В-3 останавливаются и выводятся из эксплуатации. На их месте в соответствии с проектом вывода из эксплуатации производятся затраты по доведению площадок размещения блоков до состояния «зеленой лужайки». Увольняемому персоналу (который не участвует в выводе блоков из эксплуатации или после работ по выводу блоков из эксплуатации, или по другой причине, – все причины по времени признаются после остановки блока с целью его закрытия) кроме положенных выплат выплачивается еще страховая сумма в размере 100000 \$ каждому на возможный переезд в другую местность и переобучение другой специальности.

ЯЭУ типа ЖСР включаются в работу в 40-м году и работают до конца интервала оптимального планирования. Их суммарная мощность и режимы работы варьируются во времени, чтобы выжигать МА оптимальным образом, так, чтобы к концу интервала оптимального планирования склад МА, наработанных и нарабатываемых всеми работавшими ЯЭУ, был пуст.

В соответствии с теорией оптимального планирования оптимальная цена энергии определяется оптимальным планом энергосистемы (ТЭК) в каждый момент времени интервала оптимального планирования. Если в какой-то момент времени в оптимальном плане работают разные типы ЯЭУ и ЭУ, то цена энергии, вырабатываемая ими, будет единой – это оптимальная цена энергии в энергосистеме. Она определяется замыкающей (самой большой по себестоимости) энергоустановкой, без которой невозможно выполнить план по энергоснабжению (т.е. удовлетворить спрос на энергию) в этот момент времени. При этом прибыль (дифференциальная рента) у всех энергоустановок будет разная и неотрицательная.

### Учет тяжелых аварий на ЯЭУ

Функционал плана с участием ЯЭ разбит на две части: одна часть включает в себя все затраты без оплаты ущерба от тяжелых аварий типа чернобыльской, другая ( $\Delta$ ) – оплату ущерба от тяжелой аварии типа чернобыльской в зависимости от вероятности такой аварии.

При вероятности тяжелой аварии (ВТА)  $10^{-6}$  1/реакторолет добавка  $\Delta$  мала и практически не влияет на значение функционала. При такой ВТА в экономике с процентной ставкой 5 %/год ЯЭ конкурентоспособна с традиционной энергетикой на угле и природном газе.

При ВТА  $10^{-5}$  1/реакторолет добавка  $\Delta$  существенна, и либо делает ЯЭ неконкурентоспособной с традиционной энергетикой на угле и природном газе, либо держит ее на грани конкурентоспособности.

При ВТА  $10^{-4}$  1/реакторолет добавка  $\Delta$  велика и делает ЯЭ неконкурентоспособной с традиционной энергетикой на угле и природном газе.

Какую же ВТА следует принимать в учет? Ответ на этот вопрос сегодня, скорее всего, носит субъективный характер. Если считать, что мощность мировой ЯЭ в будущем будет составлять от 1000 до 2000 ГВт(э), то при ВТА =  $10^{-6}$  1/реакторолет допускается одна авария типа чернобыльской в 1000 лет (или 500 лет). Это, пожалуй, приемлемо. Вот только период в 1000 лет (и даже 500 лет) человеческой истории субъектом не воспринимается стабильным. За последние 1000 лет на территории, которую сегодня занимает Россия, были свои исторические «Чернобыли» (монголо-татарское нашествие, тевтонские нашествия, нашествия Речи Посполитой, наполеоновское нашествие, Крымская война, Первая мировая война, Отечественная война). Что же касается последних 500 лет мировой истории, то они представляют собой сплошную череду войн. И субъект вправе сделать оценку впитанного им человеческого исторического опыта за период 1000 лет (и 500 лет) как нестабильной ненадежной жизни. Таким образом, ВТА =  $10^{-6}$  1/реакторолет может восприниматься субъектом как «невероятная вероятность».

При ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет и тех же мощностях мировой ЯЭ (от 1000 до 2000 ГВт(э)) тяжелая авария допускается раз в 100 лет (или 50 лет). Субъект психологически и экономически способен воспринять эту частоту аварий, ведь она происходит один раз за человеческий век, а мировая экономика способна с ней справиться.

При ВТА =  $10^{-4}$  1/реакторолет и тех же мощностях мировой ЯЭ (1000 – 2000 ГВт(э)) тяжелая авария допускается раз в 10 лет (или 5 лет). Такая частота тяжелых аварий недопустима, ибо жизнь людей уподобляется жизни у подножья непрерывно извергающегося вулкана. Такую жизнь психологически трудно вынести и субъекту, и обществу, а экономика ни одной страны, как и мировая экономика, не способна возмещать ущербы от тяжелых аварий с такой частотой.

История развития мировой ЯЭ, начиная с 1960 г., насчитывает примерно 15000 реакторолет. За это время произошли тяжелые аварии, приведшие к окончательному выводу из эксплуатации семи ядерных энергоблоков (один – на АЭС Три-Майл-Айленд, два – на Чернобыльской АЭС, четыре – на АЭС Фукусима). Это составляет при грубом равномерном распределении аварий значение ВТА, равное 7 аварий / 15000 реакторолет =  $4.7 \cdot 10^{-4}$  1/реакторолет, т.е. величину больше или порядка  $10^{-4}$  1/реакторолет. Как уже

отмечалось выше, при таком значении ВТА ядерная энергетика неконкурентоспособна.

Такая страна как Россия экономически способна допустить одну тяжелую аварию в 100 лет (в течение человеческого века) на своей территории. Но при установленных мощностях ЯЭ России к 100-му году от 100 до 200 ГВт(э) это соответствует ВТА от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  1/реакторолет. При такой вероятности добавка  $\Delta$  велика и делает экономически невыгодной развитие и использование ЯЭ.

Если представить, что и другие страны, граничащие с Россией, например, Китай, Украина, Финляндия, Иран, могут допустить одну тяжелую аварию в 100 лет на своей территории, то существует вероятность того, что эти аварии могут произойти одновременно (либо на небольшом отрезке времени) во всех этих странах. И это делает такое допущение ВТА нежелательным и недопустимым.

Ближайшее допущение для всего мира – это одна тяжелая авария в течение 100 лет соответствует ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет для развития мировой ЯЭ с мощностями в 1000 ГВт(э) и ВТА =  $10^{-6}$  1/реакторолет – с мощностями в 10000 ГВт(э).

Следовательно, современные ЯЭУ, которые допускают одну тяжелую аварию в 5 – 10 лет, не соответствуют концепции ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет или ВТА =  $10^{-6}$  1/реакторолет для всего мира. Нужны другие ЯЭУ. Таким образом, по экономическим причинам обеспечения конкурентоспособности ЯЭ следует строить малые партии однотипных блоков по всему миру исключительно с целью опытной отработки безопасных ядерных энерготехнологий и из-за большой длительности решения этой проблемы.

Приведенные рассуждения во избежание повторений легко переносятся и на последующие рисунки, хотя качественно структура энергосистемы на них может быть другой.

В локально-оптимальном плане на рис. 3 проявляются различные ЯЭУ, но их характеристики неоптимальны. Ближе всего к оптимальным значениям находятся характеристики ЯЭУ с ВВЭР разных типов, ЯЭУ типа ВК и ЯЭУ типа ЖСР.

Функционал (приведенные затраты) планов на рис. 3а и 3б составляет величину соответственно 14.5 и 13.26 Т\$ для ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет.

Эти величины сопоставимы со значениями функционала рис. 2а и 2б, где развитие энергосистемы России происходит без ЯЭ и свидетельствует о конкурентоспособности ЯЭ в энергосистеме России при эффективной процентной ставке 5 % в год.

#### **Экономика России с эффективной процентной ставкой 10 %/год**

Оптимальные планы энергетике России без ЯЭ структурно повторяют рис. 2а и 2б, различия составляют доли разных энерготехнологий. Для энергосистемы России, работающей на природном газе и угле (без ЯЭ), функционал (приведенные затраты) составляет величину примерно 6.5 Т\$.

На рисунке 4 приведены ближайшие локально-оптимальные планы развития энергетике России с участием ЯЭ, полученные при ранее приведенных исходных данных, для НУ- и ВУ-спроса на энерговыработку России согласно рис. 1.

В локально-оптимальных планах рис. 4 проявляются ЯЭУ с ВВЭР разных типов, ЯЭУ типа ВК, ЯЭУ типа ЖСР, ЯЭУ типа БРЕСТ. У всех этих ЯЭУ характеристики неоптимальны. Ближе всего к оптимальным значениям находятся характеристики ЯЭУ с ВВЭР разных типов, ЯЭУ типа ВК и ЯЭУ типа ЖСР.

Функционал (приведенные затраты) планов на рис. 4а и 4б составляет величину примерно 10.0 Т\$ для ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет.

Эти величины на 35% больше значений функционала планов, в которых развитие энергосистемы России происходит без ЯЭ и свидетельствует о неконкурентоспособности ЯЭ в энергосистеме страны при эффективной процентной ставке 10 % в год.

#### **Экономика России с эффективной процентной ставкой 15 %/год и выше**

В экономике России с эффективными процентными ставками 15 %/год и выше в оптимальном плане развития ТЭК страны нет ЯЭ, присутствуют только ЭУ на угле и газе.

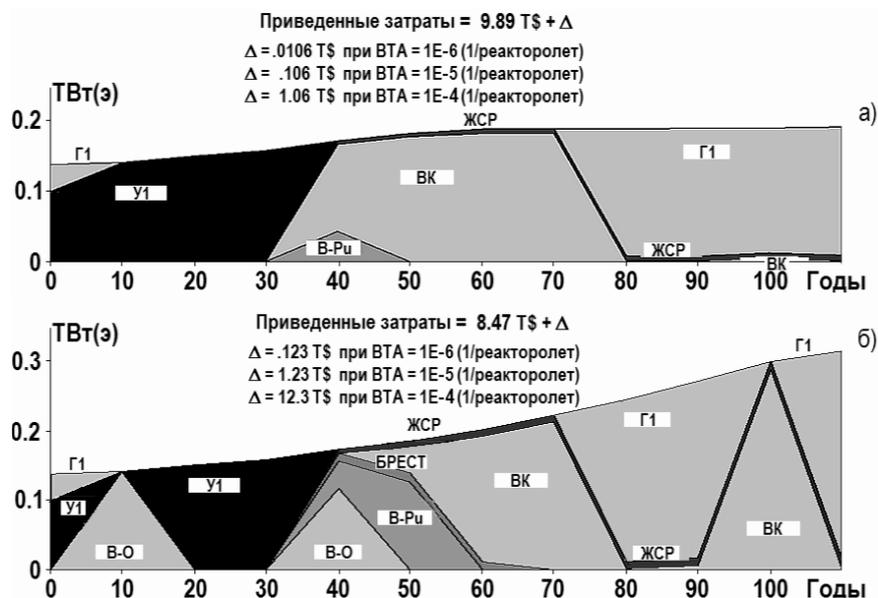


Рис. 4. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане: а) – для НУ-спроса; б) – для ВУ-спроса на энерговыработку России при эффективной процентной ставке 10 % в год

Значения функционалов в этих оптимальных планах равны 4.77 Т\$ – для эффективной процентной ставки 15 %/год и 3.70 Т\$ – для эффективных процентных ставок 20 и 25 %/год. В последнем случае примерно одинаковые значения функционалов объясняются сильным падением функции ценности времени после 50-го года интервала оптимального планирования, так что добавки составляющих функционала после этого года весьма малы и не сильно меняют значение общего функционала.

Поскольку ЯЭ не входит в оптимальный план для этих экономик России, то интерес представляют ближайшие к оптимальным локально-оптимальные планы с участием ЯЭ. В качестве примера такой локально-оптимальный план приведен на рис. 5.

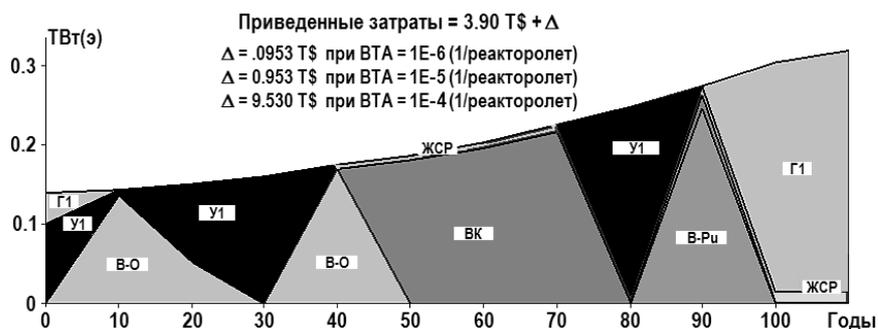


Рис. 5. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане для верхнего уровня спроса на энерговыработку России при эффективной процентной ставке 15 % в год

В этом плане значение функционала при  $ВТА = 10^{-5}$  1/реакторолет составляет величину 4.85 Т\$ против 4.77 Т\$ в оптимальном плане без ЯЭ. Эта разница в значениях функционала, примерно на 1.5 – 2.0 %, говорит о том, что при оптимизации характеристик ЯЭУ, последние могут войти в оптимальный план наряду с традиционными ЭУ на угле и газе.

Однако сегодняшние ЯЭУ с  $ВТА = 10^{-4}$  1/реакторолет порождают значение функционала больше 13 Т\$, что неприемлемо для развития энергетики России и мира.

Такая же ситуация наблюдается для экономик России с эффективными процентными ставками 20 и 25 %/год.

На рисунках 6 и 7 показаны оптимальные планы для энергетики России, когда в ее экономике господствует эффективная процентная ставка 25 %/год. Читатель может сравнить эти рисунки с рис. 2 для эффективной процентной ставки 5 %/год, чтобы увидеть, как значение эффективной процентной ставки меняет структуру энергетики и доли энерготехнологий в оптимальном энергобалансе страны. Увидеть, наконец, прописную истину – с ростом процентной ставки становится выгодным строить ЭУ с низкими капиталовложениями, т.е. ЭУ малой мощности. Другими словами, ЭУ на газе вытесняют ЭУ на угле.

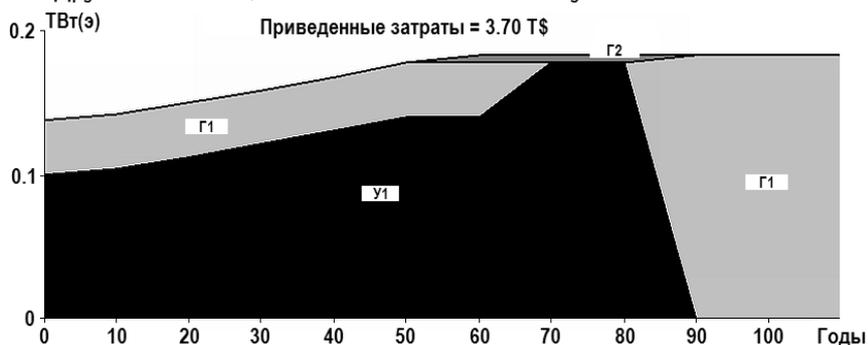


Рис. 6. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане для нижнего уровня спроса на энерговыработку России при эффективной процентной ставке 25 % в год

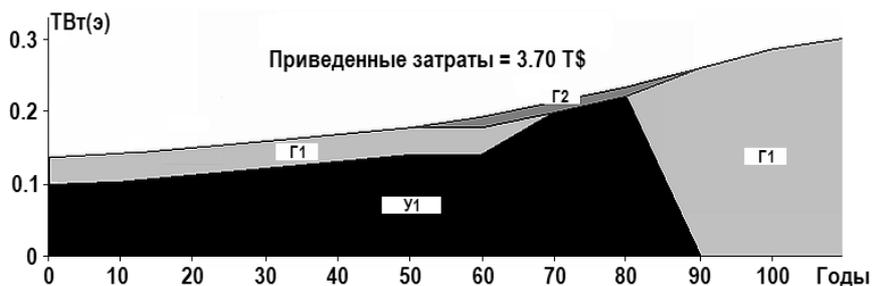


Рис. 7. Текущая мощность (загрузка) во времени в локально-оптимальном плане для верхнего уровня спроса на энерговыработку России при эффективной процентной ставке 25 % в год

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ближайшей перспективе в мире следует ожидать снижения цен на углеводороды в результате

- договоренности между Китаем (кредитором) и США (должником);
- поставок сланцевых сжиженных углеводородов из США в Европу, Японию, Австралию и другие регионы.

Снижение цен на углеводороды может привести к снижению наполнения бюджета России, прекращению финансирования ЯЭ из бюджета и вынужденному установлению свободного рынка производства энергии в России. Свободный рынок требует высокой рентабельности ЯЭ, которой в настоящее время нет.

2. В долгосрочной перспективе в мире следует ожидать

- удорожания ресурсов (рост населения, рост потребления, истощение и исчерпание дешевых ресурсов);
- роста процентных ставок.

3. Факт, что современные ЯЭ неконкурентоспособны при процентных ставках экономики выше 10 %/год, не говорит о том, что ЯЭ вообще неконкурентоспособна. Он говорит лишь о том, что современные проекты ЯЭ, на которых строится ЯЭ, неконкурентоспособны, а будущая ЯЭ, использующая эти проекты, бесперспективна.

4. Чтобы новые ЯЭ имели запас «экономической прочности», их следует проекти-

ровать по экономическому критерию не так, как это делалось раньше со ставками дисконтирования 5 и 10 %/год, а со ставками дисконтирования 15 %/год и более, лучше – со ставкой 25 %/год. В этом случае на конкурентном рынке ЯЭУ пробьют себе дорогу сами без какого-либо лоббирования.

5. Сегодня при высоких процентных ставках в РФ строительство ЯЭУ можно оправдать

- отсутствием резервов в энергосистеме страны;
- энергетической безопасностью страны;
- необходимостью диверсификации энерготехнологий;
- желанием сохранить сложные ядерные энерготехнологии для неопределенного будущего;
- необходимостью строительства референтных ядерных энергоблоков в России, чтобы соответствовать спросу на ядерные энерготехнологии за рубежом.

Хотя это более дорогой план энергопроизводства для страны, но надежность его повышается.

6. ВТА на действующих ЯЭУ де-факто составляет не менее  $10^{-4}$  1/реакторолет, что делает ЯЭ неконкурентоспособной. Конкурентоспособность проявляется при ВТА =  $10^{-5}$  1/реакторолет. Это значение ВТА следует считать максимальным, а вновь создаваемые ЯЭУ должны иметь меньшее значение ВТА.

По экономическим причинам обеспечения конкурентоспособности ЯЭ нужно строить малые партии однотипных блоков по всему миру исключительно с целью опытной отработки безопасных ядерных энерготехнологий и из-за больших сроков решения этой проблемы.

7. Поскольку системные оптимизационные расчеты энергетики России показали, что прорабатываемые варианты быстрых ЯЭУ (СВБР-100, БН-1200, БРЕСТ-1200) вошли не во все оптимальные планы, то появляется сомнение в оптимальности выбранных параметров этих ЯЭУ и их ЯТЦ, хотя сложные многопараметрические исследования ведутся на протяжении десятилетий. Складывается впечатление, что разработчики не имеют эффективных инструментов оптимизации параметров ЯЭУ и их ЯТЦ.

В этой связи с целью подготовки будущих разработчиков ЯЭУ и технологических процессов ЯТЦ, владеющих современными методами и инструментами оптимизации, представляется обоснованным ввести как обязательный для студентов всех ядерных специальностей последних двух лет обучения (специалитет, магистратура) курс «Математические методы и модели оптимизации ядерных энергетических систем и технологий ядерного топливного цикла» (объемом два семестра: методы и модели – первый семестр, компьютерное моделирование – второй семестр).

Освоение ядерной энергии идет трудно, но все же внушает оптимизм. Человечество не откажется от ядерной энергии по простой причине: в ядре сосредоточена самая большая удельная (на один грамм вещества) энергия. Задача состоит в том, чтобы взять ее доступным, безопасным, экологичным и экономичным способом.

### **Литература**

1. Клименко А.В. Ядерная энергетика, у которой есть будущее / Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики / Сборник докладов XXIII Межведомственного семинара «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (Нейтроника-2012)». В 2-х томах. – Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ. 2013. – Том 1. С.107-124.
2. Клименко А.В. Математическая модель оптимизации энергосистемы и ее применение: Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 292 с.
3. Клименко А.В. Система ограничений для ввода энергоблоков в эксплуатацию в модели оптимизации развития энергосистемы. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 1, С. 80–98.
4. Клименко А.В. Функционал для ввода энергоблоков в эксплуатацию в модели оптимизации развития энергосистемы и алгоритм оптимизации. // Вопросы атомной науки и тех-

- ники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып.1. С. 99–112.
5. The Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
6. Update on the Cost of Nuclear Power by Yangbo Du and John E. Parsons. 09-004, May 2009. Center for Energy and Environmental Policy Research. A Joint Center of the Department of Economics, MIT Energy Initiative, and Sloan School of Management.
7. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
8. Клименко А.В. К вопросу об оптимальной структуре развития ядерной энергетики России. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып.4. С.81–100.
9. Клименко А.В. Оценка конкурентоспособности энергетических технологий и замкнутого ядерного топливного цикла в энергосистеме России. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2010, вып. 4. С. 100–111.
10. Ядерная энергетика. Проблемы и перспективы. Экспертные оценки. – М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1989.
11. Обоснование стратегии трансмутации минорных актинидов (МА) в замкнутом ядерном топливном цикле / Отчет МЮКАТЭКС. Инв. № 02/НИР–10.12.2010. № госрегистрации 01201065196. 2010.
12. Белая книга ядерной энергетики / Под общ. ред. проф. Е.О. Адамова / 1-е изд. – М.: ГУП НИКИЭТ, 1998.
13. Пивоваров В.А. Одноконтурный кипящий реактор для замкнутого топливного цикла. Оптимальный вариант // РЭА, № 9, сентябрь 2009. С. 37–41.
14. Клименко А.В. Цена оружейного урана // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1998, спец. выпуск. – 86 с. // Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении», 1998. – 86 с.
15. Газета «Коммерсант-DAILY», 10 января 1995 г.
16. Плутоний в России. Экология, экономика, политика. Независимый анализ. / Центр экологической политики России, Центр ядерной экологии и энергетической политики, Социально-экологический Союз. – М.: 1994.
17. Fisher Irving, *Appreciation and Interest*, New York: Macmillan Publishing Co., Inc. 1896.
18. Fisher Irving, *The Theory of Interest*, New York: Augustus M. Kelley, Bookseller [1965], Original edition 1930.
19. Шевелев Я.В., Клименко А.В. Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. М.: РГГУ, 1996. – 736 с.
20. Шевелев Я.В. Нормативная экономическая теория социализма (Как социализму стать эффективнее капитализма). В 3-х частях. – М.: Экономика, 1991. – 432 с.

Поступила в редакцию 01.12.2013

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.51.17

*Constants base for calculations of fast reactors. The path to the modern state of the problems of the further development. \ Nikolaev M.N.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 12 pages, 1 illustration. – References, 14 titles.*

Briefly described the history of the development of a constant ensure neutron-physical calculations of fast reactors. Impairments in the current state are noted and tasks for further development are formulated.

### УДК 519.87:621.039.5

*There can be a nuclear power to competitive energy in the free market? \ Klimenko A.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 12 pages, 7 illustrations. – References, 20 titles.*

Modern nuclear power installations are noncompetitive at interest rates of economy above 10 %/year in the free market of energy. However, it does not mean, that the nuclear power in general is noncompetitive and, especially, unprofitable. That the nuclear power had the future, it is necessary to reconsider system of designing of nuclear power installations and a nuclear fuel cycle.

### УДК 621.181.29

*Research of possibility of using thermal energy accumulators on the nuclear power plant at regulation of frequency of current in the power network \ Bazhanov V.V., Loshchakov I.I., Shchuklinov A.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 4 titles.*

The results of research proving possibility of using a system of accumulation of thermal energy in the nuclear power plant with the VVER reactor for ensuring variable power of a turbogenerator with the participation of the nuclear power plant in regulation of frequency of current in a power network are given in this article. Research is conducted in relation to one of possible versions of the project of the power unit of the nuclear power plant with the VVER reactor of the rated power of 1200 MW and system of accumulation of thermal energy with insignificant deviations in the thermal scheme, power and a design of system of rather published data of the project.

### УДК 621.039.57-58

*Efficiency of low-power nuclear engineering for heat production \ Kursky A.S.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 14 titles.*

The paper presents the usefulness and importance of the development of small nuclear energy. The technical and economic performance of modern reactor are given. This reactor facility is designed for regional energy. The efficiency of vessel-type boiling water reactors in operation of nuclear cogeneration plants and nuclear power combined cycle plants is shown.

### УДК 621.039.564

*Study of the functioning of the gas phase electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte under conditions which emulate process of hydrogen regeneration of circulation loops of perspective reactors with heavy liquid metal coolants \ Ivanov I.I., Storozhenko A.N., Ulyanov V.V., Teplyakov Yu.A., Shelemet'ev V.M., Sadovnichy R.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scool. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 6 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 4 titles.*

The theoretical model which describes the dependence of voltage of the gas phase electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte on partial pressure of hydrogen in mixture «argon – hydrogen – water vapor» has been considered. This model has been proved in experiments with gas phase electrochemical oxygen sensor with a solid