

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В ЦИФРОВИЗАЦИЮ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.В. ХАРИТОНОВ, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: VVKharitonov@merphi.ru, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва, Россия.

ORCID: 0000-0003-0573-0582, WOS Research ID B-8601-2016

Д.Ю. СЕМЕНОВА, аспирант. E-mail: dysemenova@bk.ru, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Москва, Россия.

Е.В. АКИНФЕЕВА, кандидат экономических наук. E-mail: tyusha08@gmail.com
Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия; Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия.

ORCID: 0000-0003-0657-9052, Scopus Author ID: 36090940400,

Science index Author ID: 256280

В статье предлагается аналитическая методика прогнозирования эффективности инвестиций в цифровизацию проектирования, сооружения и эксплуатации АЭС на микроэкономическом уровне, затраты на которую влияют в конечном итоге на экономические показатели АЭС, определяющие конкурентоспособность ядерной энергетики на рынке энерго-технологий. В качестве критерия для оценки эффективности инвестиций в цифровизацию ядерной энергетики предложено считать снижение стоимости и сроков сооружения АЭС, в наибольшей степени влияющих на конкурентоспособность АЭС. Результаты расчетов приведенной стоимости электроэнергии АЭС, периода окупаемости инвестиций и нормы внутренней доходности в зависимости от наблюдаемых задержек и соответствующего роста стоимости сооружения АЭС демонстрируют резервы для их снижения за счет цифровизации бизнес-процессов жизненного цикла АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, оценка эффективности инвестиций, цифровизация бизнес-процессов, прогнозирование эффектов цифровизации, стоимость и сроки сооружения АЭС.

DOI: 10.47711/0868-6351-189-104-112.

Введение. Цифровизация как обобщенное представление новой парадигмы научно-технического прогресса все больше укореняется в качестве неотъемлемой части развития реального сектора экономики. Ожидается, что многообразие цифровых технологий станет источником экономического роста за счет изменения моделей труда, повышения производительности труда и технологического преобразования рабочих мест [1-4]. Так, в работе [4] на основе математического моделирования производительности труда в цифровой экономике показано, что симбиоз «человек + интеллектуальная машина» в развитых странах позволит достичь 3% роста производительности труда в год с середины 2020-х годов. В то же время авторы [4] не без оснований цитируют лауреата Нобелевской премии Р. Солоу: «Вы можете увидеть эру компьютеров повсюду вокруг себя, но только не в цифрах роста производительности».

Большое внимание цифровизации ядерной энергетики уделяется в Международном агентстве по ядерной энергии (МАГАТЭ) [5-7] и энергетических компаниях [8-10]. АЭС – это долгосрочный проект с огромными масштабами проектирования, строительства, эксплуатации (более 60 лет) требует большого количества материалов, рабочей силы и оборудования. В Госкорпорации «Росатом» разработана Единая цифровая стратегия как важнейший шаг к ускорению цифровизации отрасли на базе собственных разработок, содействию реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и созданию продуктов для использования гражданским сектором экономики [10]. Одним из приоритетных направлений цифровой стратегии отрасли является «внутренняя цифровизация», нацеленная на повышение

операционной эффективности компании и конкурентоспособности основного бизнеса – сооружения АЭС с исполнением контрактных обязательств, в том числе по стоимости и качеству в установленные сроки. Для ядерной отрасли, объединяющей сотни направлений деятельности, специальностей и компетенций, задача цифровой трансформации бизнес-процессов или «внутренней цифровизации» является одной из приоритетных [10-12]. Затраты на цифровизацию, согласно данным работы [13], авторы которой обследовали 1471 проект в области информационных технологий, могут составлять несколько сотен миллионов долларов. Однако к числу наименее исследованных проблем в области цифровизации реального сектора экономики, включая ядерную энергетику, относится оценка экономической эффективности инвестиций в цифровизацию бизнес-процессов [14; 15].

Цель настоящей работы – предложить аналитическую методику прогнозирования возможных экономических эффектов инвестиций в цифровизацию проектирования, сооружения и эксплуатации АЭС на микроэкономическом уровне. Основное внимание уделено оценкам границ инвестиционной привлекательности проектов АЭС, т.е. оценкам внутренней нормы доходности, приведенной стоимости электроэнергии АЭС и периода окупаемости при изменении стоимости и сроков сооружения АЭС в результате цифровизации бизнес-процессов.

Сроки и стоимость сооружения АЭС. С конца 1990-х годов в мире строятся энергетические реакторы поколений «III» и «III+», удовлетворяющие современным международным требованиям безопасности. В основном это корпусные водоохлаждаемые реакторы типа ВВЭР-1200 (отечественного дизайна) и аналогичные им реакторы зарубежного дизайна типа PWR (Pressurized Water Reactor), различные проекты которых, отличающиеся установленной мощностью и страной принадлежности, именуются AP, EPR, APR. Наблюдается заметный разброс в сроках и стоимости сооружения реакторов при существенном превышении проектных (плановых) величин (табл. 1).

Таблица 1

Плановые и фактические капитальные затраты и периоды сооружения энергоблоков АЭС с реакторной установкой типа PWR (ВВЭР) (поколение III/III+) в разных странах

Тип реактора	Страна размещения АЭС, энергоблоки	Год начала сооружения	Период сооружения энергоблока, лет		Электрическая мощность (нетто), МВт	Удельные капитальные затраты, долл./кВт		Приведенная стоимость электроэнергии (LCOE), план долл./МВт·ч
			план	факт		план	факт	
AP1000	Китай, Sanmen 1, 2	2009	5	9	2*1000	2044	3154	64
EPR	Китай, Taishan 1, 2	2009	4,5	9	2*1660	1960	3222	64
AP1000	США, Vogtle 3, 4	2013	4	8/9	2*1117	4300	>8600	127
APR1400	Ю. Корея, Shin Kori 3, 4	2012	5	8/10	2*1340	1828	2410	51
APR1400	ОАЭ, Barakah 1, 2, 3, 4	2012	5	8	4*1340	3700	-	51
EPR	Финляндия, Olkiluoto 3	2005	5	16	1*1630	2020	>5 723	109
EPR	Франция, Flamanville 3	2007	5	15	1*1600	1886	8620	115
VVER1200	Россия, Novovoronezh II 1, 2	2008	4	8/10	2*1114	2244	-	-
VVER1200	Россия, Leningrad-2	2008	5	8	2*1114	2673	3040	-
VVER1200	Турция, Akkuyu 1, 2, 3, 4	2018	5	-	4*1114	4166-5208	-	123 (до 2035 г.) 63 (после 2035 г.)
VVER1200	Белоруссия, Astravets NPP 1, 2	2011	6	9/-	2*1110	5133	-	50-60

Источники: [17; 18; 20-24].

Срыв выполнения обязательств по срокам и стоимости сооружения энергоблоков происходит по ряду причин: недостаточная квалификация персонала и низкая производительность труда, ошибки планирования, недооценка сложности и комплексности проекта, задержки закупок и поставок оборудования, нарушение графика строительно-монтажных работ, устранение несоответствий на поздних стадиях проекта и др. [16-19].

Кроме того, по данным [17] капитальные затраты на 80% состоят из затрат на инжиниринг, снабжение и строительство (Engineering, procurement and construction – EPC). За последнее десятилетие стоимость EPC увеличивалась не столько за счет прямых затрат (строительные работы и оборудование), сколько за счет косвенных затрат на инжиниринг и проектирование, управление проектом и авторский надзор, обеспечение качества и ввод в эксплуатацию, т.е. затрат на интеллектуальную и экспертную деятельность человека, включающую в том числе и цифровизацию проектирования и сооружения АЭС. В период 2007-2018 гг. доля косвенных затрат в структуре EPC возросла с 30 до 53% [18].

В США создан самый крупный в мире парк энергетических ядерных реакторов, состоящий из 94-х реакторов суммарной установленной мощностью около 97 ГВт. Однако после аварии в 1979 г. на АЭС «Три-Майл-Айленд» новые реакторы практически не строились до 2013 г. Капитальные затраты на новые АЭС в США возросли с 1970-х годов по настоящее время на 241% [19]. Реакторы нового поколения типа AP 1000 (проект фирмы Вестингауз), один из которых построен в Китае, а другой строится в США, отличаются по стоимости в 2,7 раза! Разброс удельных капитальных затрат на новые реакторы составляет от 2,6 до 8,6 долл./кВт (см. табл. 1). Как правило, увеличение сроков строительства ядерных энергоблоков сопровождается и ростом стоимости. Ряд причин увеличения сроков и стоимости сооружения АЭС, ведущих к снижению конкурентоспособности АЭС, может быть устранен при использовании жестких цифровых технологий управления проектированием и сооружением АЭС.

Определение критериев эффективности инвестиций. По нашему мнению, именно величина снижения стоимости и сроков сооружения АЭС может служить критерием эффективности инвестиций в цифровизацию бизнес-процессов, влияющих на проектирование и сооружение АЭС. Для оценки возможного влияния цифровизации бизнес-процессов на критерии конкурентоспособности АЭС воспользуемся аналитической методикой, представленной в работе [16]. Для целей настоящей работы достаточно ограничиться так называемым базовым вариантом, в котором денежные потоки постоянны во времени. Рассмотрим вначале прогнозируемые критерии конкурентоспособности АЭС.

Главным микроэкономическим критерием конкурентоспособности (прибыльности) инвестиционных проектов, к которым относятся и проекты АЭС, является критерий NPV – чистый дисконтированный доход (прибыль, Net Present Value). Величина NPV должна быть положительна. Из математического определения NPV вытекают три вспомогательных, но важных для дальнейшего анализа критерия конкурентоспособности: приведенная стоимость электроэнергии LCOE (Levelized Costs of Electricity), период окупаемости Θ (от старта эксплуатации реактора), внутренняя норма доходности IRR (Internal Rate of Return) [16].

Величина внутренней нормы доходности, определяющая тот наибольший уровень процентной ставки, при котором инвестор готов согласиться на финансирование проекта, рассчитывается по формулам:

$$\frac{(1 + IRR)^{T_c} - 1}{T_c(1 - (1 + IRR)^{-T_3})} = IRR_0; \quad IRR_0 = \frac{R - Y}{K}, \quad (1)$$

где T_c и T_3 – периоды строительства и эксплуатации реактора (лет); R – среднегодовая (за все время эксплуатации) выручка (руб./год); Y – среднегодовые эксплуатационные

расходы, в том числе операционные и топливные (руб./год); K — суммарные капитальные затраты (руб.); IRR_0 — наибольшее возможное значение IRR при заданных параметрах установки (1/год или %/год).

Поскольку годовая выручка энергоблока пропорциональна среднегодовому производству электроэнергии E (кВт·ч/год) и цене электроэнергии C (руб./кВт·ч), т.е. $R=EC$, то с ростом E и C величина IRR растет. Норма (ставка) дисконтирования денежных потоков выбирается из условия $r < R$.

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

$$LCOE = \frac{AK + Y}{E}; \quad A = r \left[\frac{(1+r)^{T_c} - 1}{rT_c(1 - (1+r)^{-T_3})} \right], \quad (2)$$

где A — эффективная норма амортизационных отчислений, $A > r$.

При отпускной цене электроэнергии, равной $LCOE$, проект окупается в конце жизненного цикла, т.е. через $T_3 = 60$ лет после начала эксплуатации. Для обеспечения конкурентоспособности и прибыльности АЭС величина $LCOE$ должна быть ниже рыночной цены C в регионе расположения АЭС.

Дисконтированный период окупаемости инвестиций Θ (после начала эксплуатации реактора) определяется выражением:

$$\Theta = \frac{-\ln\left(1 - \frac{r}{IRR_0} \varphi_c\right)}{\ln(1+r)}; \quad \varphi_c = \frac{(1+r)^{T_c} - 1}{rT_c}, \quad (3)$$

где φ_c — безразмерный коэффициент приведения, $\varphi_c \geq 1$ [16].

Например, при $T_c=6$ лет и $r=0,05$ год⁻¹ (5% в год) получаем $\varphi_c=1,13$. В интересах инвестора величина периода окупаемости должна быть минимальной (существенно меньше периода эксплуатации).

Требования к эффективности инвестиций в цифровизацию ядерной энергетики. Вышеприведенные формулы позволяют оценить изменение критериев эффективности инвестиций при изменении сроков сооружения энергоблока на $\pm \Delta T_c$ (лет) по сравнению с плановыми. Если предположить для упрощения расчетов, что при изменении периода сооружения энергоблока T_c капитальные затраты изменяются пропорционально величине T_c , то согласно результатам расчета по формулам (1) – (3), приведенным на рис. 1 и в табл. 2, сокращение сроков сооружения энергоблока с 10 до 4 лет (изменение ΔT_c от +4 до – 2 лет) способствует удвоению внутренней нормы доходности (рис. 1), что благоприятно сказывается на финансовой устойчивости проекта даже при низких рыночных ценах на электроэнергию (60 долл./кВт·ч). При этом практически вдвое снижается приведенная стоимость электроэнергии (табл. 2) и в 2,5 раза — удельные капитальные затраты.

В то же время период окупаемости, являясь более чувствительным параметром, сокращается в 4-5 раз. Причем чем выше ставка дисконтирования, тем сильнее зависимость периода окупаемости от длительности сооружения энергоблока. При $r \geq 5\%$ в год и $T_c=10$ лет проект не окупается. Иными словами, наблюдаемое увеличение сроков и стоимости сооружения АЭС не только подрывает инвестиционную привлекательность АЭС, но и служат основанием для формирования критериев эффективности инвестиций в цифровизацию бизнес-процессов проектирования и сооружения АЭС. Затраты на цифровизацию ядерной энергетики, включаемые в капитальные затраты энергоблоков, должны быть существенно ниже результирующего эффекта снижения сроков и стоимости сооружения АЭС за счет цифровизации.

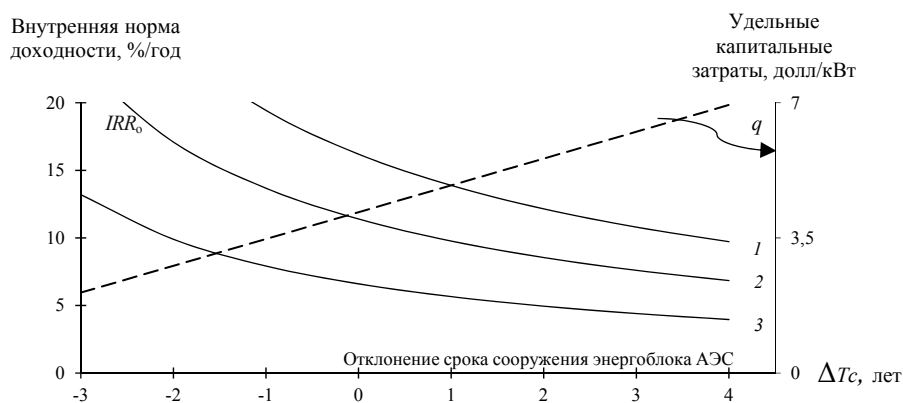


Рис. 1. Влияние отклонения от планового срока сооружения энергоблока АЭС (ΔT_c , лет) на удельные капитальные затраты (---) (q , долл./кВт, правая шкала) и на внутреннюю норму доходности (IRR_0 , % в год,) проекта АЭС при изменении рыночной цены электроэнергии (C , долл./кВт·ч): 1-120, 2-90, 3-60. Плановые параметры энергоблока: $K=5$ млрд. долл., $W=1200$ МВт, $E=8$ млрд. кВт·ч/год, $Y=150$ млн. долл./год, $T_c=6$ лет.

Расчет по формуле (1).

Таблица 2

Влияние отклонения от планового срока сооружения энергоблока АЭС (ΔT_c , лет) на период окупаемости инвестиций (Θ , лет) и приведенную стоимость электроэнергии АЭС (LCOE, долл./МВт·ч) в зависимости от ставки дисконтирования ($r=3$ и 5% в год)*

Отклонения от планового срока сооружения энергоблока АЭС ΔT_c , лет		-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Период окупаемости Θ , лет	$r=3\%$ /год	6	8	11	13	17	20	24	29
	$r=5\%$ /год	6	9	13	17	24	33	54	-
Приведенная стоимость электроэнергии АЭС, LCOE, долл./МВт·ч	$r=3\%$ /год	33	37	42	47	52	58	63	69
	$r=5\%$ /год	39	46	54	62	70	79	89	98

* Плановые параметры энергоблока: $K=5$ млрд. долл., $W=1200$ МВт, $E=8$ млрд. кВт·ч/год, $Y=150$ млн. долл./год, $T_c=6$ лет, $C=90$ долл./МВт·ч, $T_g=60$ лет.

Расчеты по формулам (2) и (3).

Заметим, что доступное финансирование (низкая стоимость заемного капитала и низкие ставки дисконтирования) остается ключевым фактором экономических показателей ядерной энергетики при высоких капитальных затратах. Важно подчеркнуть, что широко применяемый в литературе (зарубежной, в основном) критерий LCOE требует осторожного обращения, поскольку более чувствительными к инженерно-экономическим параметрам энергоблока и ставке дисконтирования являются критерии Θ , IRR_0 и IRR .

Направления и ожидаемые эффекты цифровизации бизнес-процессов для снижения стоимости и длительности сооружения новых АЭС. Выше отмечалось, что капитальные затраты на 80% состоят из затрат на инжиниринг, снабжение и строительство (EPC). За последнее десятилетие стоимость EPC увеличивалась, в основном, за счет косвенных затрат (софт-затрат), доля которых возросла с 30 до 53% [17]. Фонд оплаты труда в EPC превышает 60%. В целях повышения эффективности косвенных затрат особое внимание уделяется управлению проектами как консолидирующему звену всех бизнес-процессов: планирования (включая расчет стои-

мости), формирования и контроля графика работ, управления всеми видами ресурсов, взаимосвязи стадий проекта, взаимодействия со стейкхолдерами и др. Производительность и эффективность этих процессов сейчас во многом определяются использованием цифровых технологий. Ожидается, что роль цифровизации будет возрастать в условиях серийного производства ядерных энергоблоков за счет устранения ряда факторов, обуславливавших затягивание сроков и увеличение стоимости их сооружения для первых энергоблоков. Эти факторы в работе [20] разделены на 4 группы: 1) зрелость (степень завершенности) проекта АЭС и планирования цепочек поставок до старта сооружения, 2) эффективность управления проектом и использования извлеченных ранее уроков, 3) стабильность и предсказуемость регулирования ядерной безопасности, 4) эффекты многоблочного и серийного сооружения в совокупности с политической поддержкой ядерной энергетики.

Зрелость проекта определяется его качеством и полнотой, зависящими, в частности, от цифровизации процессов проектирования. Несмотря на то, что затраты на проектирование составляют около 10% капитальных затрат [24], эта стадия является определяющей для стоимости и всего жизненного цикла проекта. Недостатки результатов проектирования могут иметь серьезные последствия в процессе сооружения и эксплуатации энергоблока. При этом незавершенность проекта с точки зрения как технической, так и планирования ресурсов до начала стадии сооружения существенно влияет на стоимость капитальных затрат вследствие неконтролируемости изменений, совершения поздних закупок и поставок оборудования, движения не от целостности проекта, а от условий площадки сооружения и т.п. В работе [18] на основе анализа множества проектов показано, что при завершенности проекта на 30% до начала сооружения энергоблока стоимость производимой электроэнергии может в 4 раза превышать стоимость электроэнергии энергоблока, построенного на основе полностью проработанного проекта. В странах OECD к 2015 г. увеличение сметы расходов на новые блоки поколения-III составило более 2-х раз из-за изначально низкой зрелости проектов и неблагоприятного политического контекста [20]. Зрелость проекта включает также понятие технологической зрелости, определяющей комплексный подход к стандартизации, унификации и типизации проектных решений, оборудования и материалов, модульности конструкции и сооружения энергоблоков с возможностью моделирования бизнес-процессов и их стоимости в процессе проектирования.

Поскольку сооружение АЭС может занимать до 10 лет, то риски внесения изменений в проект со стороны внешних участников довольно высоки, особенно со стороны регулирующих органов в области ядерной безопасности. Цифровая формализация требований и гибкого взаимодействия регуляторов, лицензиатов, проектировщиков и других стейкхолдеров для обеспечения безопасности АЭС может способствовать сокращению сроков и стоимости сооружения АЭС. Важную роль в этом может сыграть международная гармонизация и стандартизация расчетных кодов и моделирования технологических и бизнес-процессов, увеличивая доказательную базу регулирующих мер и вовлеченность регуляторов и проектировщиков в повышение конкурентоспособности АЭС. К первоочередным направлениям применения цифровых решений для снижения сроков сооружения и капитальных затрат АЭС можно отнести: детализированный инжиниринг в цифровом виде; моделирование бизнес-процессов, проведение тренингов, анализов и проверок на ранних этапах проектирования; создание цифровых платформ для совместной работы всех участников проекта, включая органы надзора; повышение синхронизации информации о проектируемых и сооружаемых объектах и пр.

Возможные направления и ожидаемые эффекты управления стоимостью АЭС, в том числе и за счет цифровизации бизнес-процессов, обобщенные в работе [20] и представленные на рис. 2, указывают на возможность снижения удельных капитальных затрат с 5000 до 3000 долл./кВт до 2030 г. и с 3000 до 2000 долл./кВт после 2030 г. Столь существенное снижение капитальных затрат без ущерба безопасности АЭС представляются трудно выполнимыми, но возможными и необходимыми для обеспечения конкурентоспособности АЭС на фоне быстрого развития возобновляемой энергетики, в которую ежегодно инвестируется около 300 млрд. долл. [25].

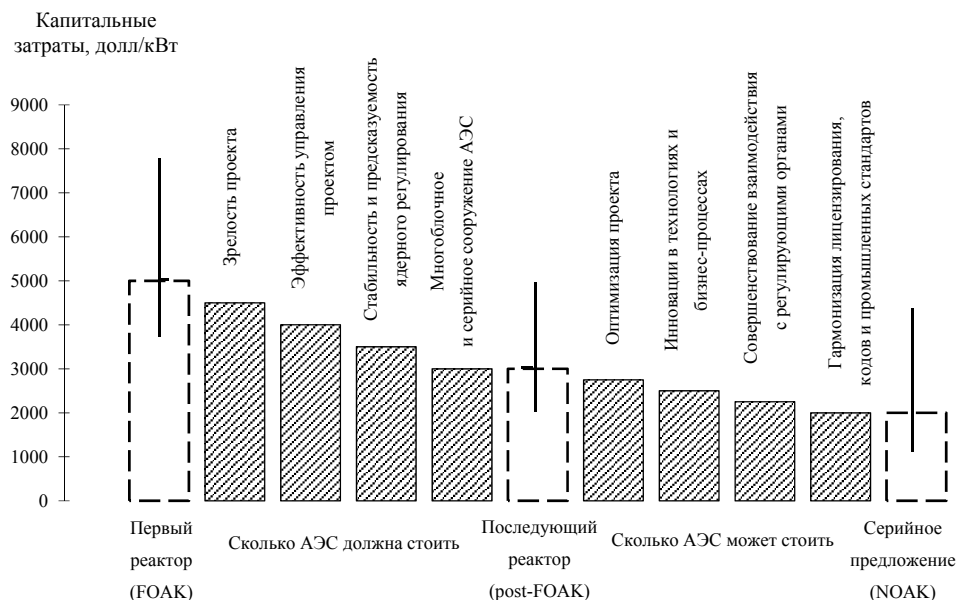


Рис. 2. Направления и ожидаемые эффекты применения цифровых технологий для снижения капитальных затрат проектов АЭС в процессе перехода к серийности сооружения энергоблоков

Заключение. В работе представлен подход к прогнозированию микроэкономических эффектов применения цифровизации в реальном секторе экономики применительно к ядерной энергетике. Предлагается оценивать эффект цифровой трансформации процессов проектирования, сооружения и эксплуатации АЭС в виде снижения стоимости и сроков сооружения ядерных энергоблоков. Показано, что сокращение сроков сооружения энергоблоков с 8 до 5 лет и удельных капитальных затрат с 5500 до 3500 долл./кВт позволяет сократить вдвое период окупаемости, на 40% приведенную стоимость электроэнергии и увеличить в 1,5 раза внутреннюю норму доходности. Дано описание направлений и потенциальных эффектов применения цифровых технологий на разных стадиях жизненного цикла АЭС, ведущих к снижению капитальных затрат, оказывающих существенное влияние на конкурентоспособность АЭС.

Литература / References

1. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. EKSMO Publishing Hous, 2016. 138 p.
2. *Global innovation index 2016. Winning with global innovation*. WIPO. Cornell University, INSEAD, 2016. 451 p.
3. Акаев А.А., Коротаев А.В. О начале фазы подъема шестой кондратьевской волны и проблемах глобального учетливого роста // Век глобализации. Январь 2019. Pp. 3-17. [A.A. Akaev and A.V. Korotaev. On the beginning of the rise phase of the sixth Kondratieff wave and the problems of global sustainable growth // Vek Globalizatsii. January 2019. Pp. 3-17.]

4. Акаев А.А., Садовничий В.А. Человеческий фактор как определяющий производительность труда в эпоху цифровой экономики // Проблемы прогнозирования. 2021. № 1. Pp. 45-58. DOI: 10.47711/0868-6351-184-45-58. [A.A. Akaev and V.A. Sadovnichiy. Human factor as determining labor productivity in the era of the digital economy // Problemy Prognozirovaniya. 2021. No. 1. Pp. 45-58. [https://doi.org/10.47711/0868-6351-184-45-58.](https://doi.org/10.47711/0868-6351-184-45-58)]
4. Series Technical Reports Implementing Digital Instrumentation and Control Systems in the Modernization of Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.4. IAEA. Vienna. 2009. 49 p.
5. Information Technology for Nuclear Power Plant Configuration Management. IAEA-TECDOC-1651. IAEA. Vienna. 2010. 117 p.
6. Application of Plant Information Models to Manage Design Knowledge through the Nuclear Power Plant Life Cycle. IAEA-TECDOC-1919. IAEA. Vienna. 2020. 100 p.
7. Белокрылов П.Ю., Большухин М.А., Комиссаров К.В., Петрунин В.В., Повереннов Е.Ю. Интеграция процесса расчетного обоснования оборудования реакторных установок в единое информационное пространство для создания цифровых двойников ЯЭУ // Атомная энергия. 2019. Т. 127. Вып. 6. С. 309-315. [P.Yu. Belokrylov, M.A. Bolshukhin, K.V. Komissarov, V.V. Petrunin, and E.Yu. Poverennov. Integration of the process of computational justification of reactor plant equipment into a single information space for the creation of digital twins of nuclear power plants // Atomnaya Energiya. 2019. Vol. 127. Iss. 6. Pp. 309-315.]
8. Woobang Lee, Boknam Lee, Hyounseung Jang, Seokin Choi. Implementation Information Technology in the Nuclear Power Plant (NPP) Construction // Conference Paper of 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction. September 2004. DOI: 10.22260/ISARC2004/0085. <https://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2004-S15-01.pdf>
9. Итоги деятельности государственной корпорации по атомной энергии «РОСАТОМ» за 2019 год. Годовой отчет. 149 с. [75 Years of the Nuclear Industry. Ahead of Its Time. Results of the activities of the State Atomic Energy Corporation ROSATOM for 2019 (ROSATOM). <http://www.rosatom.ru>]
10. Акинфеева Е.В., Никонова М.А. Анализ деятельности государственных корпораций в России (на примере «Росатом» и «Ростеха») // Общество и экономика. 2020. № 8. С. 105-119. [Akinfeeva E.V., Nikonova M.A. Analiz deyatel'nosti gosudarstvennykh korporatsiy v Rossii (na primere «Rosatoma» i «Rostekha») // Obshchestvo i ekonomika. 2020. No. 8. Pp. 105-119.] DOI: 10.31857/S020736760010804-3.
11. Frolov I.E. Russian High-Technology Complex under Low Inflation and Government Support Limitation: the Condition, Capacity and Tendencies for Development // Studies on Russian Economic Development. 2019. Vol. 30. No. 4. Pp. 365-375. DOI: 10.1134/S1075700719040051.
12. Bent Flyvbjerg, Alexander Budzier. Why Your IT Project May Be Riskier Than You Think // Harvard Business Review. September 2011. Vol. 89. No. 9. Pp. 23-25.
13. Ganichev N.A., Koshovets O.B. Forcing the Digital Economy: How will the Structure of Digital Markets Change as a Result of the COVID-19 Pandemic // Studies on Russian Economic Development. 2021. Vol. 32. No. 1. Pp. 11-22. DOI: 10.1134/S1075700721010056.
14. Ганичев Н.А., Кошовец О.Б. Как посчитать цифровую экономику: между реальностью и конструкцией // ЭКО. 2020. № 2. С. 8-36. [Ganichev N.A., Koshovets O.B. Kak poschitat' tsifrovuyu ekonomiku: mezhdru real'nost'yu i konstruktsei // ECO. 2020. No. 2. Pp. 8-36.] DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2020-2-8-36.
15. Харитонов В.В., Косолапова В.Н., Ульянин Ю.А. Прогнозирование эффективности инвестиций в многоблочные электростанции // Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". 2018. Т. 7. № 6. С. 545-562. [V.V. Kharitonov, V.N. Kosolapova, and Yu.A. Ulyanin. Forecasting the efficiency of investments in multi-unit power plants // Vestn. Nat. Issl. Yadernogo Univ. MIFI. 2018. Vol. 7. No. 6. Pp. 545-562.]
16. Nuclear Power Economics and Project Structuring – 2017 Edition. World Nuclear Association. Report. No. 2017/001. 2017. 48 p.
17. The ETI Nuclear Cost Drivers Project: Summary Report. Energy Technologies Institute, 20 April 2018. 55 p.
18. Eash-Gates P., Klemun M., Kavlak G., Mc Nerney J., Buongiorno J., Trancik J. Sources of Cost Overrun in Nuclear Power Plant Construction Call for a New Approach to Engineering Design // Joule. 2020. № 4. November 18. Pp. 2348-2373.
19. Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders. NEA. OECD, 2020. 134 p.
20. Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. U.S. Energy Information Administration. U.S. Department of Energy. Washington. DC 20585. 2016. 141 p.
21. Lovering Jessica R., Yip Arthur, Nordhaus Ted. Historical construction costs of global nuclear power reactors // Energy Policy. 2016. № 91. Pp. 371-382.
22. Berthelemy M. How to reduce the construction costs of Gen-III nuclear reactors? The role of technical and organizational factors. Transforming Energy Markets. 41st IAEE International Conference. Groningen. Netherlands. 2018. Jun 10-13.
23. Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants. NEA. OECD, 2000. 108 p.
24. The World Nuclear Industry Status Report 2017. Mycle Schneider Consulting Project. Paris, September 2017. 267 p.



Статья поступила 11.05.2021. Статья принята к публикации 23.06.2021.

Для цитирования: В.В. Харитонов, Д.Ю. Семенова, Е.В. Акинфеева. Прогнозирование эффективности инвестиций в цифровизацию ядерной энергетики // Проблемы прогнозирования. 2021. № 6 (189). С. 104-112.
DOI: 10.47711/0868-6351-189-104-112.

Summary

INVESTMENT PERFORMANCE PREDICTIONS IN THE DIGITIZATION OF NUCLEAR ENERGY

V.V. KHARITONOV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

D.Yu. SEMENOVA, graduate student, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

E.V. AKINFEEVA, Cand. Sci. (Econ.), Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: The article proposes an analytical method for prediction of the investments efficiency in digitalization of design stage, construction and industrial operation of nuclear power plants at the microeconomic level. The costs of enterprise digital transformation ultimately affect the economic indicators of NPP projects, which determine the competitiveness of nuclear energy in the energy market. In this regard, authors propose to consider the reduction in the cost and timing of NPP construction, which to the greatest extent affect the competitiveness of NPPs as a criterion for assessing the economical effectiveness of digitalization nuclear energy. The results of calculations of the present value of NPP electricity, the payback period of investments and the internal rate of return, given in the article, depending on the observed delays and the corresponding growth in the cost of NPP construction, demonstrate reserves for their reduction due to the digitalization of the business processes of design, construction and operation of NPPs.

Keywords: nuclear power plant, assessment of investment efficiency, digitalization of business processes, forecasting the effects of digitalization, cost and timing of NPP construction

Received 11.05.2021. Accepted 23.06.2021.

For citation: *V.V. Kharitonov, D.Yu. Semenova, and E.V. Akinfeeva.* Investment Performance Predictions in the Digitization of Nuclear Energy // *Studies on Russian Economic Development.* 2021. Vol. 32. No. 6. Pp. 662-667.
DOI: 10.1134/S107570072106006X.