

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.057

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862

Организационно-технологическое моделирование модульной сборки атомной электростанции для сокращения инвестиционно-строительного цикла

Асият Бахауовна Моттаева

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование посвящено разработке организационно-технологической модели модульной сборки атомных электростанций, направленной на сокращение инвестиционно-строительного цикла (ИСЦ) при сохранении нормативных требований надежности и безопасности. В условиях высокой капиталоемкости и длительности строительства энергоблоков переход к индустриализированной технологии с высокой степенью заводской готовности предполагает формализацию процессов параллелизации работ, укрупнения модулей и управления транспортно-монтажными рисками. Научная проблема заключается в построении воспроизводимой модели, обеспечивающей количественное сокращение сроков строительства без снижения показателей прочности и устойчивости конструкций.

Материалы и методы. Применены методы календарно-сетевого моделирования, организационно-технологического анализа, структурной оптимизации процессов и расчетной верификации временных состояний конструкций в соответствии с требованиями действующих строительных и отраслевых нормативов. Проведено сопоставление традиционной площадочной технологии и модульной схемы сооружения с учетом стадий заводского изготовления, транспортировки и монтажа укрупненных элементов. Используются данные типовых проектов энергоблоков поколения III+ и нормативные показатели трудоемкости и продолжительности работ.

Результаты. Разработана формализованная модель оценки влияния степени укрупнения модулей и уровня параллелизации процессов на продолжительность строительства. Установлено, что при коэффициенте укрупнения 0,6–0,75 обеспечивается сокращение ИСЦ на 15–30 % при сохранении нормативных требований прочности, устойчивости и сейсмостойкости. Определена структура распределения транспортно-монтажных рисков в общей системе проектных рисков.

Выводы. Предложенная организационно-технологическая модель обеспечивает количественно подтвержденное сокращение сроков строительства энергоблоков без компромиссов по безопасности и надежности. Методика носит воспроизводимый характер и может применяться при серийном сооружении энергоблоков различной мощности, включая проекты малых модульных реакторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атомная электростанция, модульная сборка, организационно-технологическое моделирование, инвестиционно-строительный цикл, параллелизация процессов, укрупнение модулей, управление рисками, индустриализация строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Моттаева А.Б. Организационно-технологическое моделирование модульной сборки атомной электростанции для сокращения инвестиционно-строительного цикла // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 849–862. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862

Автор, ответственный за переписку: Асият Бахауовна Моттаева, asenka2574@gmail.com.

Organizational and technological modelling of NPP modular assembly for reducing the construction investment cycle

Asiat B. Mottaeva

Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to the development of an organizational and technological model for modular construction of nuclear power plants aimed at reducing the investment and construction cycle while maintaining regulatory requirements for reliability and safety. Under conditions of high capital intensity and long construction periods of power units, the transition to industrialized technology with a high degree of factory readiness requires formalization of process parallelization, module enlargement, and management of transportation and installation risks. The scientific problem lies in developing a reproducible model that ensures quantitative reduction of construction time without compromising structural strength and stability.

Materials and methods. The study employs schedule network modelling, organizational and technological analysis, structural process optimization, and computational verification of temporary structural states in accordance with current construction and industry regulations. A comparison of conventional on-site construction technology and modular erection schemes was performed, taking into account factory fabrication, transportation, and installation stages of large modules. Data from typical Generation III+ power unit projects, as well as regulatory indicators of labor intensity and construction duration, were used.

Results. A formalized model was developed to assess the impact of module enlargement degree and process parallelization level on construction duration. It was established that within a module enlargement coefficient of 0.6–0.75, a 15–30 % reduction of the investment and construction cycle can be achieved while maintaining regulatory requirements for structural strength, stability, and seismic resistance. The structure of transportation and installation risks within the overall project risk system was also determined.

Conclusions. The proposed organizational and technological model provides a quantitatively verified reduction in construction time of power units without compromising safety and reliability. The methodology is reproducible and can be applied to serial construction of power units of various capacities, including small modular reactor projects.

KEYWORDS: nuclear power plant, modular construction, organizational and technological modelling, investment and construction cycle, process parallelization, module enlargement, risk management, industrialized construction

FOR CITATION: Mottaeva A.B. Organizational and technological modelling of NPP modular assembly for reducing the construction investment cycle. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):849-862. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862 (rus.).

Corresponding author: Asiyat B. Mottaeva, asenka2574@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая атомная энергетика сохраняет устойчивую долю в структуре глобальной генерации электроэнергии и одновременно характеризуется усложнением организационно-технологических условий реализации проектов сооружения энергоблоков. По данным IAEA¹ PRIS² за 2024–2025 гг., в эксплуатации находятся порядка 413 энергетических реакторов совокупной установленной мощностью около 380 ГВт, более 60 энергоблоков — в стадии строительства. При этом средняя фактическая продолжительность сооружения энергоблоков большой мощности в мировой практике составляет 6–8 лет, а по отдельным проектам превышает 10 лет, что сопровождается отклонениями от контрактных графиков [1–3].

Анализ крупных инфраструктурных проектов, выполненный на основе отраслевой статистики и исследований по управлению строительством, показывает, что до 60–70 % отклонений по срокам формируются организационно-технологическими факторами: несогласованностью графиков, недостаточной синхронизацией поставок и монтажа, перераспределением трудовых ресурсов, а также дефектами строительного-монтажных работ [4, 5].

В условиях высокой капиталоемкости атомного строительства увеличение продолжительности инвестиционно-строительного цикла (ИСЦ) приводит к росту совокупных затрат вследствие инфляционного удорожания, увеличения стоимости капитала и перераспределения ресурсов [1, 2, 6].

Согласно требованиям СП 48.13330 «Организация строительства»³, планирование и управление строительством объектов повышенной ответственности должны обеспечивать согласование

технологических процессов, рациональную последовательность выполнения работ и контроль критического пути проекта. Для объектов использования атомной энергии нормативные требования к безопасности установлены НП-001-15⁴ и другими отраслевыми документами, предусматривающими учет надежности конструкций и управляемости строительных стадий. Рекомендации IAEA SSG-38⁵ подчеркивают необходимость интеграции календарного планирования, обеспечения качества и риск-информированного подхода при реализации проектов атомной электростанции (АЭС) [7, 8].

В этих условиях модульная сборка рассматривается как инструмент организационно-технологической трансформации ИСЦ [9, 10]. Перенос части строительного-монтажных операций в заводские условия, укрупнение конструктивных элементов и параллелизация процессов изготовления и монтажа позволяют изменить структуру критического пути проекта [6, 11]. По данным реализованных проектов и отраслевых отчетов, применение укрупненных модулей обеспечивает сокращение продолжительности строительства на 15–30 % [3, 12, 13], при этом до 30–40 % трудоемкости строительного-монтажных работ (СМР) переносится в контролируемые производственные условия [14, 15], что снижает вариативность сроков и дефектность, подтверждая выводы международных исследований о преимуществах индустриализированной сборки [16, 17].

С позиций технологии и организации строительства ключевым является построение формализованной организационно-технологической модели модульной сборки, включающей количественную оценку влияния степени укрупнения модулей на параметры критического пути [5, 18], синхронизацию календарно-сетевых графиков (КСГ) изготовления и монтажа [7, 11], оптимизацию логистики и управление транспортно-монтажными рисками в рамках

¹ World Nuclear Performance Report 2024 // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/images/articles/World-Nuclear-Performance-Report-2024.pdf>

² Power Reactor Information System (PRIS) // International Atomic Energy Agency. URL: <https://pris.iaea.org/pris/>

³ СП 48.13330.2019. Организация строительства. URL: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/97_480597

⁴ НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. URL: https://web-develop-docs-secnrns-sites.srv2.machaon.dev/documents/nps/НП-001-15/НП-001-15_conv.pdf (дата обращения: 11.02.2026)

⁵ Construction for Nuclear Installations.

действующей нормативной базы (СП 48.13330³, СП 14.13330⁶, СП 16.13330⁷, СП 63.13330⁸, НП-001–15⁴).

Цель настоящего исследования — разработка организационно-технологической модели модульной сборки АЭС, обеспечивающей сокращение ИСЦ не менее чем на 15 % при сохранении нормативных требований надежности и безопасности [9, 13].

Для достижения поставленной цели решаются задачи анализа влияния традиционной площадочной технологии на структуру критического пути [4, 5], разработки модели параллелизации заводских и площадочных процессов [6], формирования метода оценки влияния степени укрупнения модулей на продолжительность строительства [3, 12], а также построения модели распределения транспортно-монтажных рисков в общей структуре проектных рисков [7, 11].

Объект исследования — процессы технологий и организации строительства атомных электростанций.

Предмет исследования — организационно-технологические параметры модульной сборки энергоблоков, влияющие на продолжительность ИСЦ.

Гипотеза исследования состоит в том, что формализованное организационно-технологическое моделирование модульной сборки, основанное на синхронизации производственных стадий, рациональной степени укрупнения модулей и нормативной верификации временных состояний конструкций, обеспечивает сокращение сроков строительства на 15–30 % и снижение совокупных организационно-технологических рисков [3–6, 12].

Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной модели организационно-технологической трансформации инвестиционно-строительного цикла АЭС, учитывающей взаимосвязь между степенью укрупнения модулей, параметрами критического пути и структурой проектных рисков в условиях требований нормативной безопасности [5, 7].

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения предложенной модели при разработке проектов организации строительства, КСГ, логистических схем и систем управления рисками при серийном сооружении энергоблоков различной мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании используются следующие основные понятия:

- под модульной сборкой АЭС понимается организационно-технологическая модель сооружения

⁶ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. URL: ouzgaz.ru/upload/Betonnye_i_zhelezobetonnye_konstrukcii.pdf

⁷ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14474/>

⁸ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. URL: https://souzgaz.ru/upload/Betonnye_i_zhelezobetonnye_konstrukcii.pdf

энергоблока, при которой укрупненные элементы высокой заводской готовности изготавливаются в контролируемых условиях и поставляются на площадку для интеграции в строительную систему [3, 10–13];

- ИСЦ рассматривается как совокупность стадий от начала СМР до ввода объекта в эксплуатацию в соответствии с действующим законодательством;

- критический путь проекта — последовательность работ календарно-сетевой модели, определяющая минимально возможную продолжительность строительства при заданной структуре взаимосвязей [8, 10];

- степень укрупнения модуля определяется как отношение объема работ, выполняемых в составе заводских модулей, к общему объему СМР по объекту [14–16];

- малые модульные реакторы (ММР) — установки мощностью до 300 МВт, основанные на принципах серийности и высокой заводской готовности [1, 3, 17]. Их развитие усиливает переход к стандартизированной модульной сборке.

По состоянию на 2026 г. реализованы первые объекты ММР (включая плавучие и наземные установки), более 70 концепций проходят стадии проектной проработки и лицензирования [1, 3]. Это формирует переход от уникального проектирования к стандартизированной модульной сборке с серийным тиражированием.

Визуализация пространственно-технологической структуры укрупненных модулей и их интеграция в общую строительную систему энергоблока представлены на рис. 1. На рис. 1 отражены перенос трудоемких и критически ответственных операций в заводские условия и последовательная интеграция модулей на площадке [10, 11].

Рис. 1 иллюстрирует перенос трудоемких операций в заводские условия как базовое условие сокращения ИСЦ.

Логическим этапом исследования выступает разработка методики количественной оценки эффекта от организационной трансформации строительства в рамках заданных нормативных ограничений. Общая методика разработки организационно-технологической модели модульной сборки, которая включает пять этапов, наглядно проиллюстрирована на рис. 2. Схема отражает декомпозицию цели исследования на задачи, методы, показатели и итоговые результаты.

На рис. 2 показана методическая последовательность: цель → задачи → методы → показатели → результат, обеспечивающая достижение сокращения ИСЦ $\geq 15\%$ при нормативной надежности.

Примененный в исследовании методический аппарат соответствует задачам исследования.

В качестве исходных данных использованы:

- укрупненные графики строительства энергоблоков поколения III+ (ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ)⁹;

⁹ Проекты ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ // Росатом. URL: [tations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/sovremennye-reaktory/](https://tations.projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/sovremennye-reaktory/)



Рис. 1. Принципиальная схема модульной сборки энергоблока АЭС

Fig. 1. Schematic diagram of the modular assembly of the NPP power unit

- нормативные показатели продолжительности и трудоемкости (СП 48.13330³, ФЕР¹⁰);
- параметры транспортно-монтажных ограничений (СП 16.13330⁷, СП 20.13330¹¹).

Продолжительность базового периода сооружения энергоблока принята равной 60–65 мес, что соответствует фактической практике реализации российских проектов поколения III+ (Ленинградская АЭС-2¹², Нововоронежская АЭС-2¹³, Курская АЭС-2¹³) и данным публичной отчетности ГК «Росатом».

В целях подтверждения инженерной реализуемости укрупненного модуля в табл. 1 выполнена числовая верификация его монтажного (временного) состояния. Расчет проведен по основной комбинации нагрузок в соответствии со СП 20.13330:

$$\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \gamma_W \cdot W, \quad (1)$$

где G — собственный вес модуля; Q — монтажные воздействия (динамика подъема учтена коэффициентом φ); W — ветровая нагрузка в монтажном положении. В данном примере монтажные воздействия Q учтены динамической добавкой при подъеме (коэффициент φ). Ветровая нагрузка W рассматривается в проверке устойчивости монтажной

схемы (горизонтальная составляющая) и в табл. 1 численно не приводится.

По результатам верификации (табл. 1) монтажное состояние укрупненного модуля удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости ($k_s t = 1,34 \geq 1,2$), что подтверждает инженерную допустимость укрупнения при принятой массе и схеме подъема.

Вместе с тем подтверждение нормативной реализуемости монтажного состояния не определяет рациональный предел степени укрупнения. Для целей организационно-технологического моделирования требуется установить диапазон значений коэффициента K_u , при котором обеспечивается баланс между сокращением ИСЦ и соблюдением транспортно-монтажных и конструктивных ограничений.

Систематизация соответствующих расчетных зависимостей и инженерных ограничений представлена в табл. 2, формирующей расчетно-аналитическую модель обоснования коэффициента укрупнения.

Анализ представленных в табл. 2 расчетных зависимостей показывает, что коэффициент укрупнения K_u не является произвольным организационным параметром, а определяется совокупностью конструктивных, транспортных и монтажных ограничений. Предельное условие по грузоподъемности и устойчивости формирует верхнюю границу K_u , тогда как минимальный уровень укрупнения задается требованием обеспечения организационного эффекта параллелизации.

Следовательно, диапазон $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ задается совокупностью ограничений по грузоподъемности, транспортируемости и устойчивости монтажного положения и используется далее при оценке $\Delta T(K_u)$. Для количественной оценки влияния установленного диапазона на параметры критического

¹⁰ Федеральные единичные расценки (ФЕР). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405894703/>

¹¹ СП 20.13330. Нагрузки и воздействия. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/>

¹² Строящиеся АЭС в России. URL: [troyashchiesya-aes-v-rossii/](http://stroyshchiesya-aes-v-rossii/)

¹³ Строительство энергоблока № 8 Нововоронежской АЭС к 2036 году включено в генсхему размещения объектов электроэнергетики — 2042. URL: tations_projects/saytnovovoronezhskoy-aes/press-tsentr/novosti/47820/



Рис. 2. Структурно-логическая схема реализации методического аппарата оценки организационно-технологической эффективности модульной сборки АЭС

Fig. 2. A structural and logical scheme for the implementation of a methodological framework for assessing the organizational and technological effectiveness of modular nuclear power plant assembly

Табл. 1. Числовая верификация монтажного (временного) состояния укрупненного модуля

Table 1. Numerical verification of the mounting (temporary) state of the enlarged module

Расчетный блок Calculation module	Формула Formula	Числовой результат Numerical result	Интерпретация Interpretation
Комбинация нагрузок Load combination	$\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \gamma_W \cdot W$	–	СП 20.13330 CP 20.13330
Вес с учетом динамики Weight, taking dynamics into account	$G = m \cdot g; G_{dyn} = \varphi \cdot G$	3139 → 3610 кН / kN	$m = 320 \text{ т / t}; \varphi = 1,15$
Расчетное усилие Design load	$N_{ed} = \gamma_f \cdot G_{dyn}$	3971 кН / kN	$\gamma_f = 1,1$
Проверка прочности Strength test	$N_{ed} \leq N_{Rd}$	3971 ≤ 5320 кН / kN	Несущая способность обеспечена Load-bearing capacity is ensured
Проверка устойчивости Stability check	$k_{st} = \frac{N_{cr}}{N_{ed}}$	1,34 ≥ 1,2	Нормативный запас выполнен The target has been met

пути далее рассматривается функциональная зависимость относительного сокращения ИСЦ $\Delta T(K_u)$ (см. рис. 3).

Зависимость $\Delta T(K_u)$ получена из календарно-сетевой модели с учетом перераспределения длительности между площадочными и заводскими стадиями и перекрытия процессов изготовления и монтажа. Заштрихованная область (0,6–0,75) соответствует рациональному диапазону коэффициента укрупнения (рис. 3).

Далее приведены аналитические зависимости:

$$T_{mod(K_u)} = T_{site(K_u)} + T_{factory(K_u)} - T_{overlap(K_u)}; \quad (2)$$

$$T_{overlap(K_u)} = \alpha \cdot T_{factory(K_u)}; \quad (3)$$

$$\Delta T(K_u) = \frac{T_{trad} - T_{mod(K_u)}}{T_{trad}} 100 \%. \quad (4)$$

Табл. 2. Расчетно-аналитическая модель инженерного обоснования коэффициента укрупнения

Table 2. Computational and analytical model of engineering substantiation of the enlargement coefficient

Расчетный этап Calculation stage	Формула Formula	Инженерный смысл Engineering meaning	Вывод Conclusion
Определение коэффициента укрупнения Determination of the enlargement coefficient	$K_{-u} = \frac{V_{-mod}}{V_{-tot}}$	Доля работ, перенесенных в заводские условия Share of work transferred to factory conditions	Базовый организационный параметр Basic organizational parameter
Связь с кратностью укрупнения Relationship with the enlargement multiplicity	$k_{-m} = \frac{1}{1 - K_{-u}}$	Рост кратности при увеличении K_{-u} Increase in multiplicity with increasing K_{-u}	Исключает расхождение обозначений Eliminates inconsistency in notation
Масса укрупненного модуля Mass of the enlarged module	$G_{-mod} = K_{-u} \cdot G_{-tot}$	Связь степени укрупнения с массой блока Relationship between the enlargement degree and the block mass	Замыкание инженерной логики Completion of the engineering logic
Ограничение по грузоподъемности Lifting capacity limitation	$G_{-mod} \leq G_{-cr}(R)$	Монтажная реализуемость Installation feasibility	Определяет предельную массу Determines the maximum mass
Предельное условие для K_{-u} Limit condition for K_{-u}	$K_{-u} \leq \frac{G_{-cr}(R)}{G_{-tot}}$	Инженерное ограничение укрупнения Engineering limitation of enlargement	Диапазон выводится расчетно The range is determined analytically
Рациональный диапазон Rational range	$0,6 \leq K_{-u} \leq 0,75$	Баланс сроков и ограничений Balance between schedule and limitations	Инженерно обоснованный интервал Engineering-based interval
Чувствительность продолжительности Duration sensitivity	$\Delta T(K_u) = \frac{T_{-trad} - T_{-mod}(K_{-u})}{T_{-trad}}$	Связь укрупнения и сокращения ИСЦ Relationship between enlargement and reduction of construction duration	Максимум ΔT достигается в диапазоне 0,6–0,75 (см. рис. 3) Maximum ΔT is achieved within the range of 0.6–0.75 (see Fig. 3)

Примечание: K_{-u} — это доля работ в модулях (0,6–0,75); k_{-m} — показатель кратности (2,5–3,5).

Note: K_{-u} is the share of work performed in modules (0.6–0.75); k_{-m} is the multiplicity factor (2.5–3.5).

Для практических оценок в допустимом диапазоне использована линейная аппроксимация зависимости $\Delta T(K_{-u})$:

$$\Delta T(K_u) = K_u \cdot (a - b \cdot (1 - \alpha)) \cdot 100 \% \quad (5)$$

Принятые параметры модели: $T_{-trad} = 62$ мес.; $\alpha = 0,60$; $a = 0,35$; $b = 0,133$. Калибровка выполнена по условию $\Delta T(0,65) = 19,3 \%$.

Как следует из рис. 3, зависимость относительного сокращения длительности строительства от коэффициента укрупнения носит квазилинейный характер. При малых значениях коэффициента укрупнения эффект параллелизации ограничен и не обеспечивает существенного сокращения длительности, тогда как при превышении верхней границы диапазона рост монтажных и логистических ограничений снижает прирост организационного эффекта.

Максимально устойчивый прирост ΔT достигается в выделенном на рис. 3 интервале, что подтверждает корректность ранее установленного рационального диапазона коэффициента укрупнения. Полученная зависимость позволяет перейти от инженерных ограничений к формализованному описанию изменения структуры критического пути и календарно-сетевой модели проекта. В следующем подразделе выполняется формализация влияния укрупнения на продолжительность строительства с применением аналитических выражений для традиционной и модульной продолжительности и перекрытия стадий.

Таким образом, календарно-сетевое моделирование в рамках инженерно допустимого диапазона K_{-u} дает возможность количественно оценить влияние укрупнения и параллелизации на параметры критического пути без выхода за пределы нормативных инженерных ограничений.

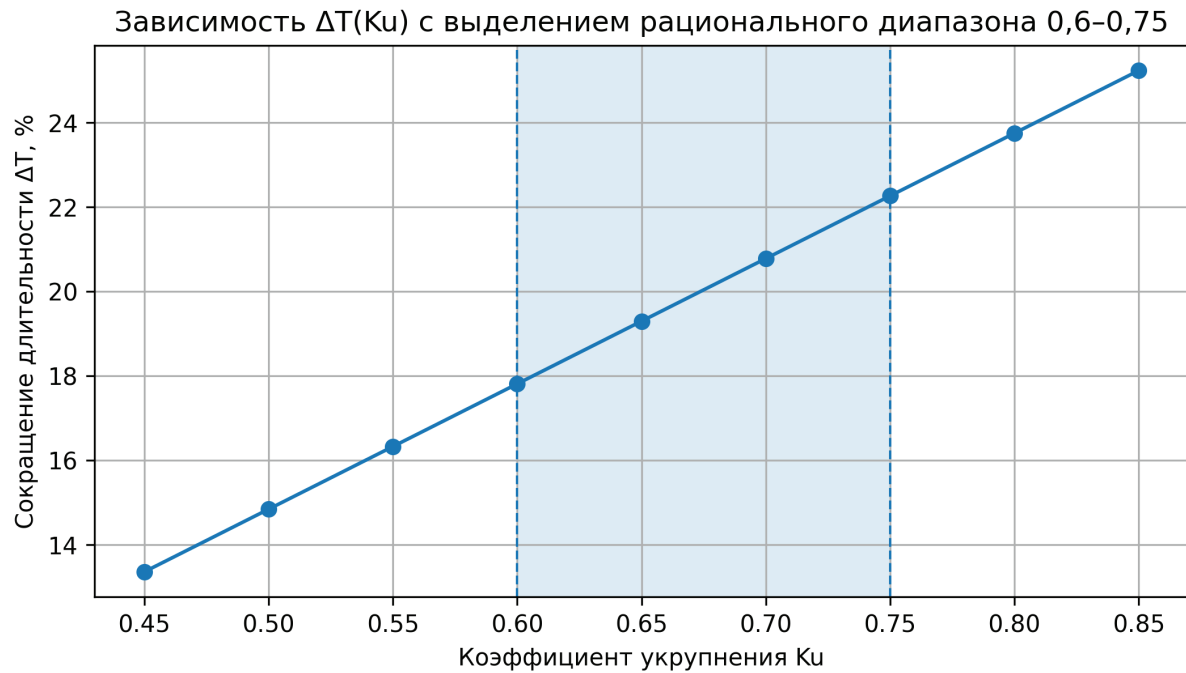


Рис. 3. Зависимость $\Delta T(K_u)$ с выделением рационального диапазона

Fig. 3. Dependence of $\Delta T(K_u)$ with allocation of a rational range

В целях формализации методического аппарата исследования разработана структурированная система расчетных зависимостей, позволяющая обеспечить количественную оценку организационно-технологического эффекта перехода к модульной сборке при одновременном соблюдении нормативных требований прочности, устойчивости и безопасности [5, 7, 9].

Представленная в табл. 3 расчетно-аналитическая модель подтверждает сокращение ИСЦ на 15–30 % в пределах допустимого диапазона K_u .

Для системного представления последовательности реализации методического аппарата выполнена визуализация причинно-следственных связей между исходными инженерными ограничениями, инженерной верификацией и организационно-технологическими решениями. Интегральная схема

Табл. 3. Расчетная модель оценки влияния укрупнения на продолжительность строительства

Table 3. A computational model for assessing the impact of enlargement on the duration of construction

Расчетный этап Calculation stage	Формула Formula	Числовой результат Numerical result	Интерпретация Interpretation
Продолжительность при традиционной технологии Duration using conventional technology	$T_{trad} = \max \sum t_i$	62 мес. 62 month.	Критический путь Critical path
Продолжительность при модульной технологии Duration with modular technology	$T_{mod} = T_{site} + T_{factory} - T_{overlap}$	50 мес. 50 month.	Учет перекрытия стадий Tracking the overlap between stages
Относительное сокращение ИСЦ Relative decline in the construction investment duration	$\Delta T = \frac{T_{trad} - T_{mod}}{T_{trad}} \cdot 100 \%$	19,3 %	Количественный эффект укрупнения The scale effect
Интерпретация диапазона Interpretation of the range	$0,6 \leq K_u \leq 0,75$	15–30 %	Рациональный интервал сокращения сроков A reasonable timeframe for reducing deadlines

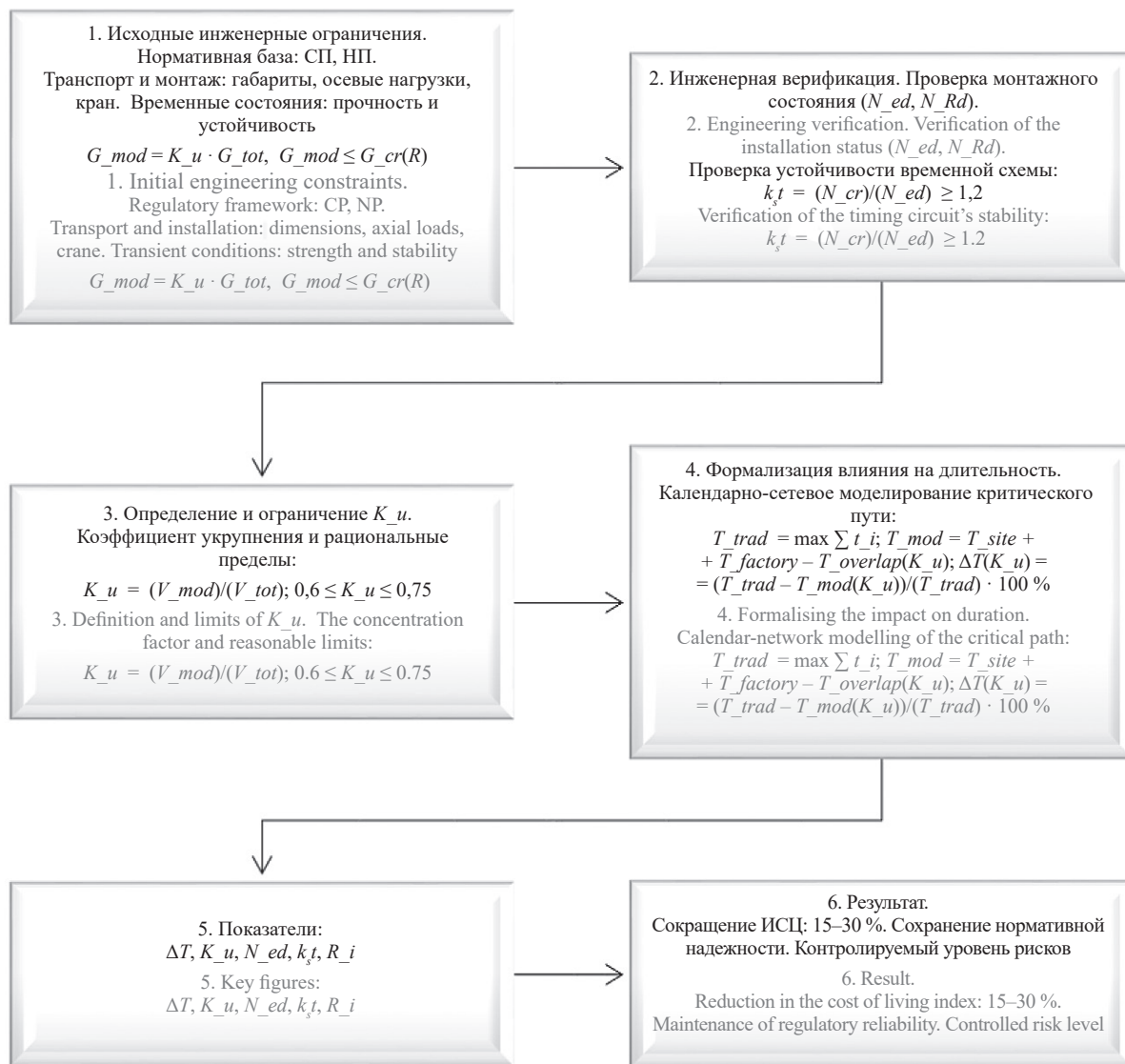


Рис. 4. Инженерно-методическая схема формирования и верификации организационно-технологической модели модульной сборки АЭС

Fig. 4. Engineering and methodological model for the formation and verification of the organizational and technological scheme of modular assembly of nuclear power plants

на рис. 4 отражает последовательность: нормативные ограничения → расчетная верификация ($N_{ed} \leq N_{Rd}; k_{st} \geq 1,2$) → определение диапазона K_u → моделирование ($T_{trad}, T_{mod}, \Delta T$). Схема фиксирует воспроизводимость организационно-инженерной модели.

Ограничения исследования. Разработанная модель калибрована по типовым проектам энергоблоков поколения III+ при базовой продолжительности строительства 62 мес. и стандартной схеме перекрытия заводских и площадочных стадий. Полученные диапазоны $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ и $\Delta T = 15-30\%$ применимы при наличии развитой заводской инфраструктуры и устойчивой логистической цепочки поставок.

Модель не учитывает влияние сложных геотехнических условий площадки (просадочные, многолетние и мерзлые, сейсмоактивные грунты), которые могут изменять структуру нулевого цикла и пара-

метры критического пути. Также не рассмотрены особенности морской логистики тяжелых модулей, включая ограничения по портовой инфраструктуре и погодным окнам.

Дополнительно за пределами модели остаются нестандартные монтажные схемы (кольцевые подъемы, поэтапная сборка на высоте, применение уникальных кранов большой грузоподъемности), требующие индивидуальной расчетной постановки и уточнения коэффициента укрупнения.

Соответственно, предложенная модель ориентирована на серийное сооружение энергоблоков в условиях промышленно освоенных площадок и типовых логистических решений; ее применение в уникальных инженерно-географических условиях требует дополнительной адаптации параметров.

Табл. 4. Организационно-технологическая модель сокращения сроков при модульной сборке АЭС

Table 4. Organizational and technological model of shortening the time for modular assembly of nuclear power plants

Элемент модели Model element	Формализация Formalization	Интерпретация Interpretation	Количественный эффект Quantitative effect	Ограничивающий фактор Limiting factor
Традиционная схема длительности The traditional duration model	$T_{trad} = T_{pl} + T_{mon} + T_{push}$	Последовательная структура критического пути Sequential structure of the critical path	Базовая длительность 60–65 мес. Standard duration: 60–65 month.	СП 48.13330, фронт работ SP 48.13330, front work
Модульная схема (параллелизация) Modular architecture (parallelization)	$T_{mod} = T_{site} + T_{factory} - T_{overlap}$	Перекрытие заводских и площадочных стадий Overlap between the factory and site phases	–12–18 %	Логистика, синхронизация поставок Logistics, supply chain coordination
Относительное сокращение Relative reduction	$\Delta T = \frac{(T_{trad} - T_{mod})}{T_{trad}} \cdot 100 \%$	Итоговый эффект The overall effect	$\geq 15 \%$ (типично 19,3 %) $\geq 15 \%$ (typically 19.3 %)	Контрактные директивные сроки Contractual mandatory deadlines
Коэффициент укрупнения Consolidation factor	$K_u = V_{mod} / V_{tot}$	Доля работ, перенесенных в заводские условия Proportion of work carried out in factory conditions	Оптимум $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ Optimum $0.6 \leq K_u \leq 0.75$	Транспорт/монтаж/временные состояния Transport/installation/temporary conditions
Связь с кратностью укрупнения (при необходимости) Relation to the aggregation factor (where applicable)	$k_m = 1 / (1 - K_u)$	Трансформация показателей без разрыва обозначений Transforming metrics without breaking the labelling	$k_m \approx 2,5 \dots 4,0$ при $K_u = 0,6 \dots 0,75$ $k_m \approx 2.5 \dots 4.0$ when $K_u = 0.6 \dots 0.75$	Использовать только как производную величину Use only as a derived quantity
Снижение трудоемкости монтажа Reduced labour intensity during installation	$L_{mod} = L_0(1 - \beta K_u)$	Уменьшение объема площадочных операций A reduction in the volume of field operations	–18–27 %	СП 16.13330, СП 63.13330 SP 16.13330, SP 63.13330

Примечание: K_u — коэффициент укрупнения (доля работ, выполняемых в составе заводских модулей), $0,6 \leq K_u \leq 0,75$; k_m — показатель кратности, рассчитываемый как производная величина: $k_m = 1/(1 - K_u)$; β — эмпирический коэффициент снижения трудоемкости, определяемый по нормативам трудоемкости/фактическим данным проекта; в настоящей работе принят по диапазону, приведенному в табл. 5.

Note: K_u — consolidation factor (proportion of work carried out as part of factory-built modules), $0.6 \leq K_u \leq 0.75$; k_m — multiplicity factor, calculated as a derivative: $k_m = 1/(1 - K_u)$; β — empirical labour-saving coefficient, determined based on labour-intensity standards/actual project data; in this study, it is taken from the range given in Table 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенное исследование позволило разработать и формализовать организационно-технологическую модель модульной сборки энергоблока АЭС, ориентированную на сокращение ИСЦ при соблюдении требований нормативной надежности и безопасности [4–6, 10, 12].

Анализ КСГ сооружения энергоблоков поколения III+ показал, что при традиционной площадочной технологии формирование критического пути

определяется последовательной зависимостью следующих укрупненных процессов [4, 5, 8]:

- устройство фундаментной плиты и защитной оболочки;
- монтаж крупногабаритного оборудования реакторного отделения;
- возведение строительной части машинного зала;
- пусконаладочные работы.

Табл. 5. Сравнение традиционной и модульной технологий сооружения энергоблока

Table 5. Comparison of traditional and modular power unit construction technologies

Показатель Indicator	Традиционная технология Traditional technology	Модульная технология Modular technology	Δ, %
Продолжительность строительной стадии, мес. Duration of the construction phase, months	60–65	48–55	15–22
Трудоемкость СМР Labour intensity of construction works	100 %	73–82 %	18–27
Количество монтажных стыков Number of joints	100 %	65–70 %	30–35
Объем переделок Scope of alterations	100 %	70–75 %	25–30
Доля работ в заводских условиях Proportion of work carried out in-house	≤10 %	30–40 %	+20–30 (процентных пунктов) +20–30 percentage points
Вариабельность сроков Variability in timing	Высокая High	Умеренная Moderate	–30–35

До 65–70 % продолжительности строительной стадии формируется линейной зависимостью «изготовление – поставка – монтаж», при этом часть операций выполняется последовательно из-за ограничений по фронту работ и грузоподъемности кранового оборудования [5, 6]. Установлено, что основным фактором удлинения критического пути выступает высокая доля операций, выполняемых непосредственно на строительной площадке в условиях переменной ресурсной обеспеченности и климатических воздействий [7, 8].

В связи с этим традиционная технология характеризуется значительной чувствительностью к организационно-технологическим рискам и низкой степенью параллелизации процессов [7]. В результате разработанная модель предусматривает перенос части строительного-монтажных операций в заводские условия с формированием укрупненных модулей высокой заводской готовности [3, 13, 19].

В табл. 4 представлена формализованная организационно-технологическая модель сокращения ИСЦ, увязывающая календарно-сетевую структуру проекта с инженерными ограничениями [4–6]. Показано, что эффект достигается за счет перекрытия заводских и площадочных стадий, рационального укрупнения модулей $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ и снижения объема площадочных операций [3, 12, 13]. Границы эффекта задаются транспортно-монтажной реализуемостью и требованиями нормативных документов к временным расчетным состояниям [9, 15, 16].

Полученные результаты показывают, что именно формализованная организационно-технологическая трансформация, а не простое укрупнение конструкций обеспечивает количественно подтвержденное сокращение ИСЦ при сохранении нормативной надежности энергоблока [3, 7, 19].

В табл. 5 приведены ключевые показатели, отражающие длительность строительства, трудоемкость СМР, конструктивную сложность, объем корректировок и степень индустриализации процессов. Логика сопоставления основана на принципе переноса части операций из нестабильной площадочной среды в контролируемые заводские условия, что влияет как на параметры критического пути проекта, так и на управляемость рисков.

Анализ традиционной и модульной технологий сооружения энергоблока демонстрирует системный характер эффекта модульной технологии, что согласуется с результатами международных исследований по префабрикации и индустриализации строительства [3, 18, 19]. Сокращение продолжительности строительной стадии на 15–22 % сопровождается уменьшением трудоемкости СМР на 18–27 % и снижением количества монтажных стыков на 30–35 %, что согласуется с результатами исследований по влиянию трудоемкости и организационных факторов на продолжительность ИСЦ [5, 8].

Одновременно объем переделок сокращается на 25–30 %, а доля заводской готовности возрастает до 30–40 %, что подтверждает выводы о повышении управляемости процессов при индустриализации строительства [10–14].

Снижение вариабельности сроков свидетельствует о стабилизации КСГ и уменьшении организационно-технологических рисков проекта [7].

Следовательно, модульная сборка обеспечивает не только сокращение сроков, но и повышение технологической устойчивости проекта, формируя интегральный эффект в части надежности и управляемости [6, 19, 20].

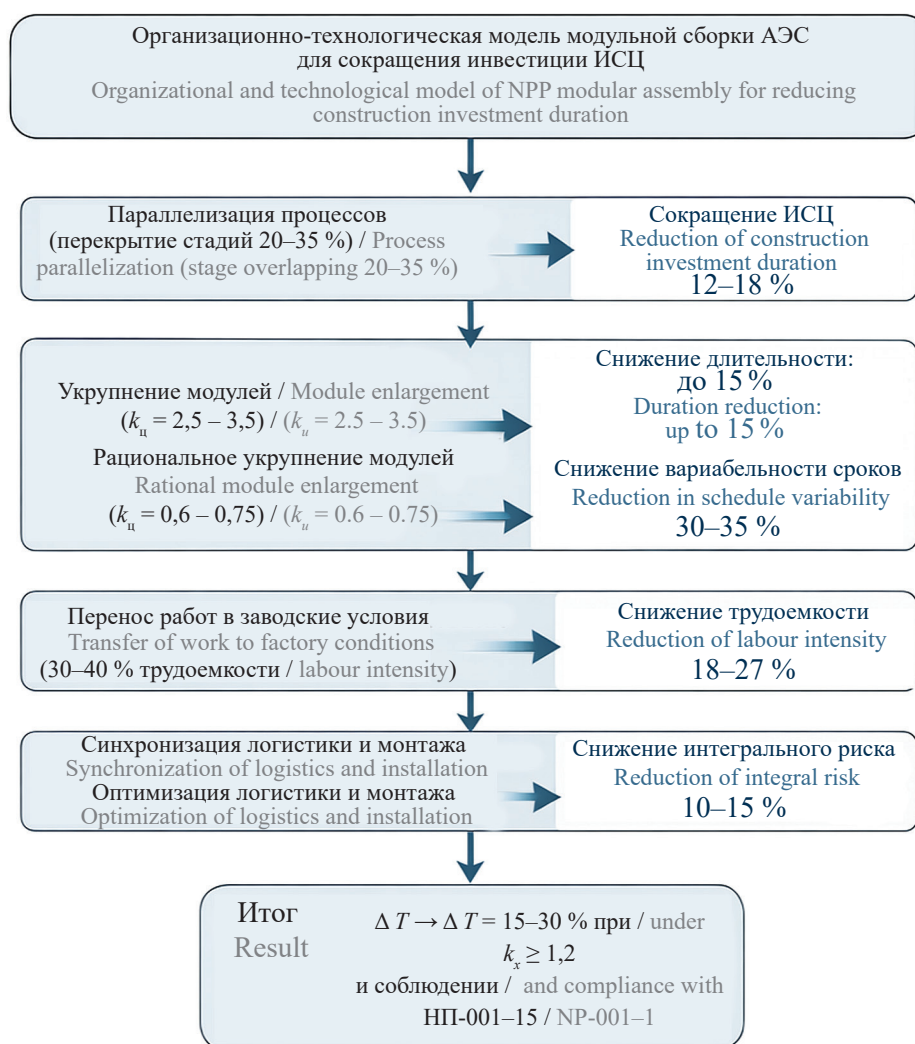


Рис. 5. Взаимосвязь модели, механизма и количественного эффекта при модульной технологии сооружения АЭС
Fig. 5. The relationship of the model, mechanism and quantitative effect in the modular technology of NPP construction

Представленная на рис. 5 схема демонстрирует, что сокращение ИСЦ формируется как результат совокупного действия взаимосвязанных механизмов: параллелизации процессов, рационального укрупнения модулей ($k_m \approx 2,5-3,5$), переноса работ в заводские условия и синхронизации логистики и монтажа. Комплексный характер воздействия указанных факторов соответствует выводам исследований по организационно-технологическому моделированию и индустриализации строительства [3, 6, 19].

Каждый механизм влияет на различные элементы критического пути проекта: устранение линейной зависимости операций обеспечивает сокращение продолжительности строительства на 12–18 % [8]; снижение количества монтажных стыков уменьшает трудоемкость на 18–27 % [12]; стандартизация и заводская сборка сокращают объем переделок на 25–30 % [114]; оптимизация логистики и синхронизация поставок снижают интегральный организационно-технологический риск проекта на 10–15 % [11, 19].

Таким образом, эффект модульной технологии носит системный характер и обусловлен изменением организационной архитектуры проекта, а не отдельным техническим приемом. Комплексная реализация указанных механизмов обеспечивает достижение целевого сокращения сроков не менее 15 % при сохранении нормативной надежности и безопасности энергоблока [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании разработана организационно-технологическая модель модульной сборки энергоблока АЭС, основанная на увязке календарно-сетевого анализа, параметров укрупнения модулей и расчетной проверки временных состояний конструкций.

Числовая верификация монтажного положения укрупненного модуля ($m = 320$ т) показала выполнение условий прочности и устойчивости ($k_s t = 1,34 \geq 1,2$). На основе ограничений по грузоподъемности, транс-

портируемости и временным расчетным состояниям установлен рациональный диапазон коэффициента укрупнения $0,6 \leq K_u \leq 0,75$.

Календарно-сетевое моделирование показало, что при перекрытии заводских и площадочных стадий и перераспределении длительности критического пути обеспечивается сокращение продолжительности строительства с 62 до 50 мес., что соответствует относительному снижению 19,3%. В пределах допустимого диапазона K_u устойчивый эффект сокращения ИСЦ составляет 15–30% в зависимости от степени параллелизации и структуры проекта.

Полученные результаты подтверждают, что организационный эффект модульной сборки достигается при условии инженерной реализуемости укрупненных модулей и соблюдения нормативных требований. Модель позволяет прогнозировать изменение длительности строительства на стадии планирования и может применяться при серийном сооружении энергоблоков поколения III+ и проектах малых модульных реакторов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на апробацию модели в реальных проектах и уточнение параметров чувствительности в зависимости от условий площадки и схем логистики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крупнов Ю.А., Моттаева А.Б. Тенденции и перспективы развития мирового энергетического рынка: прогноз на 2025 г. // E-Management. 2025. Т. 8. № 1. С. 43–54. DOI: 10.26425/2658-3445-2025-8-1-43-54. EDN OVQJAM.
2. Новак А.В. Развитие атомной энергетики — необходимое условие глобальной климатической повестки // Энергетическая политика. 2021. № 9 (163). С. 6–11. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_9163_6. EDN QJQUEM.
3. Wrigley P.A., Wood P., O'Neill S., Hall R., Robertson D. Off-site modular construction and design in nuclear power : a systematic literature review // Progress in Nuclear Energy. 2021. Vol. 134. P. 103664. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103664. EDN GIPRAI.
4. Адамцевич Л.А., Лapidус А.А. Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. № 3. С. 176–188. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11. EDN KSDBEV.
5. Березка В.В., Баронин С.А., Бредихин В.В., Зобнев А.В. Организация промышленного строительства АЭС на глобальном рынке с учетом моделирования надежности на прединвестиционных этапах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25. № 3. С. 56–69. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69. EDN XQPAOX.
6. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Digital transformation of life cycle management processes for residential and engineering infrastructure facilities in complex development of territories // Real Estate: Economics, Management. 2025. Issue 2. Pp. 6–12. EDN NMXQPG.
7. Морозенко А.А., Кабанов А.В., Шашков А.А. Методика формирования организационной структуры проекта при крупноблочном возведении АЭС // Строительное производство. 2023. № 2. С. 119–125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFHM.
8. Шашков А.А. Максимальная степень индустриализации возведения АЭС // Строительное производство. 2025. № 3. С. 32–38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP.
9. Маркелов М.Ю., Алёхин В.Н., Ушаков О.Ю., Зубрицкий М.А. Особенности проектирования арочных покрытий объектов использования атомной энергии в процессе возведения // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2024. № 2 (61). С. 75–79. DOI: 10.25628/UNIP.2024.61.2.012. EDN EWERIX.
10. Морозенко А.А., Шашков А.А. Организационно-технологические аспекты крупноблочного возведения атомных электростанций // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 5 (95). С. 28–33. EDN YEMCPG.
11. Морозенко А.А., Кабанов А.В., Шашков А.А. Методика формирования организационной структуры проекта при крупноблочном возведении АЭС // Строительное производство. 2023. № 2. С. 119–125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFHM.
12. Коротких Д.Н., Корнев О.А., Белов В.В., Силантьев А.С., Капустин Д.Е. Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 10. С. 1696–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712. EDN AUFQZV.
13. Шашков А.А. Максимальная степень индустриализации возведения АЭС // Строительное производство. 2025. № 3. С. 32–38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP.
14. Амбарцумян С.А., Мочалин Д.Е., Сьбева Ю.А. Практичность модульного строительства: опыт прошлого и перспективы // Строительное производство. 2024. № 2. С. 61–65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI.
15. Келасьев Н.Г., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Гасиев А.А., Шмаков С.Д. Конструктивные системы модульных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 6. С. 24–31. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.24-31. EDN MOZMGM.
16. Широков В.С. Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки.

2022. Т. 14. № 3. DOI: 10.15862/03savn322. EDN UASGWR.

17. Моттаева А.Б. Современные тренды развития инфраструктуры атомной энергетики // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 3. С. 182–188. EDN TKWIRZ.

18. Bruun E.P.G., Parascho S., Adriaenssens S. Collaborative robotic material processing for the circular economy / С. De Wolf, S. Cetin, N.M.P. Bocken (eds.) // Circular Built Environment in the Digital Age. Cham: Springer. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-39675-5_8

Поступила в редакцию 29 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 2 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Асият Бахауовна Моттаева** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры общего и проектного менеджмента; **Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации**; 109337, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49; РИНЦ ID: 802234, Scopus: 57194839377, ORCID: 0000-0001-5854-6944; asenka2574@gmail.com.

REFERENCES

1. Krupno Yu.A., Mottaeva A.B. Trends and prospects for the development of the global energy market: forecast for 2025. *E-Management*. 2025; 8(1):43-54. DOI: 10.26425/2658-3445-2025-8-1-43-54. EDN OVQJAM. (rus.).

2. Novak A. Nuclear energy development is a prerequisite for the global climate agenda. *Energy Policy*. 2021; 9(163):6-11. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_9163_6. EDN QJQUEM. (rus.).

3. Wrigley P.A., Wood P., O'Neill S., Hall R., Robertson D. Off-site modular construction and design in nuclear power : a systematic literature review. *Progress in Nuclear Energy*. 2021; 134:103664. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103664. EDN GIPRAI

4. Adamtsevich L.A., Lapidus A.A. Organizational and technological solutions for managing the life cycle of construction projects in integrated territorial development projects. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(3):176-188. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11. EDN KSDBEB. (rus.).

5. Berezka V.V., Baronin S.A., Bredikhin V.V., Zobnev A.V. Organization of industrial construction of nuclear power plants in the global market, taking into account reliability modeling at pre-investment stages. *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 56-69. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69. EDN XQPAOX. (rus.).

6. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Digital transformation of life cycle management processes for residential and engineering infrastructure facilities in complex development of territories. *Real Estate: Economics, Management*. 2025; 2:6-12. EDN NMXQPG.

7. Morozenko A.A., Kabanov A.V., Shashkov L.A. Methodology for the formation of the organi-

19. O'Connor J.T., O'Brien W.J., Choi J.O. Industrial project execution planning: modularization versus stick-built // *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2016. Vol. 21. Issue 1. P. 04015014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000270

20. Джолдошева Т.Ю., Моттаева А.Б. Влияние инновационных элементов инфраструктуры на устойчивое развитие атомной энергетики России // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 4. С. 184–192. EDN WAWBIA.

zational structure of the project during the large-block construction of NPP. *Construction Production*. 2023; 2:119-125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFFHM. (rus.).

8. Shashkov A. Maximum degree of industrialization of NPP construction. *Construction Production*. 2025; 3:32-38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP. (rus.).

9. Markelov M.Yu., Alekhin V.N., Ushakov O.Yu., Zubritsky M.A. Arched roof structures designing features for nuclear energy facilities during construction. *Akademicheskie Vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2024; 2(61):75-79. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.012. EDN EWERIX. (rus.).

10. Morozenko A.A., Shashkov A.A. Organizational and technological aspects of large-scale construction of nuclear power plants. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 5(95):28-33. EDN YEMCPG. (rus.).

11. Morozenko A.A., Kabanov A.V., Shashkov L.A. Methodology for the formation of the organizational structure of the project during the large-block construction of NPP. *Construction Production*. 2023; 2:119-125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFFHM. (rus.).

12. Korotkikh D.N., Kornev O.A., Belov V.V., Silantiev A.S., Kapustin D.E. Review of experience in the construction of npp using modular structures with external sheet reinforcement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(10):1696-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712. EDN AUFQZV. (rus.).

13. Shashkov A. Maximum degree of industrialization of NPP construction. *Construction Production*.

2025; 3:32-38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP. (rus.).

14. Ambartsumyan S.A., Mochalin D.E., Siebeva Ju.A. The practicality of modular construction: past experience and prospects. *Construction Production*. 2024; 2:61-65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI. (rus.).

15. Kelasyev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Gasiev A.A., Shmakov S.D. Structural systems of modular buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2025; 6:24-31. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.24-31. EDN MOZMGM. (rus.).

16. Shirokov V.S. Design features of modular buildings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(3). DOI: 10.15862/03savn322. EDN UASGWR. (rus.).

17. Mottaeva A.B. Current trends in the development of nuclear energy infrastructure. *Forging and Stamp-*

ing Production. Material Working by Pressure. 2025; 3:182-188. EDN TKWIRZ. (rus.).

18. Bruun E.P.G., Parascho S., Adriaenssens S. Collaborative robotic material processing for the circular economy / C. De Wolf, S. Cetin, N.M.P. Bocken (eds.) *Circular Built Environment in the Digital Age*. Cham: Springer. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-39675-5_8

19. O'Connor J.T., O'Brien W.J., Choi J.O. Industrial project execution planning: modularization versus stick-built. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2016; 21(1):04015014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000270

20. Dzholdosheva T.Yu., Mottaeva A.B. The impact of innovative infrastructure elements on the sustainable development of Russia's nuclear energy industry. *Forging and Stamping Production. Processing of Materials by Pressure*. 2025; 4:184-192. EDN WAWBIA. (rus.).

Received November 22, 2025.

Adopted in revised form on March 2, 2026.

Approved for publication on April 2, 2026.

BIONOTES: **Asiat B. Mottaeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Project Management; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49 Leningradsky prospekt, Moscow, 109337, Russian Federation; ID RSCI: 802234, Scopus: 57194839377, ORCID: 0000-0001-5854-6944; asenka2574@gmail.com.