

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД  
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-04>

УДК 621.311.25: 69.05 (470+510)

EDN JMSFIT

Оригинальная статья / Original paper



Влияние международной практики Российской Федерации  
и Китайской Народной Республики на управленческие  
и технологические аспекты проектирования и строительства АЭС

Д.А. Щёголева<sup>1</sup> , К.Ф. Фёдоров<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский  
и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
 shchegoleva.da@yandex.ru

**Резюме.** Статья посвящена исследованию влияния международной практики Российской Федерации и Китайской Народной Республики на управленческие и технологические аспекты проектирования и строительства АЭС. На основе нормированных показателей (длительность строительства, интенсивность и удельная капитальная стоимость) выполнен сравнительный анализ введенных в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200 и Hualong One за период 2020-2025 годы. Установлено, что эффективность сооружения АЭС в значительной степени определяется не только техническими характеристиками реакторов, но и качеством управленческих решений – уровнем стандартизации, серийности, модульности и эффективностью институциональных механизмов. Китайская стратегия высокосерийного строительства (на примере Hualong One) коррелирует с меньшими сроками и стоимостью сооружения на внутреннем рынке, тогда как российская модель (на базе ВВЭР-1200) характеризуется более широким набором экспортных решений, включая управление полным жизненным циклом (в том числе закрытие ЯТЦ) и технологическую преемственность. Выявлены устойчивые взаимосвязи между особенностями управления проектами и достигаемыми технико-экономическими результатами. Научная новизна исследования заключается в интеграции количественных нормированных метрик эффективности с институционально-организационным анализом двух крупнейших национальных программ атомной промышленности. Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по развитию серийного строительства, модульных технологий и цифровой трансформации отрасли, которые могут быть использованы для оптимизации российских программ сооружения АЭС, повышения экспортного потенциала и подготовки перехода к реакторам поколения IV и малым модульным реакторам.

**Ключевые слова:** сооружение АЭС, ВВЭР-1200, Hualong One, управление проектами, серийное строительство, модульность, институциональные механизмы, удельная капитальная стоимость, эффект обучения

**Для цитирования:** Щёголева Д.А., Фёдоров К.Ф. Влияние международной практики Российской Федерации и Китайской Народной Республики на управленческие и технологические аспекты проектирования и строительства АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(3):38-49. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-04>

**For citation:** Shchegoleva D.A., Fedorov K.F. The impact of international practices in the Russian Federation and the People's Republic of China on the management and technological aspects of NPP design and construction. *Nuclear Safety*. 2026;16(3):38-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-04>

## The impact of international practices in the Russian Federation and the People's Republic of China on the management and technological aspects of NPP design and construction

Daria A. Shchegoleva<sup>1</sup>  , Konstantin F. Fedorov<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Federal State Autonomous Scientific Institution Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, Russian Federation*

 [shchegoleva.da@yandex.ru](mailto:shchegoleva.da@yandex.ru)

**Abstract.** The article examines the influence of international practices of the Russian Federation and the PRC on the managerial and technological aspects of nuclear power plant (NPP) design and construction. Based on normalized performance indicators (construction duration, construction intensity, and overnight capital cost), a comparative analysis of commissioned VVER-1200 and Hualong One power units was conducted for the period 2020-2025. It is established that the efficiency of NPP construction is determined to a significant extent not only by the technical characteristics of the reactors, but also by the quality of managerial decisions like the level of standardization, serial construction, modularity, and the maturity of institutional mechanisms. The Chinese strategy of high-serial construction (exemplified by Hualong One) provides a statistically significant advantage in the speed and cost of power unit construction in the domestic market, whereas the Russian model (based on VVER-1200) is characterized by the complexity of export solutions, full life-cycle management (including the closure of the nuclear fuel cycle), and technological continuity. Causal relationships between project management features and achieved techno-economic outcomes are identified. The scientific novelty of the study lies in the integration of quantitative normalized efficiency metrics with an institutional and organizational analysis of the two largest national nuclear construction programs. The practical significance of the work consists in the development of recommendations for the advancement of serial construction, modular technologies, and digitalization of nuclear industry, which can be applied to optimize Russian NPP construction programs, enhance export potential, and prepare the transition to Gen IV reactors and SMR.

**Keywords:** nuclear power plant construction, VVER-1200, Hualong One, project management, serial construction, modularity, institutional mechanisms, overnight capital cost, learning curve

### Введение

Ядерная энергетика рассматривается как один из основных источников низкоуглеродной генерации электроэнергии. В условиях ужесточения климатической политики многие страны активизируют или возобновляют программы строительства атомных электростанций. По состоянию на май 2026 года база данных IAEA PRIS фиксирует в стадии строительства 72 энергоблока суммарной нетто-мощностью 75 474 МВт<sup>1</sup>; из них 35 блоков и 37 686 МВт приходятся на Китай, а 5 блоков и 5 000 МВт – на Российскую Федерацию (рис. 1).

Китай и Российская Федерация занимают ведущие позиции по числу строящихся энергоблоков и по совокупной мощности текущих проектов, поэтому их сравнение позволяет выявить наиболее характерные

различия между экспортно-инжиниринговой и серийно-индустриальными моделями атомного строительства.

Технико-экономическая эффективность сооружения АЭС в настоящее время определяется не только характеристиками реакторных установок поколения III/III+ (ВВЭР-1200, Hualong One, CAP1400), но и комплексом организационно-управленческих факторов – предсказуемостью сроков, уровнем капитальных затрат, степенью серийности и эффективностью производственно-логистических цепочек.

Международная научная литература, такая как «Overview of analysis and evaluation models for China's nuclear energy development» («Обзор моделей анализа и оценки развития атомной энергетики Китая») [1], «Nuclear Diplomacy: Analyzing Russian Foreign New Build Projects» («Ядерная дипломатия: анализ российских зарубежных проектов сооружения новых АЭС») [2], научных журналов Nuclear Power, Energy

<sup>1</sup> IAEA – PRIS. Reactor Images. – Power Reactor Information System (PRIS). URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx/ReactorImages.aspx> (дата обращения: 27.05.2026).



**Рисунок 1.** Региональная структура мирового атомного строительства на май 2026 г.

[Составлено авторами по материалам открытых источников<sup>2</sup>]

**Figure 1.** Regional structure of global nuclear construction as of May 2026

[Compiled by the authors from open-source materials<sup>2</sup>]

Strategy Reviews, активно обсуждают отдельные национальные кейсы – от опыта внедрения модульных технологий в КНР до экспортных проектов Госкорпорации «Росатом» за рубежом. Однако сопоставительный анализ двух крупнейших национальных программ на основе унифицированных количественных метрик (продолжительность строительства, удельная капитальная стоимость установленной мощности OCC, интенсивность строительства, степень модульности и эффект обучения) до сих пор остается фрагментарным.

Целью настоящего исследования является выявление и аналитическая верификация ключевых управленческих и технологических факторов, определяющих эффективность реализации проектов АЭС в Российской Федерации и Китайской Народной Республике в период 2020-2025 гг. (с учетом данных по вводу в эксплуатацию в 2026 г.).

Для достижения поставленной цели был проведен структурированный сравнитель-

ный анализ завершенных и вводимых в эксплуатацию энергоблоков с использованием нормированных показателей: длительности строительства ( $T_{months}$ ), интенсивности строительства ( $T_{months}/MBt$ ), удельной капитальной стоимости (OCC, \$/кВт), а также качественных характеристик – степени серийности, модульности и зрелости цифровых инструментов проектирования.

В работе последовательно излагаются материалы и методы исследования, представлены результаты сравнительного анализа, обсуждены механизмы влияния международной практики и сформулированы практические рекомендации для отраслевых программ развития атомной энергетики.

### Материалы и методы

Методологической основой работы послужили данные открытых источников (IAEA PRIS, World Nuclear Association, отраслевые отчеты CNNC, CGN и Госкорпорации «Росатом»), подвергнутые перекрестной верификации и нормированию.

<sup>2</sup> IAEA – PRIS. Under construction reactors – by region. – Power Reactor Information System (PRIS). URL: <https://pris.iaea.org/PRIS/worldstatistics/UnderConstructionReactorsByRegion.aspx> (дата обращения: 27.05.2026).

Методология исследования основывается на комбинированном подходе, который объединяет формализованный сравнительный анализ, нормирование ключевых показателей эффективности строительных циклов и их интерпретацию в рамках современных теорий управления крупными инфраструктурными проектами. Такой подход позволяет количественно оценить влияние управленческих и технологических практик на результативность сооружения АЭС и выявить причинно-следственные связи между организационными моделями, стандартизацией и экономической эффективностью.

Анализ охватывает энергоблоки Российской Федерации и Китайской Народной Республики, введенные в коммерческую эксплуатацию в период 2020-2025 гг.

Критерии отбора объектов в основную выборку были определены заранее и включали:

- наличие подтвержденных дат начала строительных работ («first concrete») и первого подключения к энергосети («first grid») – критерий 1;
- известную проектную нетто-мощность – критерий 2;
- ориентировочные или официально заявленные данные по капитальным затратам (CAPEX) – критерий 3.

В итоговую количественную выборку были включены российские и китайские энергоблоки поколений II+/III+, реализованные в рамках различных технологических платформ и стадий серийности. В выборку вошли проекты с реакторами типа ВВЭР-1200, CPR-1000, Hualong One. Для оценки эффекта серийности и долгосрочной преемственности дополнительно были рассмотрены данные по первым блокам серий, запущенных в более ранний период (2008-2010 гг.), что позволило проследить динамику снижения сроков и затрат при переходе от FOAK-к NOAK-проектам.

Для нивелирования различий в мощности энергоблоков и календарных особенностях применялись три нормированных показателя эффективности:

1. Длительность строительства ( $T_{months}$ ) – период от даты «first concrete» до даты «first grid», выраженный в месяцах:

$$T_{months} = \frac{D_{first\_grid} - D_{first\_concrete}}{30,44},$$

где  $D_{first\_grid}$  и  $D_{first\_concrete}$  – даты первого подключения к сети и заливки первого бетона (в днях); 30,44 – среднее число дней в месяце ( $365,25/12$ ), использованное для межпроектной сопоставимости независимо от сезона начала работ.

2. Интенсивность строительства ( $T_{months}/MBt$ ) – нормированная длительность относительно проектной нетто-мощности:

$$\frac{T_{months}}{P_{net}},$$

где  $P_{net}$  – проектная нетто-мощность энергоблока в МВт. Показатель отражает организационную эффективность реализации проекта с учетом его масштаба.

3. Удельная капитальная стоимость (OCC, \$/кВт):

$$OCC = \frac{CAPEX}{P_{net} \times 1000},$$

где CAPEX – суммарные капитальные затраты в долларах США, а  $P_{net} \times 1000$  – установленная мощность в кВт.

Выбор именно этих метрик обусловлен их широким применением в исследованиях мегапроектов: длительность и интенсивность строительства выступают интегральными индикаторами организационной зрелости, а OCC – функцией стандартизации, серийности и качества координации поставок.

Источниками эмпирических данных послужили официальные ресурсы IAEA PRIS и World Nuclear Association (WNA), публикации World Nuclear News, годовые отчеты и технические документы операторов и поставщиков (ГК «Росатом», CNNC, CGN), а также рецензируемая литература компетентных в данной отрасли ученых (авторства Б.А. Спасского, А.В. Попова, И.Ю. Даляева [3], К.Н. Проскурякова [4], Л. Чжан [5], Г. Ли [6] и др.).

Исследование опирается на открытые источники, что накладывает определенные методологические ограничения. Во-первых, оценки капитальных затрат в КНР часто

публикуются в виде диапазонов или в национальной валюте без унифицированной методики учета вспомогательных расходов (что требует дополнительного учета диспаритета покупательной способности). Во-вторых, прямое сопоставление удельной капитальной стоимости (ОСС) в долларах США носит оценочный характер. Ввиду закрытости части коммерческих данных показатели CAPEX приводятся в виде номинальных диапазонов. Настоящее сравнение не учитывает диспаритет паритета покупательной способности между внутренними рынками РФ и КНР, в связи с чем результаты отражают номинальные долларové затраты, а не абсолютную экономическую эффективность. В-третьих, критерии фиксации «даты ввода» в разных источниках могут различаться (строительная готовность, физический пуск, первое подключение к сети). Для устранения этой неоднозначности во всех межпроектных сравнениях применялась унифицированная пара показателей «first concrete → first grid». Тем не менее, полученные

результаты носят оценочный характер и могут быть уточнены при доступе к закрытым отраслевым данным.

Таким образом, выбранная методология позволяет перейти от описательного обзора к количественной верификации влияния международных практик на управленческие и технологические аспекты сооружения АЭС.

### Результаты

По состоянию на май 2026 г. в базе данных IAEA PRIS зарегистрировано 72 энергоблока в стадии строительства суммарной нетто-мощностью 75 474 МВт. Географическая структура сохраняет ярко выраженный акцент на долю Китая и России (рис. 2). Государственные корпорации КНР (CNNC, CGN, SPIC) ведут строительство 35 энергоблоков внутри страны, в то время как Госкорпорация «Росатом» реализует более 25 проектов как на территории РФ, так и за рубежом.



**Рисунок 2.** Долевое распределение строящихся энергоблоков АЭС по странам, май 2026 г. [Составлено авторами по материалам открытых источников<sup>3</sup>]

**Figure 2.** Distribution of nuclear power plant units under construction around the countries, May 2026. [Compiled by the authors based on open-source materials<sup>3</sup>]

<sup>3</sup> IAEA – PRIS. Under Construction Reactors by Country. Power Reactor Information System (PRIS). URL: <https://pris.iaea.org/pris/worldstatistics/underconstructionreactorsbycountry.aspx> (дата обращения: 27.05.2026).

Российская атомная программа включает как завершение внутренних проектов поколения III+, так и реализацию экспортных проектов. В период 2020-2025 гг. введены в эксплуатацию энергоблоки Ленинградской АЭС-2 (ВВЭР-1200) и Нововоронежской АЭС-2. Продолжается строительство Курской АЭС-2 (ВВЭР-ТОИ) – первый энергоблок достиг полной мощности в марте 2026 г.; коммерческий ввод ожидается позднее в 2026 году.

В российской атомной отрасли последовательно развивается направление реакторов на натриевом теплоносителе. Опыт эксплуатации энергоблока БН-600 на Белоярской АЭС подтверждает работоспособность натриевых теплоносителей и служит экспериментальной базой для разработки систем управления и безопасности реакторов нового поколения<sup>4</sup>. Опыт эксплуатации энергоблоков БН-600 стал основой для проектных решений при создании энергоблоков следующего поколения: БН-800 и БН-1200, тем самым обеспечивая преемственность технологического прогресса<sup>5</sup>.

За рубежом ГК «Росатом» реализует проекты с реакторами типа ВВЭР-1200: 4 энергоблока на АЭС «Аккую» в Турции<sup>6</sup>; 2 энергоблока на АЭС «Руппур» в Бангладеш<sup>7</sup>; 2 энергоблока на Белорусской АЭС<sup>8</sup>.

Также Россия имеет совместные проекты с Китаем: АЭС «Тяньвань» (4 энергоблока типа ВВЭР-1000 и 2 энергоблока типа

ВВЭР-1200) и АЭС «Сюйдапу» (2 энергоблока типа ВВЭР-1200)<sup>9</sup>.

В настоящее время российская атомная отрасль расширяет портфель международных проектов, планируя запуск энергоблоков совместно с Венгрией. Инжиниринговый дивизион ГК «Росатом» является генеральным проектировщиком и подрядчиком АЭС «Пакш-2», на которой планируется возведение 2-х энергоблоков типа ВВЭР<sup>10</sup>. Это первый российский проект на территории Европейского союза.

Помимо реализации проектов в Турции, Египте, Бангладеш, Венгрии, Индии и Китае, международным дивизионом «Росатома» обсуждаются или заключены предварительные соглашения о строительстве энергоблоков в следующих странах: Бразилия, Вьетнам, Киргизия, Лаос, Монголия, Мьянма, Нигерия, Саудовская Аравия, Шри-Ланка.

Российская экспортная модель предусматривает комплексные решения, включая поставку топлива и управление полным топливным циклом. Данная стратегия минимизирует операционные риски для заказчиков, что, в свою очередь, актуализирует задачу постоянной оптимизации технологических процессов на всех этапах обращения с ядерным топливом

При сооружении российских АЭС применяются методы, направленные на сокращение сроков, например, технология «open-top» на ЛАЭС-2. В 2025 году на энергоблоке № 4 ряд операций был выполнен с опережением графика, что свидетельствует об эффективности принятых организационных решений на данном этапе<sup>11</sup>.

Помимо этого, российская стратегия развития атомной энергетики включает иннова-

<sup>4</sup> Rosatom Newsletter. BN-600: 45 years of fast reactor excellence (Юбилей БН-600). Rosatom Newsletter, 28.04.2025. URL: <https://rosatomnewsletter.com/ru/2025/04/28/bn-600-45-years-of-fast-reactor-excellence/> (дата обращения: 13.03.2026).

<sup>5</sup> Страна Росатом. Самый опытный среди быстрых – БН-600. Strana-Rosatom, 21.04.2025. URL: <https://strana-rosatom.ru/2025/04/21/samyj-opytnyj-sredi-bystryh-bn-600-goto/> (дата обращения: 13.03.2026).

<sup>6</sup> Akkuyu Nuclear (Rosatom). Информация о проекте АЭС Аккую. URL: <https://akkuyu.com/ru/about/info> (дата обращения: 12.03.2026).

<sup>7</sup> AtomMedia. АЭС Руппур (Бангладеш). AtomMedia Online, 04.10.2023. URL: <https://atommedia.online/reference/aes-ruppur-bangladesh/> (дата обращения: 14.10.2025).

<sup>8</sup> AtomMedia. Белорусская АЭС. AtomMedia Online. URL: <https://atommedia.online/reference/beloruskaya-aes/> (дата обращения: 14.03.2026).

<sup>9</sup> Атомвестник. Тяньваньская АЭС и АЭС Сюйдапу. Atomvestnik.ru. URL: <https://atomvestnik.ru/2023/05/30/tian-vanskaja-ajes-i-ajes-sjuidapu/> (дата обращения: 14.03.2026).

<sup>10</sup> Венгрия ожидает старта строительства АЭС «Пакш-2» не позднее начала февраля. Интерфакс, 15.10.2025. URL: <https://www.interfax.ru/world/1052718> (дата обращения: 16.10.2025).

<sup>11</sup> На четвертом энергоблоке Ленинградской АЭС-2 залили первый бетон. Strana-Rosatom, 20.03.2025. URL: <https://strana-rosatom.ru/2025/03/20/na-chetvertom-energoblok-e-leningrads/> (дата обращения: 12.10.2025).

ционный проект «Прорыв»<sup>12</sup>, в основе которого лежит создание опытно-демонстрационного энергокомплекса IV поколения (ОДЭК). Энергокомплекс включает в себя энергоблок с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300. Реализация проекта направлена на уменьшение рисков и имеет целевые технические решения, направленные на повышение безопасности; однако полная оценка эффективности будет возможна после продолжительной эксплуатации.

За последнее десятилетие в Китайской Народной Республике зафиксирована устойчивая тенденция к интенсификации развития атомно-энергетического комплекса. После аварии на японской АЭС «Фукусима-1» (2011 г.), наблюдается переход от реакторных установок поколения II+ (CPR-1000) к серийному строительству блоков поколения III (Hualong One).

В 2020-2025 гг. введены в эксплуатацию первые серийные энергоблоки Hualong One: энергоблок «Фуцин-5» был впервые подключен к сети 27 ноября 2020 года, «Чжанчжоу-1» – 28 ноября 2024 года, а «Чжанчжоу-2» – 22 ноября 2025 года. Широкое применение технологий крупномодульной сборки позволило сократить монтаж корпуса реактора на 70 дней и существенно снизить зависимость от внешних факторов<sup>13</sup>.

Согласно отчету China Nuclear Energy Association (CNEA)<sup>14</sup>, по результатам 2024 г. китайская промышленность достигла производственной мощности порядка 10 комплектов основного оборудования в год (главные парогенераторы, корпуса реакторов и др.), а общий объем поставок составил 114 комплектов<sup>15</sup>.

Одновременно ведется строительство пилотных блоков поколения IV – газоохладяемых высокотемпературных реакторов (HTGR) CFR-600 на АЭС «Сяпу» (начало строительства 2021-2022 гг.) и малых модульных реакторов (ACP100, Linglong One).

По данным World Nuclear Association, к концу 2025 года установленная мощность действующих блоков в Китае достигла примерно 62 ГВт(э), а еще 43 ГВт(э) находились в стадии строительства; в марте 2026 года был утвержден 15-й пятилетний план, предусматривающий достижение 110 ГВт(э) к 2030 году<sup>16</sup>.

На рисунке 3 представлен сравнительный анализ институционально-технологических моделей проектирования и строительства АЭС в Российской Федерации и Китайской Народной Республике, отражающий различия в организационных подходах, уровне стандартизации, серийности, цифровой трансформации и структуре управления проектами.

В таблице 1 [составлено авторами по материалам открытых источников<sup>17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29</sup>] приведены нормиро-

<sup>16</sup> World Nuclear News. Podcast: China's plans for new nuclear capacity. World Nuclear News. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/podcast-chinas-plans-for-new-nuclear-capacity> (дата обращения: 23.04.2026).

<sup>17</sup> World Nuclear Association. Novovoronezh 2-1. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/novovoronezh-2-1> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>18</sup> World Nuclear Association. Novovoronezh 2-2. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/novovoronezh-2-2> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>19</sup> World Nuclear Association. Leningrad 2-1. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/leningrad-2-1> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>20</sup> World Nuclear Association. Leningrad 2-2. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/leningrad-2-2> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>21</sup> World Nuclear Association. Fuqing 1. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/fuqing-1> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>22</sup> World Nuclear Association. Fuqing 5. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/fuqing-5> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>23</sup> World Nuclear Association. Fuqing 6. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/fuqing-6> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>24</sup> World Nuclear Association. Zhangzhou 1. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/zhangzhou-1> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>25</sup> World Nuclear Association. Zhangzhou 2. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/zhangzhou-2> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>12</sup> Проект «Прорыв». ПрорывРосатом. Proryv2020. URL: <https://proryv2020.ru/> (дата обращения: 15.03.2026).

<sup>13</sup> IAEA. Successful Techniques to Cut Nuclear Construction Times Showcased at IAEA General Conference. URL: <https://www.iaea.org/ru/node/127913> (дата обращения: 01.07.2026).

<sup>14</sup> China Nuclear Energy Association (CNEA). China Nuclear Energy Development Report 2025. URL: <https://www.globaltimes.cn/page/202504/1332989.shtml> (дата обращения: 25.03.2026).

<sup>15</sup> 中評社. 我國核電總體規模首次躍居世界第一. – 中國評論通訊社. URL: <https://hk.cmtt.com/doc/1070/6/8/3/107068370.html> (дата обращения: 01.07.2026).

ванные показатели по референтным энергоблокам, отобранным в соответствии с критериями, изложенными в разделе «Материалы и методы». Для российских проектов использованы данные первых серий (ФОАК/NOAK), что позволяет проследить динамику обучения; китайские блоки представляют уже серийную стадию реализации.

Представленные данные свидетельствуют о более низких значениях  $T_{months}$ ,  $T_{months}/\text{МВт}$  и ОСС у выбранных китайских блоков в пределах использованной выборки; однако вследствие ограниченного числа сопоставляемых проектов корректнее говорить не о статистически доказанном превосходстве, а о выявленной тенденции. Длительность строительства энергоблоков Hualong One составляет 61-87 месяцев (0,055-0,080 мес/МВт), тогда как российские проекты ВВЭР-1200 находятся в диапазоне 84-126 месяцев (0,067-0,115 мес/МВт). Переход от технологии CPR-1000 (среднее ~60-70 месяцев) к Hualong One показывает дальнейшее улучшение показателей благодаря высокой серийности и модульности.

Сходная тенденция наблюдается и по удельной капитальной стоимости. Для китайских проектов диапазон преимущественно находится в пределах 1860-3110 \$/кВт, тогда как для российских проектов – 2360-4500 \$/кВт.

Результаты количественного и качественного анализа подтверждают, что институциональные и организационные факторы (серийность, модульность, вертикальная интеграция) оказывают определяющее влияние

на ключевые показатели эффективности сооружения АЭС и формируют основу для дальнейшего международного сотрудничества.

### Обсуждение

Международная практика, накопленная РФ и КНР, оказывает существенное влияние на управленческие и технологические аспекты проектирования и строительства АЭС.

Это влияние реализуется через конкретные механизмы, действующие на трех взаимосвязанных уровнях.

Во-первых, на технологическом уровне международный опыт способствует переходу от индивидуального проектирования к стандартизированным и модульным решениям. Китайская практика реализации Hualong One демонстрирует высокий уровень заводской готовности оборудования, широкое применение модульной сборки и снижение объема полевых монтажных операций, что способствует повышению предсказуемости сроков и устойчивости графика строительства. Российская практика, в свою очередь, активно использует преемственность технологических платформ ВВЭР, что обеспечивает ускорение последующих проектов.

Во-вторых, на управленческом уровне влияние проявляется в создании эффективных институциональных механизмов. Китайская модель опирается на централизованное государственное планирование и вертикальную интеграцию цепочек поставок, что позволяет быстро масштабировать производство, применяя эффект обучения. Российская модель ориентирована на управление сложными экспортными проектами «под ключ», включая полный топливный цикл и долгосрочное сервисное сопровождение, что требует высокого уровня координации между исполнителями и заказчиком.

В-третьих, цифровая трансформация выступает связующим механизмом между технологическими и управленческими практиками. Внедрение BIM, цифровых двойников и интегрированных PLM/ERP-систем в обеих странах позволяет значительно снижать количество проектных рисков и повышать точность прогнозирования сроков и стоимости выполняемых работ.

<sup>26</sup> World Nuclear Association. Fangchenggang 3. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/details/fangchenggang-3> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>27</sup> World Nuclear News. World's first Hualong One unit connects to grid. URL: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/World-first-Hualong-One-unit-connects-to-grid> (дата обращения: 27.03.2026).

<sup>28</sup> GreenPrizm (для Anthropocene Institute). Summary of 2023 Report on Chinese Nuclear Power Generation and Costs Analysis. URL: <https://anthropoceneinstitute.com/wp-content/uploads/2024/07/2023-Summary-of-Report-on-Chinese-Nuclear-Power-Generation-and-Costs-Analysis-20240424Final.pdf> (дата обращения: 03.07.2026).

<sup>29</sup> World Nuclear Association. Economics of Nuclear Power. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power> (дата обращения: 03.07.2026).



**Рисунок 3.** Сравнение институционально-технологических моделей сооружения АЭС в Российской Федерации и Китайской Народной Республике. [Составлено авторами]

**Figure 3.** Comparison of institutional and technological models of nuclear power plant construction in the Russian Federation and the People's Republic of China. [Compiled by the authors]

**Таблица 1.** Сопоставительные характеристики реализации проектов АЭС в России и Китае по ключевым метрикам [Составлено авторами по материалам открытых источников, см. постраничные сноски 17-29]

**Table 1.** Comparative characteristics of NPP project implementation in Russia and China by key metrics [Compiled by the authors based on open-source materials 24-36]

| Проект                                | Страна | Net, MWt | First concrete | First grid | T <sub>m</sub> onths | T <sub>mont</sub> hs/MWt | CAPEX, млрд \$ | OCC, \$/кВт |
|---------------------------------------|--------|----------|----------------|------------|----------------------|--------------------------|----------------|-------------|
| Нововоронеж-2 ЭБ-1 (ВВЭР-1200 (III+)) | РФ     | 1114     | 24.06.2008     | 05.08.2016 | 97,4                 | 0,08743                  | 3,4-4,35       | 3050-3900   |
| Нововоронеж-2 ЭБ-2 (ВВЭР-1200 (III+)) | РФ     | 1114     | 12.07.2009     | 01.05.2019 | 117,63               | 0,10562                  | 3,4- 4,35      | 3050-3900   |
| ЛАЭС-2 ЭБ-1 (ВВЭР-1200 (III+))        | РФ     | 1101     | 25.10.2008     | 09.03.2018 | 111,73               | 0,10148                  | 2,6-3,0        | 2360-2725   |
| ЛАЭС-2 ЭБ-2 (ВВЭР-1200 (III+))        | РФ     | 1101     | 15.04.2010     | 22.10.2020 | 126,25               | 0,11468                  | 2,6-3,0        | 2360-2725   |
| Лин Ао-3 (CPR-1000 (II+))             | КНР    | 1020     | 15.12.2005     | 15.07.2010 | 55,70                | 0,0546                   | ~1,53          | ~1500       |
| Фанцзяшань-1 (CPR-1000 (II+))         | КНР    | 1080     | 26.12.2008     | 04.11.2014 | 71,30                | 0,0660                   | ~1,90          | ~1760       |
| Фуцин-5 (Hualong One (III+))          | КНР    | 1075     | 07.05.2015     | 27.11.2020 | 66,76                | 0,06211                  | 2,0-2,8        | 1860-2605   |
| Фуцин-6 (Hualong One (III+))          | КНР    | 1075     | 16.12.2015     | 11.01.2021 | 61,2                 | 0,0569                   | 2,0-2,6        | 1860-2420   |
| Чжанчжоу-1 (Hualong One (III+))       | КНР    | 1126     | 16.10.2019     | 28.11.2024 | 61,45                | 0,05458                  | 2,6-3,5        | 2310-3110   |
| Фанчэнган-3 (Hualong One (III+))      | КНР    | 1080     | 24.12.2015     | 03.03.2023 | 86,7                 | 0,0803                   | 2,4-3,2        | 2220-2960   |

Таким образом, международная практика РФ и КНР трансформирует не отдельные процессы, а всю систему организации атомной промышленности, переводя ее от проектно-ориентированного подхода к системному, серийному и управляемому на основе данных. Именно этот системный подход объясняет наблюдаемые различия в нормированных показателях эффективности (табл. 1 и 2).

Центральным механизмом повышения эффективности выступает эффект серийности, который количественно описывается законом обучения. При удвоении кумулятивного объема производства удельная капитальная стоимость  $C$  изменяется по экспоненциальной зависимости:

$$C(Q) = C_1 \cdot Q^b, \quad b = -\frac{\log(LR)}{\log(2)},$$

где  $C_1$  – стоимость первого энергоблока,  $Q$  – кумулятивное число однотипных энергоблоков,  $b$  – показатель обучения,  $LR$  – коэффициент обучения.

Для начальной стоимости 3000 \$/кВт и типичных значений  $LR = 7\%$ ,  $10\%$  и  $12\%$  расчетные значения OCC приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Расчетные значения OCC (\$/кВт) для последовательных удвоений объема серийного строительства Hualong One [Составлено авторами]

**Table 2.** Calculated values of OCC (\$/kW) for successive doublings of the serial construction volume of Hualong One [Compiled by the authors]

| Кумулятивное<br>число одно-<br>типных блоков | LR = 7%<br>(b = -0,1043) | LR = 10%<br>(b = -0,1520) | LR = 12%<br>(b = -0,1844) |
|----------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1                                            | 3000,0                   | 3000,0                    | 3000,0                    |
| 2                                            | 2790,0                   | 2700,0                    | 2640,0                    |
| 4                                            | 2590,5                   | 2430,0                    | 2319,0                    |
| 8                                            | 2400,2                   | 2187,0                    | 2047,0                    |
| 16                                           | 2221,5                   | 1968,3                    | 1812,0                    |

Эмпирические данные таблицы 2 согласуются с моделью эффекта обучения: OCC китайских блоков (включая Фуцин-5, Фуцин-6, Чжанчжоу-1 и поздние серийные) в диапазоне 1860-3110 \$/кВт соответствует  $LR \approx 9-11\%$  при кумулятивном объеме около 12-16 блоков. В российских проектах ВВЭР-1200 эффект обучения на начальных этапах реализации ослабляется влиянием внешних факторов (включая адаптацию проектов под новые требования безопасности и особенности

финансирования), что отражается в вариативности удельной длительности от первых блоков FOAK (Нововоронежская АЭС-2 ЭБ-1,  $T_{\text{months}}/\text{MBt} = 0,087$ ) к последующим NOAK (ЛАЭС-2 ЭБ-2,  $T_{\text{months}}/\text{MBt} = 0,115$ ). Тем не менее, заложенный технологический потенциал серийности предполагает сокращение удельных сроков на 15-20% в будущих сериях. Таким образом, серийность выступает универсальным драйвером сокращения как сроков строительства, так и удельной капитальной стоимости.

Результаты исследования подтверждают, что ключевыми механизмами сооружения АЭС являются серийность (обеспечивающая эффект обучения), модульность (сокращающая сроки строительства) и цифровая трансформация (повышающая предсказуемость реализации). Выявленные закономерности позволяют не только объяснить различия между национальными моделями РФ и КНР, но и предложить количественно обоснованные ориентиры для прогнозирования эффективности будущих проектов, что особенно важно для формирования экспортно-инжиниринговых стратегий Российской Федерации и международного сотрудничества.

## Заключение

Международная практика, накопленная Российской Федерацией и Китайской Народной Республикой, оказывает определяющее влияние на управленческие и технологические аспекты проектирования и строительства АЭС. Это влияние носит системный характер и реализуется через механизмы стандартизации, серийности, модульности и вертикальной интеграции, подкрепленные централизованными управленческими решениями.

Результаты сравнительного анализа (табл. 1 и 2) показали, что именно сочетание данных механизмов позволяет существенно сокращать сроки и стоимость сооружения энергоблоков. Российская модель сохраняет преимущества в комплексных экспортных проектах и технологической преемственности. В пределах рассмотренной выборки китайская модель демонстрирует более высокую скорость сооружения и более низкую

удельную капитальную стоимость, что в значительной степени связано с масштабом серийного строительства, высокой локализацией производства и стандартизацией проектных решений.

На основе результатов проведенного анализа сформулированы практические рекомендации, направленные на адаптацию управленческих моделей государственной политики Российской Федерации в области атомной энергетики с целью повышения эффективности сооружения АЭС в соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации до 2035 года.

Данные рекомендации согласуются с положениями Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года (распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р), Государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» (постановление Правительства РФ от 02.06.2014 № 506-12 с изменениями) и Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года. В частности, предлагается:

- последовательное развитие серийного строительства типовых энергоблоков как основы для реализации эффекта обучения и снижения удельной стоимости;

- расширение применения модульных технологий и цифровых инструментов (BIM, цифровые двойники, интегрированные PLM/ERP-системы) на всех этапах жизненного цикла проекта;

- укрепление вертикальной интеграции производственно-логистических цепочек

и механизмов централизованного управления проектами;

- развитие взаимовыгодного сотрудничества с китайскими партнерами в области локализации и стандартизации при сохранении российских конкурентных преимуществ в экспортных проектах полного цикла и технологиях быстрых реакторов.

Реализация предложенных мер позволит не только повысить эффективность реализации проектов сооружения АЭС внутри страны, но и повысить конкурентоспособность российских проектов на международном рынке атомных технологий. В долгосрочной перспективе накопленный в ходе серийного строительства энергоблоков поколения III+ опыт создаст необходимую технологическую и организационную основу для перехода к опытно-промышленному освоению реакторов поколения IV и малых модульных реакторов.

Таким образом, международная практика Российской Федерации и Китайской Народной Республики демонстрирует, что в условиях высокой капиталоемкости и технологической сложности проектов существенное значение приобретают не только характеристики реакторных установок, но и эффективность управленческих, организационных и производственно-логистических механизмов. Именно сочетание серийности, модульности, цифровой трансформации и централизованной координации позволяет ведущим ядерным державам задавать новые ориентиры устойчивого развития атомной энергетики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cheng H., Ye X., Liu X., Zhang H., Zheng G., Yang B., Wang T., Ma T., Shi Q., Xiong W. Overview of analysis and evaluation models for China's nuclear energy development. *Energy Strategy Reviews*. 2025;60:101789. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101789>
  2. Farag Y.S., Wimmers A. Nuclear Diplomacy: Analyzing Russian Foreign New Build Projects. In: Wimmers A., Böse F., Kemfert C., von Hirschhausen C. Nuclear Power. Studies in Energy, Resource and Environmental Economics. Springer, Cham, 2026:233-263. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2_9)
  3. Спасский Б.А., Попов А.В., Даляев И.Ю. К вопросам применения робототехнических комплексов на объектах использования атомной энергии. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2021;9(4):245-251. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47422023&ysclid=mruejko0s7744883640> (дата обращения 21.06.2026).
- Spassky B.A., Popov A.V., Dalyaev I.Yu. On the application of robotic systems at nuclear power plants. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2021;9(4):245-251. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47422023&ysclid=mruejko0s7744883640> (accessed: 21.06.2026).

4. Проскуряков К.Н., Хвостова М.С. Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):36-39. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

Proskuryakov K.N., Khvostova M.S. Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with VVER-1200. *Nuclear safety*. 2024;14(1):36-39. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

5. Zhan L., Zhang H., Liu W., Chen Y., Wang H. Development and outlook of advanced nuclear energy technology. *Energy Strategy Reviews*. 2021;34:100630. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100630>

6. Li G., Wang J., Hu Z. Study on improving the economic efficiency of nuclear power engineering in China: taking Hualong One as an example. *Construction Economy*. 2025;46(6):90 (in Chin.). <https://doi.org/10.14181/j.cnki.1002-851x.202506090>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Щёголева Д.А.** – разработка концепции исследования, методологическое обоснование, сбор и систематизация эмпирических данных, расчет нормированных показателей эффективности, анализ эффекта обучения и серийности, интерпретация результатов, формулировка выводов, подготовка первоначальной версии рукописи, подготовка таблиц и иллюстраций;

**Фёдоров К.Ф.** – верификация и перекрестная проверка эмпирических данных по российским и китайским проектам, технический анализ институциональных моделей управления проектами, оценка влияния организационных факторов на показатели эффективности, доработка методологического аппарата, редактирование и подготовка окончательной версии рукописи, оформление списка литературы.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при выполнении данного исследования.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Дарья Алексеевна Щёголева**, кафедра электромеханики и робототехники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-1017-8435>

e-mail: shchegoleva.da@yandex.ru

**Константин Фёдорович Фёдоров**, инженер, Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-8835-0245>

e-mail: k.fedorov@rtc.ru

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Shchegoleva D.A.** – development of the research concept, methodological substantiation, collection and systematization of empirical data, calculation of normalized performance indicators, analysis of the learning effect and seriality, interpretation of the results, formulation of conclusions, preparation of the initial version of the manuscript, preparation of tables and illustrations;

**Fedorov K.F.** – verification and cross-checking of empirical data on Russian and Chinese projects, technical analysis of institutional project management models, assessment of the impact of organizational factors on performance indicators, refinement of the methodological framework, editing and preparation of the final version of the manuscript, and formatting of the list of references.

#### FUNDING:

The authors declare no external funding.

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Daria A. Shchegoleva**, Department of Electromechanics and Robotics, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation», Saint Petersburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-1017-8435>

e-mail: shchegoleva.da@yandex.ru

**Konstantin F. Fedorov**, Engineer, Federal State Autonomous Scientific Institution «Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics», Saint Petersburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-8835-0245>

e-mail: k.fedorov@rtc.ru

Поступила в редакцию / Received 24.10.2025

После доработки / Revision 31.07.2026

Принята к публикации / Accepted 04.08.2026