

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

УДК 621.039:621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

EDN EEWNWU

Оригинальная статья / Original paper



Участие архитектора-инженера в жизненном цикле атомной станции:
инструментарий, возможности, перспективы

О.В. Колтун , С.О. Иванов , Д.В. Якубов

АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация

SOIvanov@vniiaes.ru

Аннотация. Сложившаяся практика принятия решения о сооружении новой атомной станции происходит после утверждения технико-экономических требований к ней с учетом необходимости их обеспечения в процессе сооружения. Не секрет, что практически для всех проектов атомных станций наиболее важные показатели технико-экономических требований, такие как капитальные затраты и срок строительства, в настоящее время не соблюдаются. Как правило, это свидетельствует о недостаточно хорошей проработке проекта, несовершенстве сметной документации, управленческих проблемах в ходе строительства. Отличительной особенностью сооружения атомных станций в Российской Федерации является то, что эксплуатирующая организация является одновременно и заказчиком проекта, принимая участие в обеспечении всех этапов жизненного цикла атомной станции и неся ответственность за достижение технико-экономических требований проекта. В этой связи актуальной задачей является осуществление экспертной поддержки заказчика проекта со стороны экспертной организации, способной осуществлять независимую оценку качества проекта и хода его реализации. На основе положительного опыта обозначена необходимость сопровождения деятельности технического заказчика экспертной организацией – архитектором-инженером. Учитывая мировую практику проектирования, строительства и эксплуатации инженерно-сложных и капиталоемких проектов, со стороны архитектора-инженера необходимо аргументированно подтвердить ряд оптимизационных мероприятий на основе применения современных методов (управление требованиями, применение технико-экономических и математических моделей, разработка и применения цифровых моделей и цифровых двойников атомных станций). Обоснована необходимость применения экспертизы решений при управлении и контроле качества проектирования и сооружения атомных станций с помощью технико-экономической модели и цифровых двойников для новых проектов атомных станций на всех этапах их жизненного цикла.

Ключевые слова: сооружение атомных станций, конкурентные преимущества, управление проектом, архитектор-инженер, технико-экономическая модель, цифровой двойник, жизненный цикл, риск, безопасность.

Для цитирования: Колтун О.В., Иванов С.О., Якубов Д.В. Участие архитектора-инженера в жизненном цикле атомной станции: инструментарий, возможности, перспективы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):35–41. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

For citation: Koltun O.V., Ivanov S.O., Yakubov D.V. Architect-engineer participation in the life cycle of nuclear power plant: tools, opportunities and prospects. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

Architect-engineer participation in the life cycle of nuclear power plant: tools, opportunities and prospects

Oleg V. Koltun , Sergei O. Ivanov  , Denis V. Yakubov 

JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation

 SOIvanov@vniiaes.ru

Abstract. The established practice of making a decision on the construction of a new nuclear power plant occurs after the approval of the technical and economic requirements for it, taking into account the need to ensure them during the construction process. It is no secret that the most important indicators of technical and economic requirements, such as capital costs and construction time, are currently not kept for almost all nuclear power plant projects. As a rule, this indicates an insufficiently good elaboration of the project, imperfection of the estimate documentation, and management problems during construction. A distinctive feature of the construction of nuclear power plants in the Russian Federation is that the operating organisation is at the same time the customer of the project, taking part in ensuring all stages of the life cycle of the nuclear power plant, and bearing responsibility for achieving the technical and economic requirements of the project. In this regard, an urgent task is to provide expert support to the project customer from an expert organisation capable of independently assessing the quality of the project and the progress of its implementation. The necessity of support of the technical customer's activity by an expert organisation - architect-engineer is outlined on the basis of positive experience. Taking into account the world practice of designing, building and operating engineering-complex and capital-intensive projects, it is necessary for the architect-engineer to substantiate a number of optimisation measures based on the use of modern methods (requirements management, application of technical, economic and mathematical models, development and application of digital models and digital twins of nuclear power plants). The necessity of using decision expertise in managing and quality control of nuclear power plant design and construction is substantiated using a technical and economic model and digital twins for new nuclear power plant projects at all stages of their life cycle.

Keywords: nuclear power plant construction, competitive advantages, project management, architect-engineer, technical and economic model, digital twin, life cycle, risk, safety.

Введение

В соответствии с поручением Президента РФ для атомной отрасли была поставлена задача по доведению уровня выработки электроэнергии на атомных станциях (АС) к 2045 г. до 25% от общей выработки электроэнергии по стране. Это амбициозная задача для отрасли, учитывая, что к 2045 г. заканчиваются продленные сроки эксплуатации АС, сооруженных в 70–80-х годах прошлого века. Установленный показатель планируется достигнуть в основном за счет сооружения новых АС, так как повышение выработки электроэнергии на действующих АС подошло к своему пределу. Учитывая выводимые из эксплуатации энергоблоки, к 2045 г. нужно ввести в эксплуатацию порядка 48 энергоблоков АС (большой, средней и

малой мощности) суммарной установленной мощностью порядка 32,4 ГВт¹.

Сложившаяся практика принятия решения о сооружении новой АС происходит после утверждения технико-экономических требований (ТЭТ) к ней с учетом необходимости их обеспечения в процессе сооружения. Не секрет, что практически для всех проектов АС наиболее важные показатели ТЭТ, такие как капитальные затраты и срок строительства, в настоящее время не соблюдаются. Как правило, это свидетельствует о недостаточно хорошей проработке проекта, несовершенстве сметной документации, управленческих проблемах в ходе строительства.

¹ Строящиеся АЭС. – Госкорпорация Росатом : официальный сайт. – Режим доступа: <https://rosatom.ru/production/design/stoyashchiesya-aes/> (дата обращения: 25.05.2024).

Отличительной особенностью сооружения АС в РФ является то, что эксплуатирующая организация (Концерн Росэнергоатом) является одновременно и заказчиком проекта, принимая участие в обеспечении всех этапов жизненного цикла АС, и неся ответственность за достижение ТЭТ проекта.

В этой связи, актуальной задачей является осуществление экспертной поддержки заказчика проекта со стороны экспертной организации, способной осуществлять независимую оценку качества проекта и хода его реализации.

Архитектор-инженер

В мировой практике такое сопровождение наиболее технически сложных проектов, к числу которых относятся и АС, связанное с контролем качества проектирования и сооружения, как правило, выполняют технические инжиниринговые компании (Инженер инвестора, Инженер владельца, Технический агент и др.) [1]. В РФ в атомной отрасли такая организация получила название Архитектор-инженер (АИ).

Целью деятельности АИ является осуществление непрерывного контроля и экспертиза хода реализации проекта на всех этапах от подготовки концепции до анализа качества реализации и полноты обоснований. Важным моментом работы АИ является выявление коллизий, допущенных в ходе реализации проекта и оперативное внесение изменений в рабочую документацию с целью недопущения тиражирования ошибок в последующих проектах.

Другим направлением изучения АИ должно стать отслеживание хода эксплуатации объекта с целью выявления неудачных технических решений и их учет в последующих модернизациях проекта. На всех этапах работы АИ должен оказывать оптимизационные воздействия на процессы, ставить своей целью поиск оптимальных решений, в том числе на ранних стадиях разработки проекта, прогнозирование эффективности проекта, его конкурентоспособности.

С учетом принятых в мире передовых практик проектного управления Госкорпорацией «Росатом» в 2010 г. в рамках реализации проекта ВВЭР функцию АИ было по-

ручено реализовывать АО «ВНИИАЭС», для чего было создано специализированное подразделение. В рамках проекта ВВЭР-ТОИ АИ выполнил ряд работ, в том числе:

- проведены экспертизы технических заданий (ТЗ), достижимости ТЭТ и Концепт проекта ВВЭР-ТОИ, сформулировано более 500 предложений по улучшению проекта;

- проведен подробный анализ всех конкурирующих с ВВЭР-ТОИ зарубежных проектов АЭС. С учетом этого анализа была проведена работа по оценке конкурентоспособности проекта ВВЭР-ТОИ и сформулированы области, которые необходимо совершенствовать;

- создана экономическая модель, позволявшая оценивать капитальные затраты и фактическую себестоимость электроэнергии ВВЭР-ТОИ, а также влияние различных технических решений на эти параметры, что позволило оперативно определять их экономическую эффективность;

- создана современная компьютерная система управления требованиями, позволявшая контролировать выполнение требований ТЗ в процессе проектирования АЭС с ВВЭР-ТОИ. С использованием этой системы выполнен анализ реализации всех требований ТЗ на ВВЭР-ТОИ;

- реализована компьютерная связь АИ с проектными организациями, позволившая в режиме on-line анализировать ход проектирования и создать математические модели всех подсистем АС с ВВЭР-ТОИ;

- созданы математические модели АС, которые использовались для оценки соответствия проекта ВВЭР-ТОИ требованиям, заложенным в ТЗ в различных режимах работы АЭС. В ходе такой проверки были выявлены недостатки проекта ВВЭР-ТОИ и сформулированы предложения по их устранению.

Выполнение данных работ способствовало повышению качества проекта ВВЭР-ТОИ в целом. Внедрение результатов работ АИ, базирующихся на результатах технико-экономических исследований, анализе мирового опыта проектирования, накопленном опыте эксплуатации АС частично оказало положительное влияние на технико-

экономические характеристики и конкурентоспособность проекта. Вместе с тем, в связи с несовершенством управленческих решений и особенностями договорных отношений, отсутствием нормативно-правовых актов, в части описания роли АИ в проекте, предложения АИ по улучшению проекта носили лишь рекомендательный характер.

При осуществлении функций АИ в проекте ВВЭР-ТОИ, также сформулирован запрос о необходимости пересмотра существующих подходов к разработке и утверждению ТЭТ, в том числе в части проведения предварительного технико-экономического анализа достижимости требований, предъявляемых к будущему проекту.

Одновременно учитывая мировую практику проектирования, строительства и эксплуатации инженерно-сложных и капиталоемких проектов, был сформирован запрос на необходимость аргументированного подтверждения со стороны АИ ряда оптимизационных мероприятий на основе применения современных методов (управление требованиями, применение технико-экономических и математических моделей, разработка и применения цифровых моделей и цифровых двойников АС). Примеры применения некоторых из них представлены ниже.

Технико-экономическая модель (ТЭМ)

Основываясь на выполняемых АО «ВНИИАЭС» задачах по экспертизе проектов ВВЭР-ТОИ, БН-1200, ВВЭР-С-600, РИТМ-200, были сформулированы следующие требования к концепции и методике ТЭМ:

- проведение многовариантных оценок проектов АС и ядерных энергетических систем (ЯЭС) в открытом и замкнутом топливных циклах по интегральным показателям экономической эффективности, а также оценка частных технико-экономических показателей проектных решений по стадиям жизненного цикла;

- прогнозирование экономической эффективности, конкурентоспособности проектов АС по сравнению с другими типами генераций на предпроектных стадиях (инве-

стиционное предложение, обоснование инвестиций, технико-экономическое обоснование), с учетом особенностей площадок;

- возможность многокритериального анализа инвестиционной привлекательности конкурирующих проектов АС и ЯЭС;

- оценка устойчивости, чувствительности полученных результатов, с учетом полноты и достоверности исходных данных.

Модель позволяет решать следующие задачи:

Интегральные:

- прогнозирование показателей экономической эффективности (NPV, IRR и др.) при условии бюджетного и коммерческого финансирования, анализ чувствительности результатов, с учетом страновых, региональных особенностей конкретных площадок, условий, технологии строительства и эксплуатации;

- прогнозирование инвестиционных и финансовых показателей по стадиям жизненного цикла, в т.ч. полной удельной приведенной стоимости производства единицы электрической энергии (LCOE), себестоимость электроэнергии для АС и ЯЭС;

- разработка рекомендаций по повышению конкурентоспособности АС и ЯЭС в сопоставлении с другими видами генераций.

Частные (локальные):

- расчет капитальных затрат для различных вариантов проектных решений АС и ЯЭС для различных сценарных условий и на базе исходных данных различной полноты и детализации;

- прогнозирование эксплуатационных затрат, включая стоимость топливной составляющей, для открытого и замкнутого топливного циклов;

- прогнозирование реалистичных сроков сооружения АС с учетом технологических особенностей строительно-монтажных работ и для различных сценариев организационно-управленческого характера;

- оценка затрат на вывод объектов из эксплуатации для различных концепций и условий вывода.

Цифровой двойник

Цифровой двойник (ЦД) АС представляет собой зеркальное отражение объекта АС, спроецированное из физического пространства в киберпространство, разработанный с применением мультифизических кодов. Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции ЦД АС 2, подтверждает актуальность их применения как при проектировании, так и в интеллектуальном управлении сложными объектами и системами [2].

Начиная со стадии разработки концепции АС для проведения более полных технико-экономических исследований (ТЭИ) целесообразно применение технологии ЦД, которая позволяет уменьшить как сроки разработки проекта АС, так и обеспечить конкурентоспособность АС. Конкурентоспособность АС включает в себя не только характеристики безопасности и надежности, но и технико-экономические показатели на уровне показателей электростанций на органическом топливе при учете всех затрат на всех этапах жизненного цикла АС интегрированного в замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ). Учитывая, что показатели безопасности и показатели экономической эффективности лишь отчасти пересекаются, а чаще выставляют разнонаправленные (противоречивые) требования, применение ЦД АС будет способствовать максимизации выгодных характеристик и минимизации затрат на всех этапах жизненного цикла АС разных мощностей и проектов. В то же время на предпроектной стадии и в ходе проектирования полноценная разработка ЦД невозможна, поскольку еще не сложилась конфигурация станции, не детализированы проектные решения. На этом этапе целесообразно создавать методическое и программное обеспечение ЦД, которое впослед-

ствии будет наполняться всё более содержательной информацией. После окончания сооружения АС, разработанный и содержащий полную информацию о проектных решениях ЦД эффективно применять на этапе эксплуатации АС.

После окончания сооружения АС, разработанный и содержащий полную информацию о проектных решениях ЦД эффективно применять на этапе эксплуатации АС. Его применение дает в том числе возможность учитывать и накапливать информацию о всех изменениях, произошедших в оборудовании, системах и проекте АС на данном этапе и принять оптимальные решения при переходе и реализации следующего этапа жизненного цикла АС – вывод из эксплуатации. Также к существенным плюсам разработки ЦД АС следует отнести возможность углубленного обучения персонала АС, выделение в проекте АС не изменяемой части, сохранения и передачи критически важных знаний.

Как показывает практика сооружения АС большой мощности (по проектам технологии ВВЭР), с определенными допущениями оценить системную экономическую эффективность (выраженную в стоимости вырабатываемой АС электроэнергии) всего проекта возможно без применения ЦД, используя ретроспективный подход и накопленный опыт. Однако применение такого подхода не оправдано в случае сооружения головных блоков АС большой мощности, АС средней мощности (АССМ) и особенно АС малой мощности (АСММ), т.к. малая атомная энергетика находясь на раннем этапе своего развития, не обладает достаточно проработанной нормативной регуляцией и не имеет системного подхода к оценке организационно-экономических рисков и комплексных способов управления ими [3]. Таким образом, разработка ЦД становится весьма актуальной задачей при проектировании и сооружении АСММ [4] принимая во внимание, что системная экономическая эффективность проекта АСММ, так же, как и для АС большой мощности складывается с учетом всех сопряженных сфер деятельности и этапов жизненного цикла (аналогично тому как оценивается себестоимость производства

² Дружаев А.А., Мосунова Н.А. Состояние разработки программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» // Сборник тезисов докладов межотраслевого научно-технического семинара «Моделирование динамики ЯЭУ» (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета), г. Сосновый бор, 5-7 июня 2018 год. С. 14–18.

электроэнергии, включая топливную, эксплуатационную, капитальную составляющие и вывод из эксплуатации) [5]. Дополнительным доводом для разработки и применения ЦД АС является необходимостью учета региональных энергосистем и географического нахождения АС, существенно влияющих на механизм формирования цен, по которым потребителями будет закупаться вырабатываемая АС электроэнергия и мощность.

Использование Multi-D моделирования

Положительным эффектом использования Multi-D в качестве одного из инструментов в работе АИ является обеспечение более наглядного предоставления экспертируемых проектных данных и возможность проведения имитационного моделирования различных строительных и технологических процессов.

Работа по проекту ВВЭР-ТОИ показала эффективность применения 3D-моделей. При этом были достигнуты такие значимые результаты, как сокращение времени проектных работ, повышения качества проектной документации, сокращение времени на ознакомление с проектной документацией.

Заключение

В ходе работы был проанализирован полученный при реализации проекта ВВЭР-

ТОИ опыт применения функционала АИ, который выявил необходимость продолжения работ по интеграции АИ в процесс разработки проектов АС и усилению его роли. Наиболее актуальными вопросами процесса интеграции на текущий момент являются:

- закрепление функционала АИ на отраслевом уровне путем внесения в организационно-распорядительные документы Госкорпорации «Росатом» необходимости участия АИ во всех проектах АС, реализуемых ГК;
- наделение АИ полномочиями по согласованию разрабатываемых проектов на правах внутренней экспертизы Госкорпорации «Росатом»;
- создание механизмов, позволяющих вносить изменения в разрабатываемые проекты на основе рекомендаций АИ (управляющая обратная связь);
- совершенствование инструментария АИ (техничко-экономической модели, цифровые двойники и применение решений на базе искусственного интеллекта);
- накопление и аналитическая обработка данных, получаемых в ходе эксплуатации АС, для последующего использования при рассмотрении проектных решений для новых АС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сальникова А.А., Гудеменко Д.В. Подходы к оказанию услуг на этапе сооружения атомных станций за рубежом. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;3(44):22–29. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>

Salnikova A.A., Gudemenko D.V. Approaches to service provision during the construction phase of nuclear power plants abroad. *Global nuclear safety*. 2022;(3):22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>

2. Колтун О.В., Павлов А.С., Жданова М.В. Техничко-экономические аспекты цифрового моделирования строительных объектов энергетики. *Строительство и архитектура*. 2023;11(2):4. EDN KQVNEW. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-2-4-4>

Koltun O. V., Pavlov A. S., Zhdanova M. V. Technical and economic aspects of digital modeling of construction energy facilities. *Construction and architecture*. 2023;11(2):4. (In Russ.). EDN KQVNEW. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-2-4-4>

3. Щекин Д.В., Бых Я.О., Веденеев А.Э., Юрина И.В. Основные риски проектов малой атомной энергетики на примере пилотного проекта АСММ на базе реакторной установки ритм-200Н. VIII Молодежная конференция по управлению проектами: сборник тезисов докладов. Нижний Новгород. 17 ноября 2023 года. Нижний Новгород: ООО «Литера», 2023. С. 21–22. EDN LCDVOR. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65306220> (дата обращения: 26.05.2024).

Shchekin D.V., Bykh Ya.O., Vedeneev A.E., Yurina I.V. The main risks of small-scale nuclear energy projects using the example of a pilot project of a nuclear power plant based on the Rhythm-200N reactor

plant. VIII Youth conference on project management: collection of abstracts of reports. Nizhny Novgorod. November 17, 2023. Nizhny Novgorod: LLC «Litera», 2023. P. 21–22. (In Russ.). EDN LCDVOR. Available at <https://elibrary.ru/item.asp?id=65306220> (accessed: 26.05.2024).

4. Соловьев С.Л., Зарюгин Д.Г., Калякин С.Г. Перспективные направления развития атомных станций малой мощности в России. *Вестник Российской академии наук*. 2023;93(2):103–111. EDN FDMCZR <https://doi.org/10.31857/S086958732302010X>

Kalyakin S.G., Soloviev S.L., Zaryugin D.G. Prospects for the development of small nuclear power plants in Russia. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2023;93(2):103–111. (In Russ.). EDN FDMCZR <https://doi.org/10.31857/S086958732302010X>

5. Рыжикова Т.Н., Щепетина Т.Д., Чумак Д.Ю. Анализ экономических аспектов развития атомных станций малой и средней мощности в России. *Экономический анализ: теория и практика*. 2018;17(8):1400–1413. EDN UWOROY. <https://doi.org/10.24891/ea.17.8.1400>

Ryzhikova T.N., Shchepetina T.D., Chumak D.Yu. Analyzing the economic aspects of small and medium capacity nuclear plant development in Russia. *Economic analysis: theory and practice*. 2018;17(8):1400–1413. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/ea.17.8.1400>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Колтун О.В. – постановка проблемы, значительный вклад в концепцию исследования;

Иванов С.О. – разработка концепции исследования, критический анализ литературы, подготовка и оформление текста статьи;

Якубов Д.В. – описание результатов и формирование выводов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Владимирович Колтун, кандидат технических наук, руководитель департамента, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-0442-5828>

e-mail: OVKoltun@vniiaes.ru

Сергей Олегович Иванов, руководитель проекта, АО «ВНИИАЭС»; кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0009-0349-0440>

e-mail: SOIvanov@vniiaes.ru

Денис Вячеславович Якубов, руководитель проектного офиса, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-2813-4077>

e-mail: DVYakubov@vniiaes.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Koltun O.V. – problem statement, significant contribution to the research concept;

Ivanov S.O. – development of the research concept, critical analysis of the literature, preparation and formatting of the text of the article;

Yakubov D.V. – description of the results and formation of conclusions of the research.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg V. Koltun, Can. Sci. (Engin.), Head of Department, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-0442-5828>

e-mail: OVKoltun@vniiaes.ru

Sergei O. Ivanov, Project Manager, JSC «VNIIAES», Can. Sci. (Engin.), Assistant Professor., MPEI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0009-0349-0440>

e-mail: SOIvanov@vniiaes.ru

Denis V. Yakubov, Head of the Project Office, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-2813-4077>

e-mail: DVYakubov@vniiaes.ru

Поступила в редакцию 21.06.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2024

Received 21.06.2024

Revision 05.09.2024

Accepted 10.09.2024