

Бирюков Николай Александрович, доктор экономических наук
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

Принев Даниил Юрьевич, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС ПРИ ВНЕДРЕНИИ МЕТОДА «ОТКРЫТЫЙ ВЕРХ» (НА ПРИМЕРЕ МОНТАЖА КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1200)

Аннотация. В статье рассмотрены организационно-технологические решения по монтажу корпуса реактора ВВЭР-1200 методом «открытый верх» как фактор повышения экономической безопасности строительства атомной электростанции. На примере проекта АЭС «Эль-Дабаа» (Арабская Республика Египет) показано, что замена традиционной схемы монтажа через транспортный шлюз на монтаж через открытый верх позволяет сократить продолжительность критического пути на 90 суток, снизить трудоемкость на 38 %, высвободить 216 машино-часов работы уникального крана. Прямой экономический эффект для генподрядчика составляет 547,8 млн руб., макроэкономический эффект для экономики Египта — до 118,25 млн долл. США дополнительной выручки или 119,5 млн долл. США от экспорта замещенного природного газа. Обосновано, что ключевой вклад в экономическую безопасность вносит разгрузка критического пути, снижающая зависимость от внешних факторов (готовность купола, полярного крана, эстакады) и риски срыва сроков ввода энергоблока.

Abstract. The article considers organizational and technological solutions for the installation of the VVER-1200 reactor vessel using the open-top method as a factor in enhancing the economic security of nuclear power plant construction. Using the El-Dabaa NPP project (Arab Republic of Egypt) as a case study, it is shown that replacing the traditional installation scheme through the transport airlock with open-top installation reduces the critical path duration by 90 days, reduces labor intensity by 38%, and releases 216 machine-hours of unique crane operation. The direct economic effect for the general contractor amounts to RUB 547.8 million, while the macroeconomic effect for the Egyptian economy reaches up to USD 118.25 million in additional revenue or USD 119.5 million from exported replaced natural gas. It is substantiated that the key contribution to economic security is made by relieving the critical path, which reduces dependence on external factors (readiness of the dome, polar crane, gantry) and the risks of delaying the commissioning of the power unit.

Ключевые слова: экономическая безопасность строительства, атомная электростанция, ВВЭР-1200, метод «открытый верх», монтаж корпуса реактора, критический путь, сокращение сроков, прямой экономический эффект, макроэкономический эффект, АЭС «Эль-Дабая».

Keywords: economic security of construction, nuclear power plant, VVER-1200, open-top method, reactor vessel installation, critical path, schedule reduction, direct economic effect, macroeconomic effect, El-Dabaa NPP.

Введение

Экономическая безопасность реализации крупных инфраструктурных проектов, в особенности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), определяется способностью генподрядной организации завершить строительство в установленные сроки, в рамках бюджета и с соблюдением требований безопасности. Для зарубежных проектов Госкорпорации «Росатом» (АЭС «Эль-Дабая» в Египте, «Пакш-2» в Венгрии, «Аккую» в Турции) к этим факторам добавляются валютные риски, необходимость адаптации к национальному регулированию и высокая стоимость привлечения уникальной техники.

Одним из критических этапов строительства энергоблока ВВЭР-1200 является монтаж корпуса реактора массой 331 тонна с допуском позиционирования не более 0,1 мм. Традиционная схема (через эстакаду транспортного шлюза с использованием полярного крана) [1] жестко привязывает начало монтажа к полной готовности купола защитной оболочки, полярного крана и эстакады, что создает концентрацию работ на критическом пути и увеличивает риски срыва директивных сроков.

В статье на примере площадки АЭС «Эль-Дабая» анализируется, как переход на метод «открытый верх» (подача корпуса реактора гусеничным краном до закрытия купола) [2] влияет на ключевые показатели [3] экономической безопасности: продолжительность строительства, трудоемкость, загрузку кранового оборудования, прямой и макроэкономический эффект [4], [5], [6].

Методика оценки

Оценка проведена по трем группам показателей, значимым для экономической безопасности:

Показатели продолжительности – моделирование методом критического пути (без указания конкретного ПО, но с опорой на отраслевые практики) для традиционной схемы и схемы «открытый верх»).

Показатели трудоемкости и машиноемкости – на основе калькуляций по нормативам ГЭСН 81-02-39-2020 и фактическим данным реализованных проектов (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС) [7], скорректированным на условия зарубежной площадки.

Экономические показатели:

- прямой эффект для генподрядчика – экономия накладных расходов за счет сокращения срока строительства;

- макроэкономический эффект для страны-заказчика – дополнительная выручка от досрочной генерации электроэнергии и стоимость замещенного природного газа.

Исходные данные по стоимости человеко-часа (1500 руб.), машино-часа крана Liebherr LR 11350 (25 000 руб.), накладным расходам (180 млн руб./мес.), цене газа (206 долл. США/тыс. м³) и цене электроэнергии (5,0 цента/кВт·ч) приняты на основании сметной документации проектов-аналогов, данных публичной отчетности АО «Атомстройэкспорт», каталогов Rental Alliance и отчетов МАГАТЭ/Управления энергетической информации США.

Результаты сравнения схем монтажа

1. Продолжительность и состав критического пути.

Традиционный метод, представленный на рисунках 1, 2, включает 9 последовательных операций (от завершения бетонирования стен до опускания корпуса в шахту), из которых операции 2–4 (монтаж купола, полярного крана, эстакады) являются критическими и предшествуют монтажу корпуса.

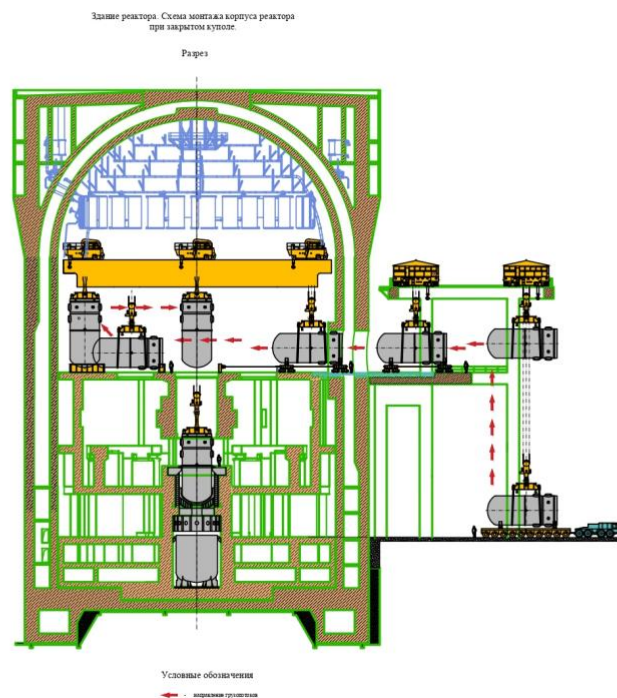


Рис. 1 - Схема монтажа корпуса реактора ВВЭР-1200 традиционным методом (разрез)

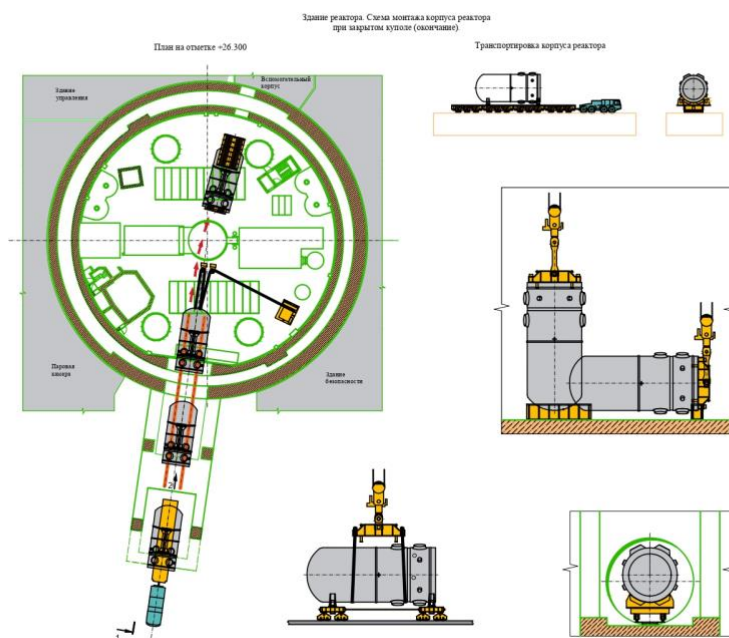


Рис. 2 - Схема монтажа корпуса реактора ВВЭР-1200 традиционным методом (вид в плане)

Метод «открытый верх» [7] (рисунок 3) сокращает число операций на критическом пути до 3:

- возведение стен до промежуточной отметки +26,350 м;

- подъем корпуса гусеничным краном выше этой отметки;
- вертикальное опускание в шахту и позиционирование.

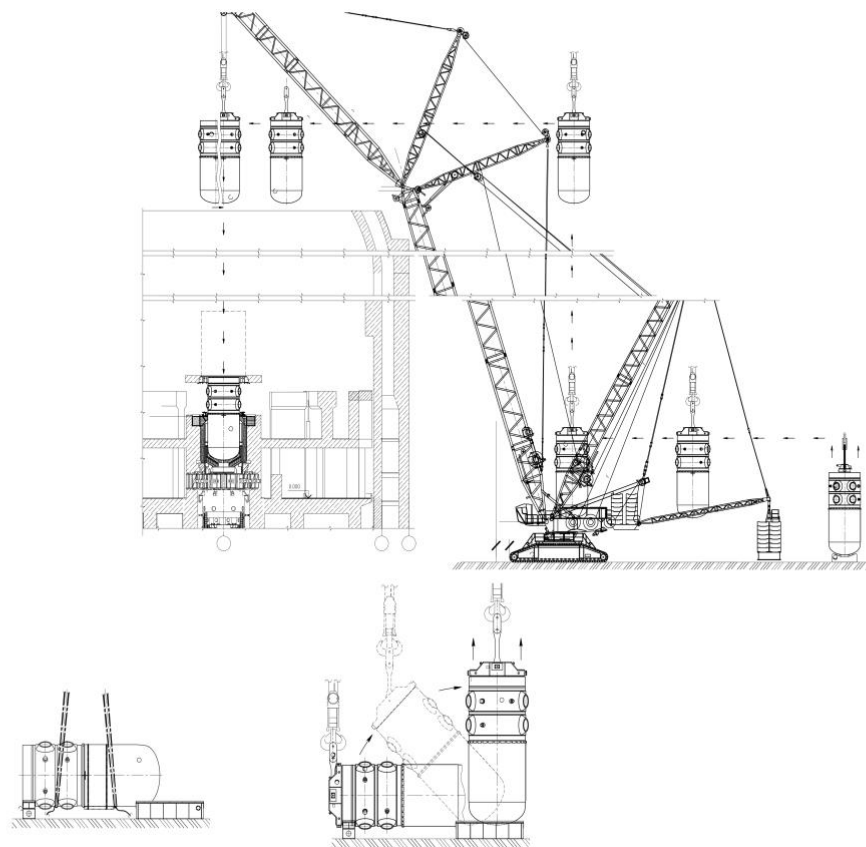


Рис. 3 - Схема монтажа корпуса реактора ВВЭР-1200 методом «открытый верх»

Результат моделирования:

- традиционная схема – 1113 суток;
- метод «открытый верх» – 1023 суток;
- сокращение – 90 суток (3 месяца).

С позиции экономической безопасности это означает снижение риска срыва сроков из-за задержек, связанных со сборкой и монтажом купола, полярного крана или сооружением конструкций эстакады, так как эти работы переносятся за пределы критического пути и могут выполняться параллельно с монтажом основного оборудования.

2. Трудоемкость, загрузка кран и сводное сравнение показателей.

Сравнение ключевых показателей традиционной схемы и метода «открытый верх» представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение технико-экономических показателей схем монтажа корпуса
реактора ВВЭР-1200

Показатель	Ед. изм.	Традиционная схема	Метод «открытый верх»	Изменение
Продолжительность сооружения (от фундаментной плиты до завершения монтажа корпуса)	сут	1113	1023	–90 (–8,1 %)
Количество операций на критическом пути	ед.	9	3	–6
Трудоемкость монтажа корпуса реактора	чел.-ч	5200	3200	–2000 (–38 %)
Расход машино- часов крана Liebherr LR 11350 на критическом пути	маш.-ч	240	24	–216 (–90 %)

Как следует из табл. 1, метод «открытый верх» обеспечивает сокращение продолжительности на 8,1 %, трудоемкости – на 38 %, а загрузки основного крана на критическом пути – на 90 %.

Снижение трудоемкости на 2000 чел.-ч достигается за счет:

- исключения устройства эстакады и усиливающих конструкций (экономия 500 чел.-ч);
- отказа от монтажа/демонтажа оснастки для кантовки полярным краном (600 чел.-ч);
- упрощения строповки (400 чел.-ч);
- лучшей геодезической видимости (300 чел.-ч);
- сокращения внутриобъектных транспортировок (200 чел.-ч).

Сокращение загрузки крана на 90 % позволяет использовать его для других работ (монтаж купола, парогенераторов) уже после установки корпуса, не создавая простоев.

3. Экономические эффекты.

Прямой эффект для генподрядчика.

Структура прямого экономического эффекта для генподрядчика представлена в табл. 2.

Таблица 2

Прямой экономический эффект для генподрядчика от внедрения метода
«открытый верх»

Статья экономии	Сумма
Сокращение накладных расходов (3 мес. × 180 млн руб.)	540,0
Снижение трудозатрат (2000 чел.-ч × 1500 руб.)	2,4
Снижение машино-часов крана (216 маш.-ч × 25 000 руб.)	5,4
Итого прямой эффект	547,8

Как видно из таблицы 2, основной вклад (98,6 %) вносит сокращение продолжительности строительства. Это важнейший вывод для экономической безопасности: выигрыш достигается не столько локальной оптимизацией операций, сколько разгрузкой критического пути и созданием параллельных потоков работ.

Макроэкономический эффект для Египта

Дополнительная выработка за 3 месяца: $M = N * n * t$, где

M – мощность энергоблока, равная 1200 МВт [8];

n – коэффициент использования установленной мощности для реактора типа ВВЭР-1200, равный 0,9 [8];

t – время в часах.

$M = 2,365$ млрд кВт·ч.

Дополнительная выручка: $F_1 = M * p$, где

p – оптовая цена, равная 5,0 цента/кВт·ч [9];

$F_1 = 118,25$ млн долл. США.

По замещению природного газа:

Стоимость замещенного природного газа составит: $F_2 = G * c$, где

G – эквивалентный объем газа, равный 0,58 млрд м³;

c – экспортная цена, равная 206 долл. США/тыс. м³ [10]

$F_2 = 119,5$ млн долл. США валютной выручки от экспорта высвобожденного газа.

Обе оценки показывают значительный положительный эффект для платежного баланса и энергетической безопасности страны-заказчика.

4. Влияние на экономическую безопасность проекта.

Экономическая безопасность строительства АЭС в зарубежном проекте с использованием данных табл. 1 и табл. 2 может быть оценена по следующим факторам риска приведенным в таблице 3.

Таблица 3

Оценка факторов риска и влияния на экономическую безопасность при различных схемах монтажа корпуса реактора

Фактор риска	Традиционная схема	Метод «открытый верх»	Влияние на безопасность
Зависимость от готовности купола/полярного крана/эстакады	Критическая	Отсутствует	Снижение риска срыва сроков
Способ кантования корпуса реактора	-	Специализированным мостовым краном кругового действия в замкнутом пространстве	Классическим гусеничным краном (грузоподъемностью от 1000 тонн)
Количество перегрузок оборудования между кранами	2 (гусеничный → транспортная тележка → полярный)	1 (гусеничный)	Снижение риска повреждения груза
Условия геодезического контроля	Ограниченная видимость, запыленность	Прямая видимость	Повышение точности, снижение риска брака
Риск динамических нагрузок при передаче груза между кранами	-	Присутствует	Отсутствует
Риск повреждения корпуса реактора при горизонтальном перемещении	-	Присутствует	Отсутствует
Использование гусеничного крана на критическом пути	240 маш.-ч	24 маш.-ч	Высвобождение ресурса для других работ
Резерв времени по срокам сдачи пуска энергоблока	Отсутствует (директивный срок может быть сорван)	+ 90 суток запаса	Формирование временного буфера безопасности

Таким образом, метод «открытый верх» не только улучшает технико-экономические показатели, но и создает системный запас прочности по срокам, снижает уязвимость от задержек смежных подрядчиков и поставщиков.

Выводы

На примере монтажа корпуса реактора ВВЭР-1200 на АЭС «Эль-Дабаа» показано, что переход от традиционной схемы (через эстакаду транспортного шлюза) к методу «открытый верх» обеспечивает:

Снижение продолжительности критического пути на 90 суток (8,1 %), что при среднемесячных накладных расходах 180 млн руб. дает экономию 540 млн руб. для генподрядчика.

Сокращение трудоемкости на 38 % (с 5200 до 3200 чел.-ч) и высвобождение 216 машино-часов уникального крана.

Формирование прямого экономического эффекта 547,8 млн руб. и макроэкономических эффектов для Египта в размере 118,25 млн долл. США (дополнительная выручка) или 119,5 млн долл. США (замещение газа).

Повышение экономической безопасности за счет исключения зависимости от готовности купола, полярного крана и эстакады, сокращения числа перегрузок, улучшения условий контроля и создания временного резерва в 90 суток.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке особо сложных проектов производства работ для энергоблоков ВВЭР-1200 как на территории РФ, так и на зарубежных площадках, а также при обосновании альтернативных схем монтажа перед регулирующими органами.

Список литературы

1. Единый отраслевой порядок согласования технических заданий и технических условий... Госкорпорация «Росатом». – М., 2022.
2. Григорьев К.А., Тихонов М.Н. Оптимизация монтажных схем корпусного оборудования ВВЭР-1200... // Атомная энергия. 2024. Т. 136. С. 44–49.
3. Шевченко А.В., Филимонов А.А. Оценка экономической эффективности внедрения новых технологий монтажа на АЭС // Атомная энергия. 2022. Т. 133. С. 290–295.
4. Ключев, В. Д. Энергетическая и экономическая безопасность при создании основных производственных фондов предприятия и определение ее пороговых значений / В. Д. Ключев, Н. А. Бирюков, И. М. Васильева // Сметно-договорная работа в строительстве. – 2020. – № 11. – С. 3-12. – EDN JPJTKQ.
5. Бирюков, Д. В. Методика оценки экономической безопасности предприятий жилищно-коммунального хозяйства / Д. В. Бирюков, И. М. Васильева, Н. А. Бирюков // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 5. – С. 19. – EDN NGKKYE.
6. Бирюков, Н. А. Концепция обеспечения энергетической безопасности зданий и сооружений на основе их системного проектирования и функционального подхода / Н. А. Бирюков, И. С. Иванова // Нормирование и оплата труда в строительстве. – 2019. – № 3. – С. 14-18. – EDN DRXSSD.
7. Construction Schedule Optimization Using Open-Top Installation Method for VVER-1200 Units / D. Pavlov // Nuclear Engineering and Design. 2024. Vol. 418. P. 112–120.
8. Данные публичной отчетности АО «Атомстройэкспорт» за 2023–2024 гг.
9. Forecasting the Levelized Cost of Electricity for Egypt's First Nuclear Station / L.A. Hassan // Alexandria Engineering Journal. 2024. Vol. 87. P. 310–318.

10. Natural Gas Monthly. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2025.