

Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием

Дмитрий Николаевич Коротких^{1,2}, Олег Александрович Корнев²,
Вячеслав Васильевич Белов², Александр Сергеевич Силантьев²,
Дмитрий Егорович Капустин²

¹ Институт «Оргэнергострой» (ОЭС); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для повышения конкурентоспособности отечественных проектов АЭС требуется сократить сроки строительства до 36 месяцев. Одним из способов решения данной задачи является индустриализация процесса строительства, при котором используются сборные элементы в виде объемных блоков с облицовкой из листовой стали. Выполнен обзор открытых источников информации об опыте возведения атомных станций с применением модульных железобетонных конструкций (ЖБК) с внешним листовым армированием. Рассмотрены проекты: AP-1000 компании Westinghouse (США) и CAP-1000 (SNERDI).

Материалы и методы. На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых источников, рассмотрен практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием при возведении АЭС (по проектам AP-1000 и CAP-1000) на следующих объектах: Sanmen, Haiyang, Xudabao и Lianjiang (Китай), V.C. Summer и Vogle (США).

Результаты. Ключевым методом возведения при реализации проектов АЭС с использованием модульных ЖБК с внешним листовым армированием стал монтаж сверхкрупными блоками по технологии open-top. Использование такой технологии предъявляет повышенные требования к проектной документации, изготовление блок-модулей требует жесткого контроля логистических рисков. Отсутствие методов контроля качества уплотнения монолитного бетона, укладываемого в конструкцию, повышает требования к качеству бетонных смесей и технологии их укладки.

Выводы. В целом технология модульного строительства с помощью ЖБК с внешним листовым армированием позволяет значительно снизить трудозатраты по возведению сооружений непосредственно на строительной площадке. По результатам анализа опыта реализации проектных решений AP-1000 и CAP-1000 установлено, что при осуществлении данной технологии возникают дополнительные логистические риски и риски обеспечения качества укладки монолитного бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: крупноблочный монтаж, конструкции с внешним листовым армированием, атомные станции, проект AP-1000, проект CAP-1000, модульные конструкции атомных станций, изготовление и укрупнение блоков конструкций, проект APR-1400, опыт возведения специальных конструкций АЭС

Благодарности. Данная работа реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. Вып. 10. С. 1696–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Корнев, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

Review of experience in the construction of NPP using modular structures with external sheet reinforcement

Dmitrii N. Korotkikh^{1,2}, Oleg A. Kornev², Vyacheslav V. Belov²,
Alexander S. Silantiev², Dmitrii E. Kapustin²

¹ Orgenergostroy Institute (OES); Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To increase the competitiveness of domestic NPP projects, it is necessary to reduce the construction time to 36 months. One of the ways to solve this problem is industrialization of the construction process, which uses prefabricated

elements in the form of volumetric units with sheet steel cladding. The paper reviews open sources of information on the experience of erecting nuclear power plants using modular reinforced concrete structures with external sheet reinforcement. The following projects were considered: AR-1000 by Westinghouse (USA) and ATS-1000 (SNERDI).

Materials and methods. On the basis of analysis, generalization and systematization of information obtained from open sources, the authors reviewed the practical experience of application of structures with external sheet reinforcement in the construction of NPP (under the AP-1000 and CAP-1000 projects) at the following facilities: Sanmen, Haiyang, Xudabao and Lianjiang (China), V.C. Summer and Vogle (USA).

Results. The main method of erection in the implementation of NPP projects using modular reinforced concrete structures with external sheet reinforcement was the erection of extra-large units using the open-top technology. The use of such technology imposes higher requirements to the design documentation, manufacturing of unit modules requires strict control of logistic risks. Lack of quality control methods for compaction of monolithic concrete placed in the structure increases the requirements to the quality of concrete mixtures and technology of their placement.

Conclusions. In general, the technology of modular construction using reinforced concrete structures with external sheet reinforcement allows to significantly reduce labor costs of erecting structures directly on the construction site. However, based on the results of analyzing the experience of implementation of AR-1000 and SAR-1000 design solutions, it was found that additional logistical risks and risks of ensuring the quality of monolithic concrete placement arise when implementing this technology.

KEYWORDS: large unit assembly, structures with external sheet reinforcement, nuclear power plants, AP-1000 project, CAP-1000 project, modular structures of nuclear power plants, fabrication and consolidation of structural units, APR-1400 project, experience in erection of special NPP structures

Acknowledgments. This work was implemented within the framework of the development programme of the advanced engineering and construction school of the National Research University Moscow State University of Civil Engineering.

FOR CITATION: 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 (rus.).

Corresponding author: Oleg A. Kornev, morozovaanna499@gmail.com, i@okornev.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В среднем на строительство одного головного блока АЭС по текущим проектам уходит около 7, а в некоторых случаях до 11–12 лет [1]. «Увеличение сроков строительства приводит к снижению внутренней нормы доходности проекта до низких значений 4–7 %/год. При довольно низкой ставке дисконтирования (4–5 %/год) проект становится убыточным при сроках сооружения (T_c) более 10 лет» [2], а «период окупаемости удваивается за каждые два года просрочки ввода в промышленную эксплуатацию энергоблока АЭС, превышая 30 лет уже при $T_c \geq 9$ лет» [2]. «По данным ВНИИАЭС, дисконтированный период окупаемости проекта АЭС при сроке строительства 80 мес составляет 43,2 года в случае бюджетного финансирования» [3], что несомненно отражается на будущей себестоимости получаемой на АЭС электроэнергии.

Поэтому поиск и внедрение эффективных строительных технологий, проверенных практическим опытом, позволяющих сократить сроки сооружения станций и, как следствие, повысить доходность и конкурентоспособность отечественных АЭС, является приоритетной задачей. В свою очередь, это может быть достигнуто за счет общей индустриализации проектов [3–5], среди которых следует выделить [3]: «замену традиционного стержневого армирования железобетонных конструкций на внешнее, листовое с использованием стального листа и в качестве несъемной опалубки; широкое использование блочно-го монтажа строительных конструкций; комплексно-блочное изготовление и монтаж оборудования;

использование совмещенного монтажа», причем, как показывает практика, первое создает предпосылки к обеспечению в той или иной степени остального из перечисленного¹.

Для включения индустриальных технологий в отечественные проекты АЭС в настоящее время Акционерное общество «Атомстройэкспорт» с привлечением консорциума, состоящего из ведущих научных организаций России в области строительства (АО «Институт «Оргэнергострой», НИУ МГСУ, АО «ВНИИАЭС» и др.), проводит научно-исследовательскую работу, целью которой является разработка национального стандарта на проектирование и расчет железобетонных конструкций (ЖБК) с внешним листовым армированием. Развитие данной технологии с учетом зарубежного опыта позволит сократить сроки возведения строительных конструкций, а также повысит эффективность использования строительных материалов.

Оценка применения модульных конструкций с внешним листовым армированием SC в строительных решениях атомных станций рассматривалась различными инжиниринговыми компаниями в своих проектах. Так, например, для APR-1400 (TEPCO, Южная Корея) определено, что конструкции с внешним листовым армированием служат одной из наиболее жизнеспособных альтернатив среди существующих методов строительства с целью сокращения сроков сооружения АЭС [6]. Европейцы на примере здания дизель-генераторной предложили для кон-

¹ IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.5. Construction Technologies for Nuclear Power Plants. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 189 p.

струкций АЭС малой мощности [7] использовать более унифицированный вариант SC, состоящий из однотипных L или U-образных модулей.

В целом конструктивные решения с внешним листовым армированием впервые активно стали изучаться при разработке строительных решений на станциях японского проекта, еще в 80-х годах прошлого века, и получили свою практическую реализацию на проекте ABWR (реактор кипящего типа, мощностью 1360 МВт) в 1992 г. для энергоблоков № 6 и 7 АЭС Kashiwazaki-Kariwa (Япония), строительство которой осуществлялось компанией Toshiba в сотрудничестве с GE и Hitachi¹. В современной практике такие конструкции стали основой для проектов компании Westinghouse (AP-300² и AP-1000³), GE Hitachi Nuclear Energy (BWRx-300^{4,5} и SNERDI (CAP-1000⁶ и CAP-1400⁷)).

Модульные принципы с применением конструкций SC позволяют реализовать крупноблочный монтаж из практически «обезличенных» блок-модулей, в том числе в связке с оборудованием и сетями. Кроме того, отсутствуют опалубочно-распалубочные работы, формируется гарантированное качество лицевой поверхности, сокращается общий расход стали при сравнимой прочности с традиционными ЖБК, а также улучшается работа в условиях циклических и ударных воздействий. Появляется возможность закрепить оборудование и рабочие площадки в любом месте^{1,8} [6–9]. Все это свиде-

тельствует о привлекательности и актуальности рассмотрения SC для отечественных проектов АЭС.

Поэтому цель данной работы — обзор практического опыта возведения атомных станций с применением сборных конструкций с внешним листовым армированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых источников, авторами рассмотрен практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием при возведении АЭС на таких объектах, как Sanmen, Haiyang, Xudabao и Lianjiang (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США). Определены основные конструктивные элементы блоков, их массогабаритные характеристики, используемые схемы механизации для монтажа, рассмотрены объекты строительной инфраструктуры, проблемы, с которыми столкнулись при строительстве станций по модульной технологии с помощью конструкций SC.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Широкое применение конструкции SC получили в проекте AP-1000 компании Westinghouse (США), где используется модульно-блочное построение строительных объемов и технологических систем. Так, используются следующие типы блоков⁹: СА — крупные блоки и блок-модули SC, заполняемые бетоном; СВ — модули стальной облицовки с элементами жесткости; СГ и СН — модули частей конструкции здания, в первом случае не оснащенные, во втором — оснащенные механическими изделиями; CS — модули, состоящие из стальных лестничных элементов. Кроме того, выделяют модули механического оборудования типа К для: вспомогательного здания (КВ), подболовочного пространства реакторного острова (КQ), турбинного здания (КТ); трубопроводные модули W, Q и R (соответственно — за пределами реакторного острова, подболовочного пространства и вспомогательного здания)⁹.

Всего в проекте AP-1000 применяется примерно 138 конструктивных модулей [10], из них: 65 — в гермообъеме (16 блоков типа СА, 36 — СВ, 9 — СН и 4 — CS); 32 блока в обстройке реакторного здания (8 — СА, 1 — СВ, 12 — СН, 11 — CS), 10 — в пристройке к реакторному зданию (все блоки CS) и 31 блок — в здании турбины (16 — CS, 14 — СГ и СН, 1 — СА), технологических модулей механического оборудования и трубопроводных систем примерно 123⁹, но возможны адаптации при привязке к конкретной площадке и контракту (проекту).

⁹ ITAACs in Modules Presentaion // Westinghouse, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2009. 77 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0930/ML093010365.pdf>

² AP300 SMR. Small Modular Reactor (SMR) // Westinghouse. URL: <https://westinghousenuclear.com/uknuclear/products-services/ap300-smr/>

³ AP1000 Design Control Document (rev. 18). Tier 2 Chapter 3. Design of Structures, Components, Equip. & Systems – Section 3.8 Design of Category I Structures // Nuclear Regulatory Commission (NRC). 190 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1034/ML103480517.pdf>

⁴ NEDO-33988 (revision 0). BWRX-300 Steel-Plate Composite (SC) Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building Structural Design // GE Hitachi Nuclear Energy, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2022. 26 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2228/ML22287A177.pdf>

⁵ NEDO-33926 (revision 1). BWRX-300 Steel-Plate Composite Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building (RB) Structural Design // GE Hitachi Nuclear Energy, Nuclear Regulatory Commission (NRC). 2023. 133 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2323/ML23230B215.pdf>

⁶ Major module put in place at Sanmen 4 // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Major-module-put-in-place-at-Sanmen-4>

⁷ CAP1400 Reactor vessel passes pressure tests // Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute. URL: <https://www.snerdi.com.cn/en/newsdetail?id=5834>

⁸ NEA No. 7530. Unlocking reductions in the construction costs of nuclear: a practical guide for stakeholders // France, Boulogne-Billancourt: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. 2020. 129 p. URL: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-07/7530-reducing-cost-nuclear-construction.pdf>

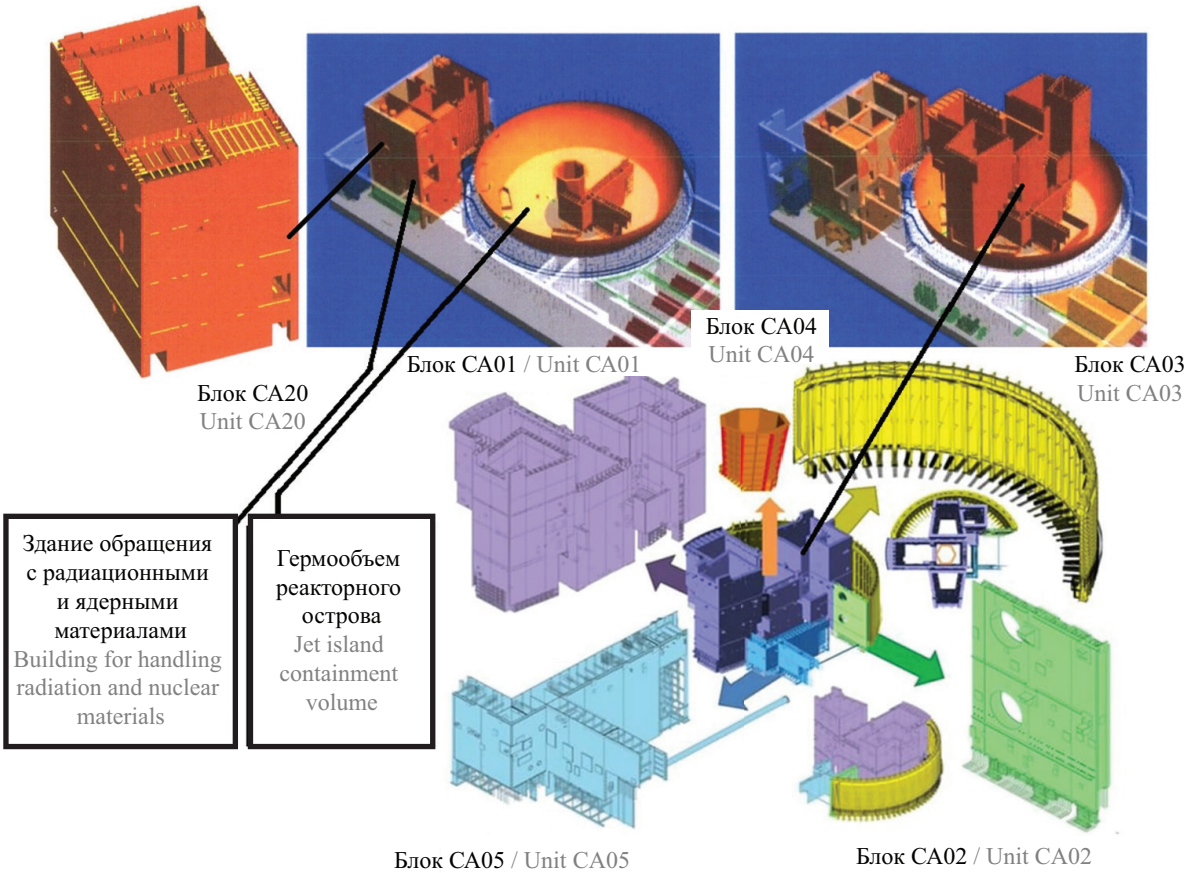


Рис. 1. Схема разрезки на крупные блоки СА, выполненные из конструкций SC, для проекта AP-1000 дизайна Westinghouse (США)⁹ [11]

Fig. 1. Schematic of cutting into large CA units made of SC structures for the Westinghouse (USA) AR-1000 design project⁹ [11]

Общая разрезка на крупные блоки СА внутренне-го гермообъема реакторного острова, а также здания обращения с радиоактивными и ядерными материала-ми проекта AP-1000 показаны на рис. 1, их массогаба-ритные характеристики приведены в табл. 1.

Блоки СА собираются из отдельных, более мел-ких модулей (монтажных единиц), их геометриче-ские размеры выбираются исходя из транспортных га-баритов доставки (автомобильный, железнодоро-жный или морской транспорт) с заводов изготови-телей^{1,3}. Например, для крупного блока СА01 такие

подмодули имеют геометрические размеры около 3,7 × 3,7 × 25 м (длина, ширина, высота), их вес в среднем составляет 10 т, но может доходить до³ 73 т. Вариант разрезки блока СА20 на блок-модули СА показан на рис. 2, а, а пример отдельного блок-модуля СА в составе СА20 — на рис. 2, b.

На площадке укрупнительной сборки (или в спе-циальном цехе) близ стройплощадки блок-модули собираются в стык при помощи автоматической (или иного вида) сварки с полным проплавлением шва, создавая равнопрочное соединение^{1,3} (рис. 3) [10].

Табл. 1. Массогабаритные характеристики крупных конструкционных блоков СА проекта AP-1000⁹ [12]

Table 1. Mass and dimensional characteristics of large structural units CA of the AR-1000 project⁹ [12]

Тип крупного конструкционного блока Type of large structural unit	Габариты, м Dimensions, m			Масса конструкций, т Mass of structures, t	Количество подмодулей в блоке, шт. Number of submodules in the unit, pcs.
	длина length	ширина width	высота height		
CA01	28,0	29,0	23,0	725,0	47
CA02	7,0	2,0	13,0	28,3	5
CA03	35,0	14,0	13,0	191,0	17
CA04	—	—	—	45,0	5
CA05	—	—	—	50,0	8
CA20	13,0	21,0	20,7	777,0	72

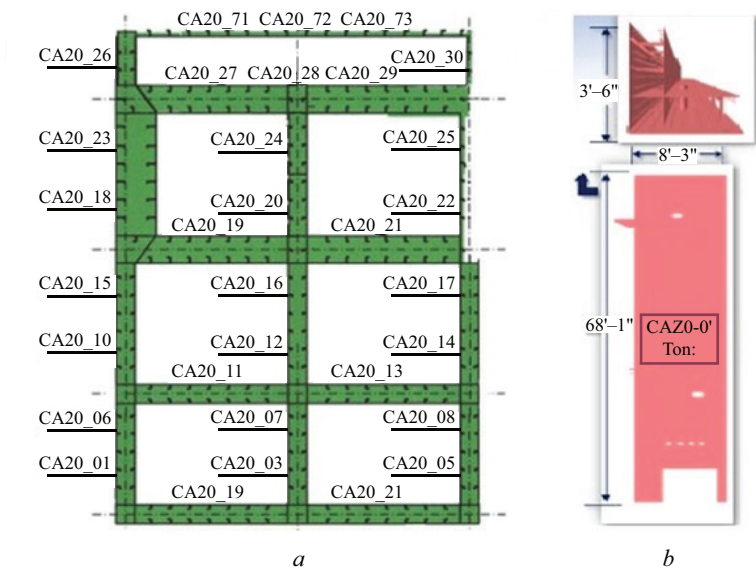


Рис. 2. Разрезка крупного блока CA20 на сборочные единицы (блок-модули CA): *a* — вариант разрезки блока CA20, при этом CA20_01 весит 29,3 т, CA20_02 — 18,65 т, CA20_03 — 31,5 т, средний вес монтажных единиц около — 20,84 т; *b* — блок-модуль CA20_011 в составе крупного блока CA20 имеет вес 30 т, высоту — 20,73 м, длину и ширину — 2,59 м [10]

Fig. 2. Cutting of a large unit CA20 into assembly units (unit modules CA): *a* — shows a variant of cutting of the unit CA20, with CA20_01 weighing — 29.3 tons, CA20_02 — 18.65 tons, CA20_03 — 31.5 tons, the average weight of assembly units is about — 20.84 tons; *b* — unit-module CA20_011 as part of the large unit CA20, has a weight — 30 tons, height — 20.73 m, length and width — 2.59 m [10]

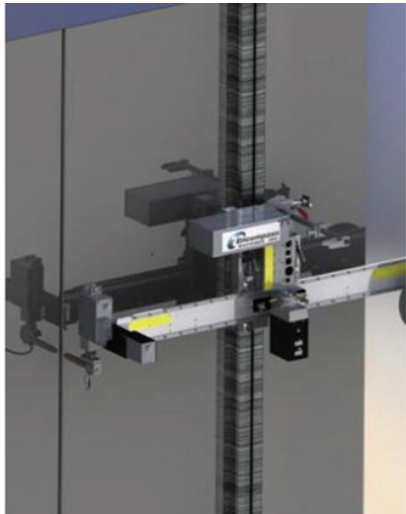


Рис. 3. Пример автоматической сварки блок-модулей при сборке их в единый укрупненный монтажный блок CA в вертикальном положении. Контроль сварного соединения — визуальный (100 % длины) и с применением ультразвука (или радиографического метода) на 10 % их длины [10]

Fig. 3. An example of automatic welding of unit modules when assembling them into a single enlarged assembly unit CA in the vertical position. Control of the welded joint — visual (100 % of the length) and with the use of ultrasound (or radiographic method) at 10 % of their length [10]

Отдельные блок-модули выполнены в виде конструкций с внешним листовым армированием и в своем стандартном исполнении представляют стальные листы³, толщиной 12,7 мм, к которым

с внутренней стороны привариваются анкеры Нельсона (длиной 157,2 мм, диаметром 19,05 мм, с шагом по горизонтали 254 мм, по вертикали — 243,8 мм), с целью создания связи между телом будущего бетонного заполнения конструкции и металлических листов (см. рис. 4, *a*). Стальные листы, в свою очередь, объединяются в жесткий пространственный блок за счет применения соединительных ферм, выполненных из прокатных профилей (уголков 102 × 76 мм и швеллеров высотой 152,4 мм)⁵ (рис. 4, *a*). Номинальное типовое расстояние между фермами для конструктивных блоков³ составляет 762 мм. После набора уложенным в конструкцию бетоном прочности плоские связевые фермы обеспечивают дополнительное сопротивление к сдвигу между стальными листами внешнего армирования, работая как поперечные хомуты в традиционных каркасах монолитных железобетонных конструкций. Проходки, а также желоба для укладки бетона в конструкцию, предусматриваются непосредственно на этапе сборки блок-модулей CA³.

Для перекрытий используются блоки с односторонним расположением стального листа, их жесткость обеспечена за счет внутренних ребер, выполненных из прокатных элементов таврового профиля высотой 457,2 мм. Верхнее армирование — традиционное, с применением арматурной сетки из стержней периодического профиля диаметром 20 мм, установленных с шагом 304,8 мм. Нижнюю часть тавров пересекают на продольные секции равнополочные уголки³ 76,2 × 76,2 × 9,53 мм, с шагом 457,2 мм (рис. 4, *b*).

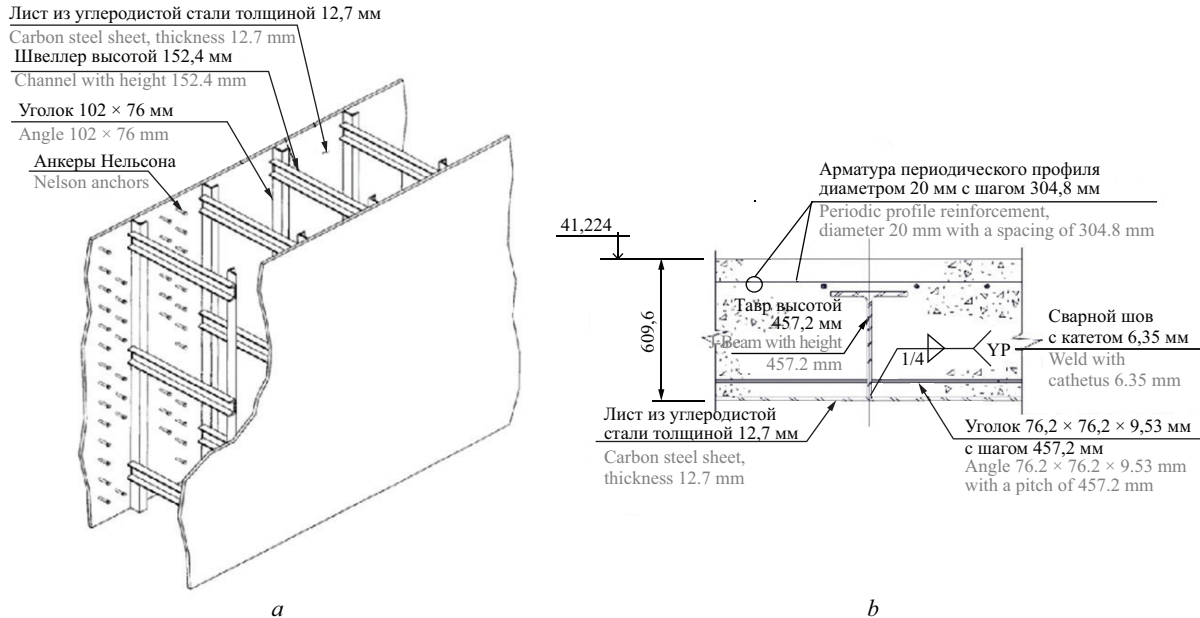


Рис. 4. Принципиальная конструкция типовых SC блок-модулей СА, проект AP-1000, Westinghouse (США) с внешним листовым армированием³: а — стеновой блок; б — блок перекрытия

Fig. 4. Principle design of typical SC unit-modules CA, project AR-1000, Westinghouse (USA) with external sheet reinforcement³: а — wall unit; б — floor unit

Изготовление блок-модулей СА при строительстве АЭС V.C. Summer и Vogle осуществлялось на производственной площадке компании Shaw Group, которая в Луизиане (США)¹⁰ возвела с этой целью самостоятельный производственный комплекс, включающий [10]: сборочный цех (габаритами (длина × ширина × высота) — 152,4 × (21,34–33,5) × (12,2–21,34) м, с возможностью сборки конструкций высотой до 15,24 м внутри цеха); административное здание (площадью 761,8 м²); учебный центр (929,03 м²). Кроме того, производственный комплекс имел доступ к отгрузке полуфабрикатов (блок-модулей СА) на баржу [10].

Вид на производственную площадку и технологическую линию сборки блок-модулей СА для АЭС V.C. Summer и Vogle показан на рис. 5, 6, процесс их изготовления — на рис. 7.

Дальнейшая доставка на строительную площадку блок-модулей СА, как правило, осуществляется стандартным тягачом с открытым полуприцепом или при помощи железнодорожного транспорта [14].

Изначально сборка крупных блоков СА из блок-модулей предполагалась на отдельной открытой сборочной площадке близ строительства АЭС (рис. 8) с последующей доставкой укрупненных блоков в зону действия основного монтажного крана, именно такая схема организована при возведении AP-1000 на АЭС Sanmen (Китай) (рис. 9).

Как правило, сборочная площадка обслуживается как козловым, так и краном высокой грузоподъемности. Первый используется для укрупнения блоков СА на стенде (рис. 10), второй — для кантовки предварительно укрупненных частей и окончательной сборки сверхкрупных блоков СА (рис. 11).

Примечательно, что укрупненные элементы блока СА20 раскрепляются на стенде при помощи оттяжек, вследствие чего следует предусмотреть соответствующее пространство вокруг для возможности организации такого раскрепления (рис. 11).

Укрупнительная сборка блоков СА из соответствующих блок-модулей на площадках строящихся АЭС в США была организована в специальном временном здании (рис. 12), располагаемом в габаритах строительной площадки станции (рис. 13).

Временное здание для укрупнительной сборки блоков СА01 и СА20 проектируется с учетом ведения работ параллельно друг другу, оно оборудуется четырьмя мостовыми кранами грузоподъемностью по 50 т каждый [9]. Конструкции временного раскрепления при сборке в таком случае уже опираются непосредственно на силовую плиту пола [17].

При производстве работ по укрупнению блоков СА на площадках строящихся АЭС, таких как Sanmen (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США), был получен производственный опыт, из которого следует, что сборку лучше производить во временном цехе на площадке строительства АЭС, а не на открытых сборочных участках, поскольку так можно нивелировать влияние погодных условий. При сварке отдельных блок-модулей СА могут деформироваться длинные и тонкие стальные

¹⁰ Shaw возобновила выпуск модулей для блоков с AP-1000 // Атомная энергия 2.0. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/05/06/24285>

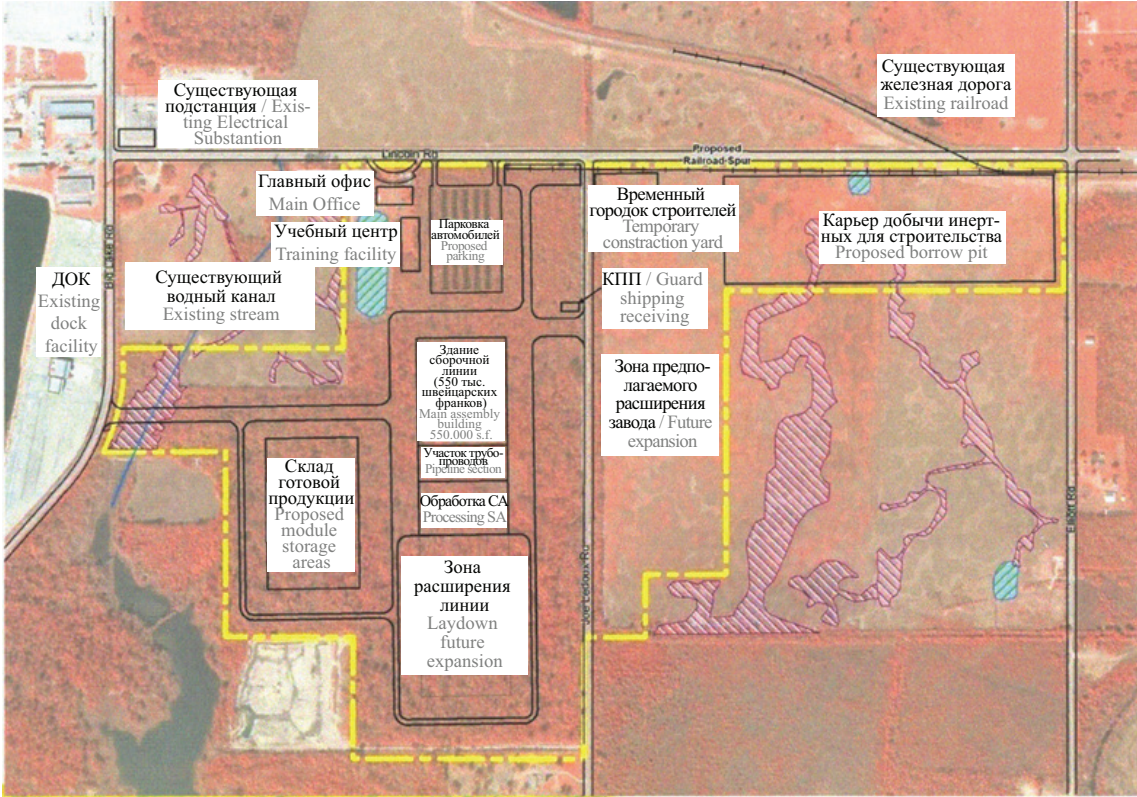


Рис. 5. Схема генерального плана производственной площадки Shaw Group для сборки блок-модулей СА в Луизиане (США) [13]
Fig. 5. Schematic of the master plan of the Shaw Group production site for assembly of CA unit modules in Louisiana (USA) [13]

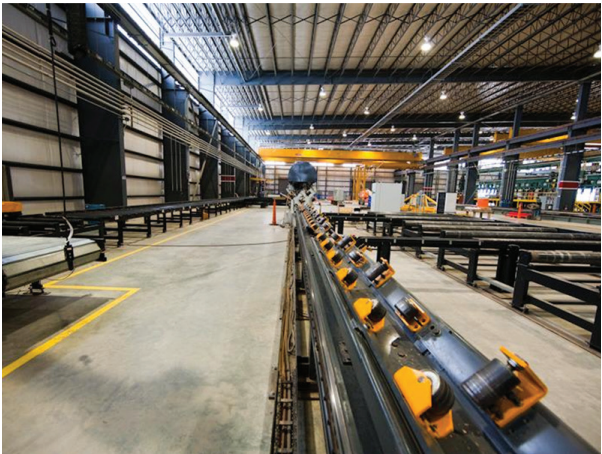
листы конструкций, поэтому предпочтительно сваривать их в вертикальном положении, что позволяет снизить нагрузку от собственного веса и, как следствие, уменьшить деформации элементов блоков и термическое влияние сварки. Необходимо обеспечить сборочные площадки достаточным количеством квалифицированных сварщиков; использовать методы предварительной термообработки конструкций перед их сваркой; усилить входной

контроль, т.е. осматривать комплектующие тщательно и до сборки блок-модулей, а также тщательнее контролировать геометрию, в том числе и общую геометрию укрупняемого блока, так как при изготовлении блок-модулей и их сборке накапливаются общие отклонения [10, 15].

Крупные блоки СА доставляются в зону действия основного монтажного крана на транспортной самоходной тележке (шасси на пневмоколесном



a



b

Рис. 6. Вид на технологическую линию сборки блок-модулей СА на заводе-изготовителе Shaw Group в Луизиане, США [10]
Fig. 6. View of the process line for assembly of CA unit modules at the manufacturing plant of Shaw Group in Louisiana, USA [10]

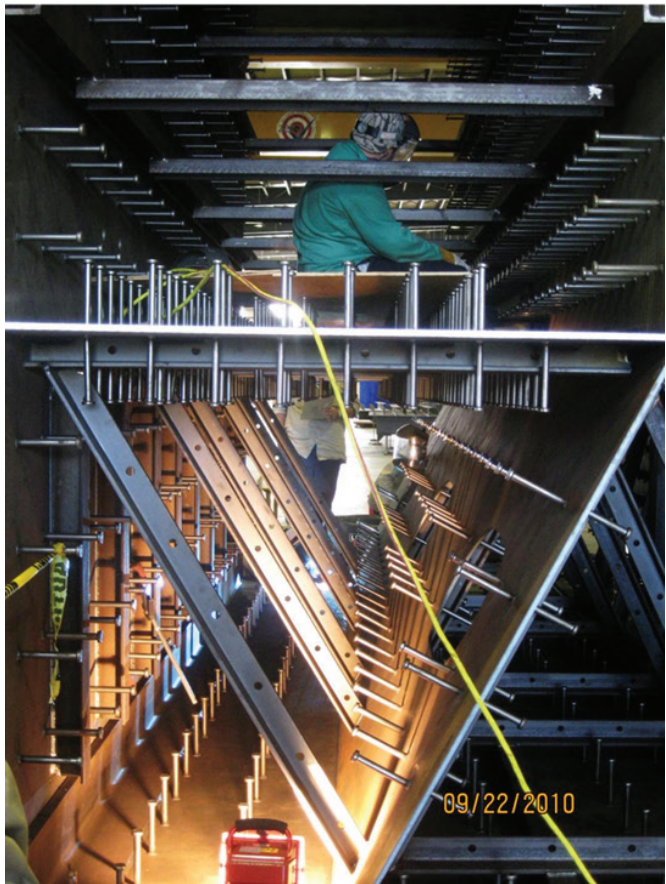


Рис. 7. Процесс изготовления блок-модулей CA на заводе Shaw Group в Луизиане, США [10]
Fig. 7. Manufacturing process of CA unit modules at Shaw Group plant in Louisiana, USA [10]

ходу) марки Kamag (рис. 14), после чего монтируются в проектное положение краном высокой грузоподъемности (рис. 15).
Опыт, полученный при транспортировке крупных блоков CA на АЭС Sanmen в Китае, показывает, что при соответствующем перемещении со сборочной площадки в основную зону монтажа на двух самоходных тележках блок получил значительные деформации, что было учтено при строительстве АЭС

Vogtle (США)¹¹, где перемещение осуществлялось на трех тележках [10].
На монтаже крупных блоков CA из опыта возведения АЭС Sanmen, V.C. Summer и Vogtle следует, что необходимо [10, 15] выполнять выравнивание блоков во время подъема основным монтажным краном с использованием корзины противовеса;
¹¹ TimeLapse CA01 Placement at Vogtle. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wVUB0eU91BI>

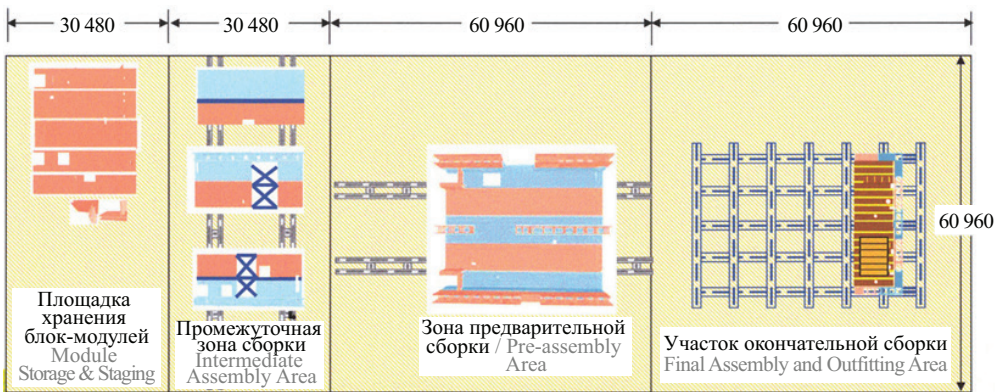


Рис. 8. План-схема открытой сборочной площадки, размеры указаны в мм [13]
Fig. 8. Plan diagram of the open assembly area, dimensions in mm [13]



Рис. 9. Сборочная площадка АЭС Sanmen (Китай) [15]

Fig. 9. View of the assembly site of Sanmen NPP (China) [15]

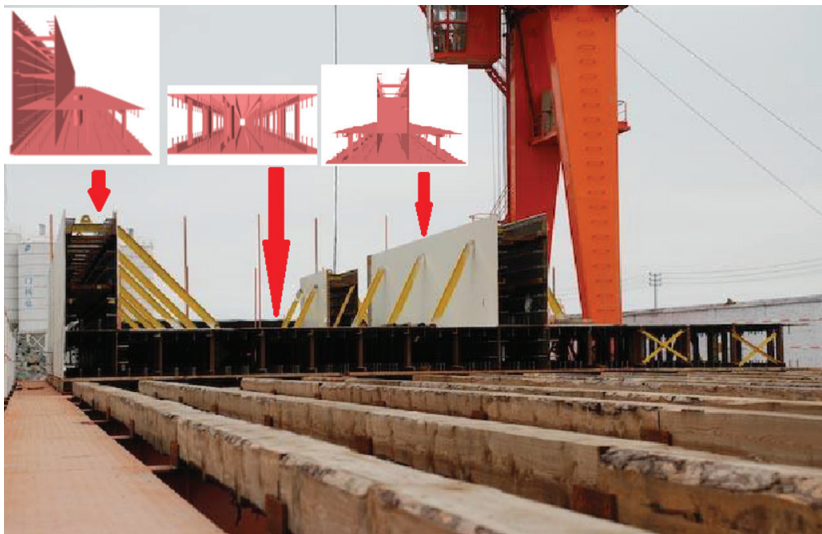


Рис. 10. Укрупнение отдельных блок-модулей СА для блока СА20 на стенде, обслуживаемым козловым краном, АЭС Sanmen (Китай) [10]

Fig. 10. Aggregation of individual CA unit modules for unit CA20 on the stand with a gantry crane, Sanmen NPP (China) [10]



Рис. 11. Вывешивание и сборка предварительно укрупненных на стенде элементов блока СА20 краном высокой грузоподъемности на АЭС Sanmen (Китай)⁹ [10]

Fig. 11. Aggregation of individual CA unit modules for unit CA20 on the stand with a gantry crane, Sanmen NPP (China)⁹ [10]

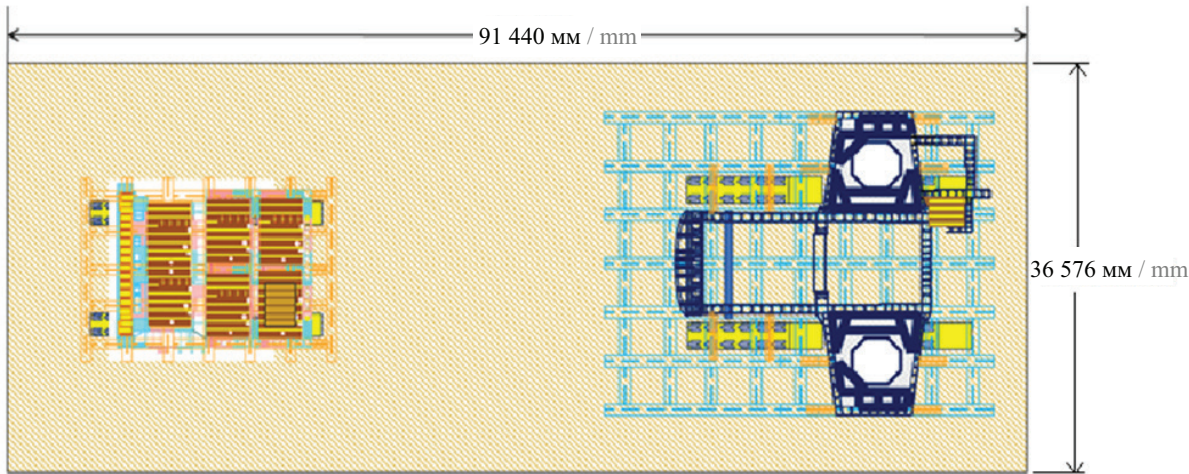


Рис. 12. Функциональная схема временного здания (Module Assembly Building) для сборки крупных блоков CA01 и CA20, АЭС Vogtle и V.C. Summer (США) [10]

Fig. 12. Functional diagram of the temporary building (Module Assembly Building) for assembly of large units CA01 and CA20, Vogtle and V.C. Summer NPP (USA) [10]

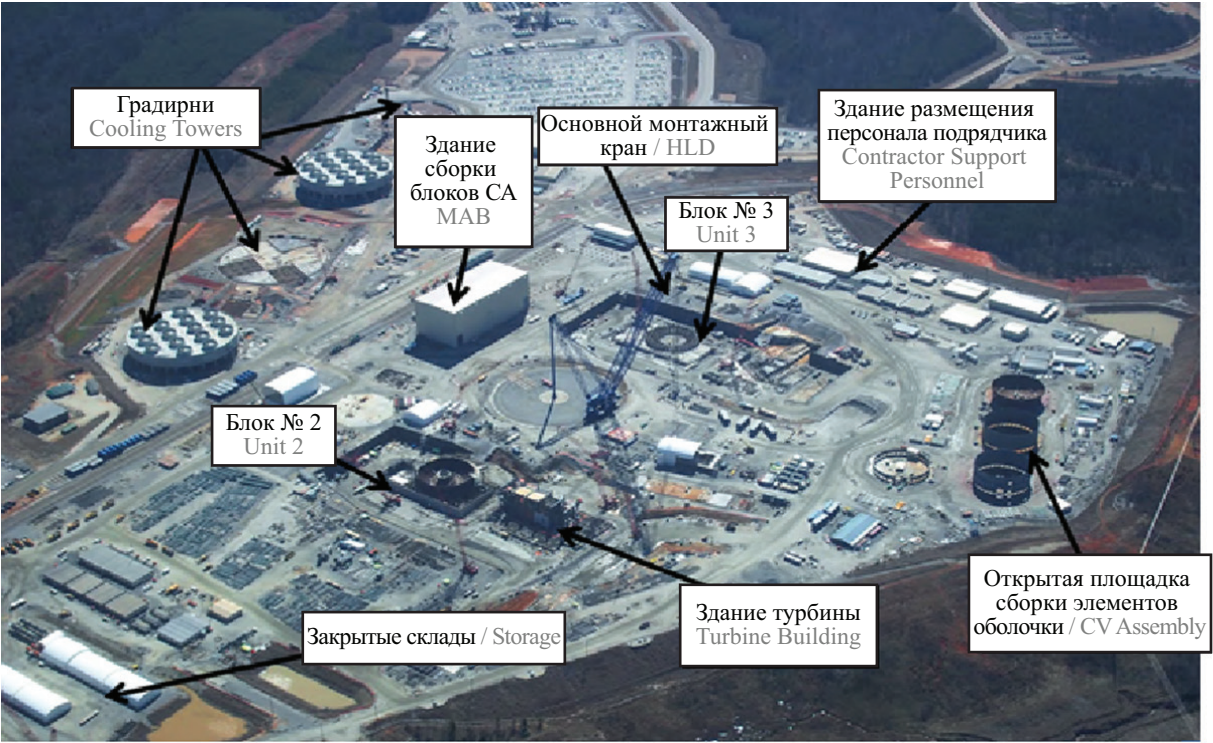


Рис. 13. Вид на общую организацию строительной площадки АЭС V.C. Summer (США) в основной период производства работ [16]

Fig. 13. View of the general organization of the construction site of V.C. Summer NPP (USA) during the main period of works [16]

обеспечить монтажные горизонты достаточным количеством квалифицированных сварщиков; усовершенствовать конструкцию и процессы изготовления крестовины подъемной траверсы; обеспечить необходимую точность монтажа крупного блока с контролем в нескольких точках (так как от погрешности зависит будущее совмещение технологических трубопроводов, где требования к допускам выше),

а также обеспечить завершение малярных работ и работ по нанесению антикоррозионного покрытия до начала монтажа блока в проектное положение.

На площадках строительства АЭС в Китае по проекту AP-1000 применялись самоходные краны на гусеничном ходу грузоподъемностью 2600 и 3200 т, также были задействованы два 400-тонных крана [15].

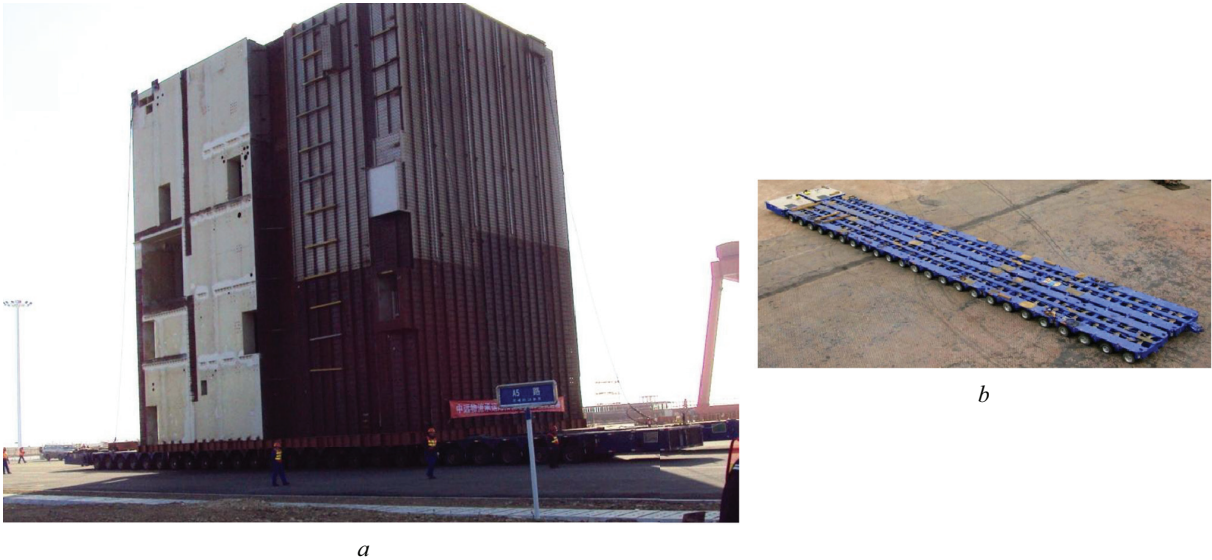


Рис. 14. Доставка блока CA20 на транспортных самоходных тележках, АЭС Sanmen (Китай): *a* — этап перемещения блока CA20 с площадки укрупнительной сборки; *b* — вид на транспортную самоходную тележку (грузоподъемность 1000 или 400 т (в зависимости от типа блока)) [10, 15]

Fig. 14. Delivery of the unit CA20 on self-propelled transport trucks, Sanmen NPP (China): *a* — the stage of moving the unit CA20 from the site of consolidation assembly; *b* — view of the self-propelled transport truck (load capacity 1,000 or 400 tons (depending on the type of the unit)) [10, 15]

Общая схема механизации при монтаже крупных блоков в США отличается от проектов, реализованных в Китае: строительная площадка обслуживается полярным краном Bigge 125D A-Frame Ring



Рис. 15. Монтаж крупного блока CA20 в проектное положение, масса блока — 1000 т, грузоподъемность монтажного крана Lampson — 3200 т, АЭС Sanmen (Китай) [15]

Fig. 15. Installation of large unit CA20 in the design position, unit mass — 1,000 tons, lifting capacity of the Lampson erection crane — 3,200 tons, Sanmen NPP (China) [15]

Derrick на железнодорожном ходу, который располагается между двумя строящимися энергоблоками и обслуживает возведение обоих (см. рис. 14, 17).

Некоторые технические характеристики крана Bigge 125D A-Frame Ring (рис. 16) Derrick приведены в табл. 2.

Примечательно, что для монтажа оборудования, в частности корпуса реактора, на блоке № 3 АЭС Vogtle (США) использовался кран на гусеничном ходу Lampson Transi-lift-2600, грузоподъемностью 2600 т¹².

¹² Plant Vogtle — Waynesboro, GA // Lampson International LLC. URL: <https://www.lampsoncrane.com/project/plant-vogtle-waynesboro-georgia2/>

Некоторые фактические массогабаритные характеристики для блоков СА01 и СА20 реализованных проектов CAP-1000 и AP-1000 приведены в табл. 3.

Для сравнения, в проекте APR-1400 (TEPCO) наиболее рациональными были приняты модули среднего размера (весом около 520 т) с их последующим монтажом гусеничными кранами — Lampson LTL-2600 и Liebherr LR11350 [6].

Так как на сегодняшний день не существует эффективного метода контроля укладки бетонной смеси в тело массивных конструкций с внешним листовым армированием, в работе³, где предусмотрена укладка самоуплотняющейся бетонной смеси, обращено внимание на необходимость проведения контроля технологических параметров ее укладки.



Рис. 16. Монтаж блока СА01 сверхмощным краном Bigge 125D A-Frame Ring Derrick на АЭС V.C. Summer (США)¹³

Fig. 16. Assembly of unit CA01 by heavy-duty crane Bigge 125D A-Frame Ring Derrick at V.C. Summer NPP (USA)¹³

¹³ World's largest crane places V.C. Summer module // Newberry Observer. URL: <https://www.newberryobserver.com/news/1170/worlds-largest-crane-places-v-c-summer-module>

Табл. 2. Основные технические характеристики крана Bigge 125D A-Frame Ring Derrick¹⁴

Table 2. Main technical characteristics of the crane Bigge 125D A-Frame Ring Derrick¹⁴

Характеристика Name of characteristic	Показатель Indicator
Максимальная грузоподъемность, т Maximum lifting capacity, t	6800
Максимальная высота подъема стрелы, м Maximum boom lift height, m	170,7
Минимальный рабочий радиус, м Minimum working radius, m	93,04
Ширина железнодорожного пути, м Railroad track width, m	9,75
Максимальное давление на грунт, тс/м ² Maximum ground pressure, t/m ²	До 29,29 / To 29.29
Мощность дизельного двигателя, л. с. Diesel engine power, h. p.	3450
Расход топлива на полной мощности, л/ч Fuel consumption at full power, l/h	632,16

Табл. 3. Массогабаритные характеристики для блоков CA01 и CA20 реализованных проектов CAP-1000 и AP-1000^{15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25} [18]

Table 3. Mass and dimensional characteristics for units CA01 and CA20 of the realized projects CAP-1000 and AP-1000^{15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25} [18]

Наименование АЭС Name of NPP	Проект Project	Массогабаритные характеристики крупных блоков CA01 и CA20 Mass and dimensional characteristics of large units CA01 and CA20			
		Блок CA01 Unit CA01		Блок CA20 Unit CA20	
		габариты (длина × шири- на × высота), м dimensions (length × × width × height), m	масса, т mass, t	габариты (длина × ши- рина × высота), м dimensions (length × × width × height), m	масса, т mass, t
V.C. Summer (США) (блок № 2) V.C. Summer (USA) (unit No. 2)	AP-1000	~27,0 × 29,0 × 24,0	1089,0	–	>1000,0
Vogle (США) (блок № 4) Vogle (USA) (unit No. 4)	AP-1000	21,34 × 27,43 × 2 4,38	907,18	20,42 × 14,33	1000,0**
Vogle (США) (блок № 3) Vogle (USA) (unit No. 3)	AP-1000	21,0 × 29,0 × 24,0	907,0	–	>1000,0
Sanmen (Китай) (блок № 1) Sanmen (China) (unit No. 1)	AP-1000	26,74 × 28,96 × 23,47*	–	–	–
Sanmen (Китай) (блок № 3) Sanmen (China) (unit No. 3)	CAP-1000	–	–	20,5 × 14,1 × 20,9	1100,0
Sanmen (Китай) (блок № 4) Sanmen (China) (unit No. 4)	CAP-1000	>27,0 × 29,0 × 24,0	1046,2	20,5 × 14,1 × 20,9	1024,0
Xudabao (Китай) (блок № 1) Xudabao (China) (unit No. 1)	CAP-1000	–	–	20,6 × 14,2 × 21,0	>1000,0
Lianjiang (Китай) (блок № 1) Lianjiang (China) (unit No. 1)	CAP-1000	28,0 × 29,0 × 24,0*	1066,0	–	1049,0

Примечание: * — продолжительность монтажа блока составила 3 ч 18 мин, состоящего из 47 подмодулей; ** — про-
должительность монтажа блока — около 3 ч.

Note: * — duration of installation of the unit was 3 hours and 18 minutes, the unit consists of 47 submodules; ** — duration
of unit installation is about 3 hours.

¹⁴ BIGGE 125D AFRD. Crawler Crane Information // Bigge Crane and Rigging Co. URL: <https://www.bigge.com/crane-information/bigge-125d-afrd/#:~:text=Equipped%20with%20a%20560%20ft,29.7%20acres%20of%20hook%20coverage>

¹⁵ Landmark module installation at VC Summer // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Landmark-module-installation-at-VC-Summer>

Опыт, полученный при бетонировании крупных монтажных блоков СА на площадках АЭС Sanmen (Китай), V.C. Summer и Vogtle (США), показывает, что [10]: необходимо более тщательно подходить к подбору компонентов бетонной смеси, а также обеспечить эффективный контроль ее состава и характеристик окружающей среды, включая температуру, влажность и ветер; корректно рассчитывать или сократить продолжительность доставки бетонной смеси от бетонного завода до места укладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрев практический опыт применения конструкций с внешним листовым армированием на атомных станциях, выполненных по проектам AP-1000 и CAP-1000, с учетом проработок для проекта APR-1400, можно сделать следующие выводы.

Основным методом возведения при реализации проектов АЭС с конструкциями SC являлся монтаж сверхкрупными блоками по технологии open-top, при этом пространственная организация строительной площадки значительным образом изменяется:

- появляется необходимость в использовании кранов высокой (или сверхвысокой) грузоподъемности, наличии специального транспорта доставки;
- следует довольно близко размещать площадку укрупнительной сборки или сборочный цех (последний перспективнее по опыту реализации проекта AP-1000), оснащенные соответствующими самостоятельными грузоподъемными кранами, а также устраивать широкие дороги с капитальным покрытием, связывающие участок монтажа с участком укрупнительной сборки, что приводит к необходимости изменения подготовительного периода строительства АЭС и напрямую влияет на капиталовложения в подготовительный период строительства АЭС;

- отсутствует значительный объем работ, связанный с процессами армирования, монтажа и демонтажа опалубочных систем в пределах основного графика строительства АЭС, что позволяет несколько «разгрузить» пространство вокруг строящегося блока, приводит к меньшей зависимости от поставок арматурных блоков;

- появляется необходимость в жестком контроле допусков монтажа, качества сборки блоков, их антикоррозионной обработки, что меняет структуру стандартных операций на строительной площадке при возведении АЭС.

Предварительное изготовление блок-модулей SC на заводах гражданской инфраструктуры (а не на приобъектной строительной-монтажной базе) дает возможность, с одной стороны, сократить количество выполняемых операций и задач (как следствие и персонала) в пределах строящегося объекта, с другой — приводит к необходимости жесткого контроля логистических рисков, а также накладывает ряд ограничений и зависимостей от сопутствующих процессов, так:

- появляется необходимость в готовности полного объема рабочей документации объекта строительства до начала производства работ на площадке, т.е. фактически еще в подготовительный период, поскольку следует обеспечить закупку соответствующих материалов;
- усиливается зависимость от качества рабочей документации, а также от количества будущих в ней изменений.

Управление логистикой (транспортировка блок-модулей и укрупненных блоков, их обработка различными составами и первичная обработка (на приемке), сварочные испытания, а также соответствующие контрольные мероприятия)) при использовании конструкций SC вызывает сложности, по сравнению с традиционными решениями, появляется необходи-

¹⁶ Milestone for US Vogtle NPP // Nuclear Engineering International. URL: <https://www.neimagazine.com/news/milestone-for-us-vogtle-npp-4836949/?cf-view&cf-closed>

¹⁷ Installation of CA20 module at China's Lianjiang NPP 1 // Heat Exchanger World. URL: <https://heat-exchanger-world.com/installation-of-ca20-module-at-chinas-lianjiang-npp-1/>

¹⁸ CA20 Module Placed at New V.C. Summer Reactor // NuclearStreet. URL: https://nuclearstreet.com/nuclear_power_industry_news/b/nuclear_power_news/archive/2014/05/15/ca20-module-placed-at-new-v.c.-summer-reactor-041502

¹⁹ Super module installed at first Lianjiang unit // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Super-module-installed-at-first-Lianjiang-unit>

²⁰ Largest module installed at Sanmen 3 // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Largest-module-installed-at-Sanmen-3>

²¹ 2 million-pound CA20 module safely lifted into Vogtle Unit 4 nuclear island // PR Newswire. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/2-million-pound-ca20-module-safely-lifted-into-vogtle-unit-4-nuclear-island-300316564.html>

²² Westinghouse Achieves Major Milestones at Vogtle AP1000 Plant // Westinghouse. URL: <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-achieves-major-milestones-at-vogtle-ap1000-plant>

²³ Landmark Module Installation at Sanmen 4 // Promoter of World Energy Cooperation. URL: <https://www.world-energy.org/article/36230.html>

²⁴ Key module installed at unit 4 of China's Sanmen NPP // Nuclear Engineering International. URL: <https://www.neimagazine.com/news/key-module-installed-at-unit-4-of-chinas-sanmen-npp-10836076/?cf-view>

²⁵ Major module installed at Xudabao 1 // World Nuclear News. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Major-module-installed-at-Xudabao-1>

мость осуществлять фактически непрерывную координацию между различными направлениями деятельности при строительстве АЭС с такими конструкциями, обеспечить дополнительное взаимодействие различных структур между собой и их графиков производства работ.

Из-за отсутствия эффективных методов контроля качества укладываемой бетонной смеси возникают как конструктивные ограничения, обусловленные необходимостью визуального мониторинга, так и сопутствующие, традиционные проблемы, связанные с использованием самоуплотняющихся бетонных смесей, такие как: тщательный контроль состава и характеристик окружающей среды, сокращение времени доставки смеси и т.д.

В целом можно отметить, что в отчете МАГАТЭ «Технологии строительства атомных станций» (№ NP-T-2.5) от 2011 г.¹ практика применения модульных конструкций с внешним листовым армированием на стройках АЭС отмечается как наилучшая. Отчет, подготовленный Агентством по ядерной энергии в рамках Организации экономического сотрудничества и развития от 2020 г. [8], дает представление о технико-экономическом эффекте применения указанных выше конструкций, в частности, следует ожидать сокращения по времени реализации станции на 40 %, а снижения затрат на 20 % [8]. Соответственно развитие данной технологии в отечественных проектах АЭС позволит значительно повысить их конкурентоспособность на мировом рынке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shykinov N., Rulko R., Mroz D.* Importance of advanced planning of manufacturing for nuclear industry // *Management and Production Engineering Review*. 2016. Vol. 7. Issue 2. Pp. 42–49. DOI: 10.1515/MPER-2016-0016
2. *Соловьева А.П., Харитонов В.В., Шмаков О.Г.* Влияние задержек в строительстве АЭС на эффективность инвестиций // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2018. № 3. С. 52–62. DOI: 10.26583/npe.2018.3.05. EDN YYCGKT.
3. *Пергаменичик Б.К.* Проблемы и перспективы строительства АЭС // *Вестник МГСУ*. 2014. № 2. С. 140–152.
4. *Пергаменичик Б.К., Темшиев Р.Р.* Изменение величины трудозатрат при укрупнении специальных конструкций АЭС // *Вестник МГСУ*. 2012. № 1. С. 138–143. EDN PCITJB.
5. *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.
6. *Mun Tae Youp, Sun Won Sang, Kim Keun Kyeong, Lee Ung Kwon.* A study on the constructability of steel plate concrete structure for nuclear power plant // *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju*. 2008. Pp. 755–756.
7. *Burgan B., Kyprianou C., Bingham S., Waterhouse S.* A novel steel–concrete composite system for modular nuclear reactors // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*. 2017. Vol. 170. Issue 2. Pp. 80–90. DOI: 10.1680/jener.16.00022
8. *Akiyama H., Sekimoto H., Fukihara M., Nakanishi K., Hara K.* A compression and shear loading tests of concrete filled steel bearing wall // *11nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-11)*. 1991. Vol. H. Issue 12/2. Pp. 323–328.
9. *Bruhl J.C., Varma A.H., Johnson W.H.* Design of SC composite walls for projectile impact: local failure // *22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*. 2013. Division X. Pp. 1–10.
10. *Merrifield J.* Nuclear Construction 101 // *Shaw's Power Group, Nuclear Regulatory Commission (NRC)*. 2011. 127 p.
11. *Larson A.* 85 % of Major Equipment Delivered to V.C. Summer Nuclear Power Plant Construction Site // *POWER Magazine*. 2016. URL: <https://www.powermag.com/85-of-major-equipment-delivered-to-v-c-summer-nuclear-power-plant-construction-site/>
12. *Walker B.* Modular design and benefits // *ASME Nuclear Technical Seminars: Blueprint for New Build*. 2011. 42 p. URL: <https://files.asme.org/Events/NTS2011/28766.pdf>
13. *Niemer K., Martin J.* AP-1000 Module Status NRC Region II // *SNC Meeting, Birmingham: “Shaw”, “Nuclear Regulatory Commission” (NRC)*. 2009. 52 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091480384.pdf>
14. *Larson A.* Last Major Module Received at Vogtle Nuclear Site // *POWER Magazine*. 2019. URL: <https://www.powermag.com/last-major-module-received-at-vogtle-nuclear-site/>
15. *Deng X.* Modularization Construction Experiences of World First AP1000 Unit // *IAEA workshop*. 2011. 57 p. URL: <https://studylib.net/doc/18793120/modularization-construction-of-world-first-ap1000-unit>
16. *Torres A.* VC Summer Unit 2/3 Update // *SCANA/South Carolina Electric & Gas*. 2014. 21 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1414/ML14141-A402.pdf>
17. *Varma A.H.* Composite concrete construction: modularity, innovation, resilience and sustainability through design // *Purdue University*. 2016. 29 p. URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/1-4.-Composite-Concrete-Construction-MIT-2017-min.pdf>
18. *Chunlin Hou.* Nuclear Regulations in China, Status of Sanmen NPP Construction and Experience Gained at NRC // *Nuclear Regulatory Commission*. 2010. 29 p. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102990200.pdf>

Поступила в редакцию 9 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 19 августа 2024 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Николаевич Коротких** — доктор технических наук, заместитель руководителя ЦФО «Наука и технологии»; **Институт «Оргэнергострой» (ОЭС)**; 115114, г. Москва, Дербеневская набережная, д. 7, стр. 10; профессор кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6391-7829, Scopus: 57205435199, ResearcherID: R-9413-2018, ORCID: 0000-0002-5041-0847; Korotkih.dmitry@gmail.com;

Олег Александрович Корнев — заместитель директора Научно-исследовательского института экспериментальной механики (НИИ ЭМ); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PИНЦ ID: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Вячеслав Васильевич Белов — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6936-1160, Scopus: 57218418373, ResearcherID: ABY-2103-2022, ORCID: 0000-0002-6246-6100; BelovVV@mgsu.ru;

Александр Сергеевич Силантьев — кандидат технических наук, начальник Центра математического моделирования строительных конструкций зданий и сооружений (ЦММСКЗиС); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; silantievas@structure.center;

Дмитрий Егорович Капустин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры испытаний сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru.

Вклад авторов:

Коротких Д.Н. — руководство исследованием.

Корнев О.А. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Белов В.В. — поиск и анализ информации по теме исследования, систематизация полученных результатов.

Силантьев А.С. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Капустин Д.Е. — поиск и анализ информации по теме исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Shykinov N., Rulko R., Mroz D. Importance of Advanced Planning of Manufacturing for Nuclear Industry. *Management and Production Engineering Review*. 2016; 7(2):42-49. DOI: 10.1515/MPER-2016-0016
2. Soloveva A.P., Kharitonov V.V., Shmakov O.G. Effect of delays in NPP construction on investment efficiency. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018; 3:52-62. DOI: 10.26583/npe.2018.3.05. EDN YYCGKT. (rus.).
3. Pergamenshchik B.K. Problems and prospects of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 2:140-153. (rus.).
4. Pergamenshchik B.K., Temishev R.R. Change in the labor costs at integration of special design NPP. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 1:138-143. EDN PCITJB. (rus.).
5. 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.).
6. Mun Tae Youp, Sun Won Sang, Kim Keun Kyeong, Lee Ung Kwon. A study on the constructability of steel plate concrete structure for nuclear power plant. *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Gyeongju*. 2008; 755-756.
7. Burgan B., Kyprianou C., Bingham S., Waterhouse S. A novel steel-concrete composite system for modular nuclear reactors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Energy*. 2017; 170(2):80-90. DOI: 10.1680/jener.16.00022
8. Akiyama H., Sekimoto H., Fukihara M., Nakanishi K., Hara K. A compression and shear loading tests of concrete filled steel bearing wall. *11th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-11)*. 1991; H(12/2):323-328.
9. Bruhl J.C., Varma A.H., Johnson W.H. Design of SC composite walls for projectile impact: local fail-

ure. *22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*. 2013; X:1-10.

10. Merrifield J. Nuclear Construction 101. *Shaw's Power Group, Nuclear Regulatory Commission (NRC)*. 2011; 127. URL: https://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/document/2011/merrifield_supplychain.pdf

11. Larson A. 85 % of major equipment delivered to V.C. Summer Nuclear Power Plant Construction Site. *POWER Magazine*. 2016. URL: <https://www.powermag.com/85-of-major-equipment-delivered-to-v-c-summer-nuclear-power-plant-construction-site/>

12. Walker B. Modular design and benefits. *ASME Nuclear Technical Seminars: Blueprint for New Build*. 2011; 42. URL: <https://files.asme.org/Events/NTS2011/28766.pdf>

13. Niemer K., Martin J. AP-1000 Module Status NRC Region II. *SNC Meeting. Birmingham: "Shaw", "Nuclear Regulatory Commission" (NRC)*. 2009; 52. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0914/ML091480384.pdf>

14. Larson A. Last Major Module Received at Vogtle Nuclear Site. *POWER Magazine*. 2019. URL: <https://www.powermag.com/last-major-module-received-at-vogtle-nuclear-site/>

15. Deng X. Modularization Construction Experiences of World First AP1000 Unit. *IAEA workshop*. 2011; 57. URL: <https://studylib.net/doc/18793120/modularization-construction-of-world-first-ap1000-unit>

16. Torres A. VC Summer Unit 2/3 Update. *SCANA/South Carolina Electric & Gas*. 2014; 21. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1414/ML14141A402.pdf>

17. Varma A.H. Composite concrete construction: modularity, innovation, resilience and sustainability through design. *Purdue University*. 2016; 29. URL: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/1-4.-Composite-Concrete-Construction-MIT-2017-min.pdf>

18. Chunlin Hou. Nuclear Regulations in China, Status of Sanmen NPP Construction and Experience Gained at NRC. *Nuclear Regulatory Commission*. 2010; 29. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102990200.pdf>

Received August 9, 2024.

Adopted in revised form on August 19, 2024.

Approved for publication on September 9, 2024.

B I O N O T E S: **Dmitrii N. Korotkikh** — Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of the Central Office “Science and Technology”; **Institute Orgenergostroy (OES)**; build. 10, 7 Derbenyevskaya embankment, Moscow, 115114, Russian Federation; Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6391-7829, Scopus: 57205435199, ResearcherID: R-9413-2018, ORCID: 0000-0002-5041-0847; Korotkih.dmitry@gmail.com;

Oleg A. Kornev — Deputy Director of the Research Institute of Experimental Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 878952, Scopus: 57204881147, ORCID: 0009-0009-5545-5284; i@okornev.ru;

Vyacheslav V. Belov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of thermal and nuclear power facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6936-1160, Scopus: 57218418373, ResearcherID: ABY-2103-2022, ORCID: 0000-0002-6246-6100; BelovVV@mgsu.ru;

Alexander S. Silantiev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Mathematical Modeling of Building Structures and Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; silantievas@structure.center;

Dmitrii E. Kapustin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Testing of Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 0000-0002-6493-1301; kde90@bk.ru.

Contribution of the authors:

Dmitrii N. Korotkikh — research management.

Oleg A. Kornev — search and analysis of information on the research topic.

Vyacheslav V. Belov — search and analysis of information on the research topic, systematization of the obtained results.

Alexander S. Silantiev — search and analysis of information on the research topic.

Dmitrii E. Kapustin — search and analysis of information on the topic of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.