

И.Н. ТИХОНОВ<sup>1,2,✉</sup>, В.Г. КРЮЧКОВ<sup>1</sup>, А.И. ЗВЕЗДОВ<sup>1</sup>, Б.С. СОКОЛОВ<sup>2</sup>, Г.И. ТИХОНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6,  
г. Москва, 109428, Российская Федерация

<sup>2</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт  
бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,  
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

# КОНСТРУКТИВНАЯ РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА АЭС ИЗ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

## Аннотация

**Введение.** В данной работе приводятся материалы, обосновывающие внедрение нового конструктивного решения железобетонной защитной оболочки ядерного реактора АЭС в сборном и монолитном исполнении.

**Цель.** В числе задач, которые были поставлены при разработке конструктивного решения, основной явилась задача обеспечения работы железобетона на сжатие при всех видах нагружения и восприятие растягивающих усилий канатами, находящимися в свободном состоянии, доступными для обслуживания и эксплуатации.

**Материалы и методы.** Расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием программного комплекса для расчета пространственных конструкций на прочность, устойчивость и колебания MicroFe-СтаДиКон.

**Результаты.** Разработано принципиально новое конструктивное решение защитной оболочки ядерного реактора АЭС, состоящей из железобетонных элементов в виде цилиндрических складок с выпуклостью, направленной навстречу возможному внешнему и внутреннему силовому аварийному воздействию, в том числе от взрыва реактора. Разработаны варианты защитных оболочек с проработкой принципиальных технических решений унифицированных складчатых элементов из железобетона с возможностью их монолитного и сборного изготовления. Предложена схема открытого расположения и натяжения пучков тросов с передачей напряжения на предварительно изготовленные конструкции внутренней и внешней частей защитной оболочки.

**Выводы.** Данное конструктивное решение обеспечивает при нагружении сжимающие усилия в железобетоне складок внутренней и внешней частей защитной оболочки от нагрузки, что препятствует образованию в них трещин. Растягивающие усилия в оболочке воспринимаются предварительно напряженной арматурой, расположенной внутри ее конструкции, свободной для обслуживания и контроля. В процессе исследова-

ния разработаны принципиальные решения конструктивных узловых соединений сборных складчатых железобетонных элементов, технологических отверстий в конструкции оболочки и осуществления в ней предварительного напряжения. Сопоставительный технико-экономический анализ предлагаемой и существующей внутренней защитной оболочки показал возможность снижения расхода бетона в 1,5–2 раза, ненапрягаемой арматуры – в 3–4 раза, сроков строительства – в 4 раза.

**Ключевые слова:** АЭС, ядерный реактор, защитная оболочка, железобетон, преднапряженная арматура, складчатые элементы

**Для цитирования:** Тихонов И.Н., Крючков В.Г., Звездов А.И., Соколов Б.С., Тихонов Г.И. Конструктивная разработка и расчетное обоснование защитной оболочки ядерного реактора АЭС из железобетона // *Бетон и железобетон*. 2024. № 1 (620). С. 22–33. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1\(620\)-22-33](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1(620)-22-33)

## Вклад авторов

Тихонов И.Н. – сбор данных, разработка конструктивного решения, анализ результатов расчетов, написание статьи.

Крючков В.Г., Звездов А.И. – разработка конструктивного решения, анализ результатов расчетов.

Соколов Б.С. – разработка конструктивного решения, проведение расчетов, написание статьи.

Тихонов Г.И. – сбор данных, разработка конструктивного решения, написание статьи.

## Финансирование

Исследование финансировалось за счет средств АО «НИЦ «Строительство».

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.02.2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Принята к публикации 07.03.2024

I.N. TIKHONOV<sup>1,2,✉</sup>, V.G. KRYUCHKOV<sup>1</sup>, A.I. ZVEZDOV<sup>1</sup>, B.S. SOKOLOV<sup>2</sup>, G.I. TIKHONOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6,  
Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>2</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev,  
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5,  
Moscow, 109428, Russian Federation

# CONSTRUCTIVE DEVELOPMENT AND DESIGN JUSTIFICATION OF THE PROTECTIVE SHELL OF A NUCLEAR REACTOR MADE OF REINFORCED CONCRETE

## Abstract

**Introduction.** This paper provides materials justifying the introduction of a new constructive solution for the reinforced concrete protective shell of a nuclear reactor in a prefabricated and monolithic design.

**Aim.** Among the tasks that were set during the development of the constructive solution, the main one was to ensure the work of reinforced concrete for compression under all types of loading and the perception of tensile forces by ropes that are in a free state, available for maintenance and operation.

**Materials and methods.** The calculations were performed by the finite element method using a software package MicroFe-StaDiCon for calculation of the spatial structures for strength, stability and vibrations.

**Results.** A fundamentally new constructive solution has been developed for the protective shell of the nuclear reactor of the NPP, consisting of reinforced concrete elements in the form of cylindrical folds with a bulge directed towards possible external and internal force emergency effects, including the explosion of the reactor. Variants of protective shells have been developed with the elaboration of fundamental technical solutions for unified folded elements made of reinforced concrete with the possibility of their monolithic and prefabricated manufacture. A scheme of open arrangement and tensioning of cable bundles with tension transfer to pre-fabricated structures of the inner and outer parts of the protective shell is proposed.

**Conclusions.** This design solution provides compressive forces in reinforced concrete of the folds of the inner and outer parts of the protective shell from the load during loading, which prevents the formation of cracks in them. The tensile forces in the shell are perceived by the prestressed reinforcement located inside its structure, free for maintenance and control. In the process of work, fundamental solutions have been developed for the structural nodal joints of prefabricated folded reinforced concrete el-

ements, technological holes in the shell structure and the implementation of prestressing in it. A comparative technical and economic analysis of the proposed and existing inner protective shell showed the possibility of reducing concrete consumption by 1.5–2 times, non-stressed reinforcement by 3–4 times, construction time by 4 times.

**Keywords:** nuclear power plant, nuclear reactor, protective shell, reinforced concrete, prestressed reinforcement, folded elements

**For citation:** Tikhonov I.N., Kryuchkov V.G., Zvezdov A.I., Sokolov B.S., Tikhonov G.I. Constructive development and design justification of the protective shell of a nuclear reactor made of reinforced concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 1 (620), pp. 22–33. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1\(620\)-22-33](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-1(620)-22-33)

## Author contribution statements

Tikhonov I.N. – data collection, development of a constructive solution, analysis of calculation results, writing an article.

Kryuchkov V.G., Zvezdov A.I. – development of a constructive solution, analysis of calculation results.

Sokolov B.S. – development of a constructive solution, carrying out calculations, writing an article.

Tikhonov G.I. – data collection, development of a constructive solution, writing an article.

## Funding

The study was funded by JSC Research Center of Construction.

## Conflict of interest

Authors declares no conflict of interest.

Received 10.02.2024

Revised 01.03.2024

Accepted 07.03.2024

### Введение

Защитные оболочки атомных электростанций должны обеспечивать безопасность при следующих технологических режимах и внешних воздействиях [1] (рис. 1):

1. Локализация в объеме защитной оболочки последствий распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду в установленных нормами пределах в случае максимально опасной проектной аварии (МПА).

2. Обеспечение безопасных условий эксплуатации реакторной установки, парогенераторов и другого технологического оборудования при любых климатических воздействиях, таких как ветер, ураган, торнадо и др.

3. Защита технологического оборудования герметичного объема реакторного отделения от внешних особых динамических воздействия, таких как ударная волна от возможных взрывов, удар падающих летательных аппаратов.

4. Обеспечение сейсмостойкости строительных конструкций защитной оболочки и размещенного в ней технологического оборудования при сейсмических воздействиях, включая максимальное расчетное землетрясение (МРЗ).

Обзор состояния вопроса по конструктивным решениям защитных оболочек ядерных реакторов по доступным отечественным и зарубежным источникам, в том числе нормативной документации и патентной базе, позволил сделать вывод, что во многих случаях требования российских нормативных документов и принятые на их базе конструктивные решения носят более конкретный и реалистичный характер, чем зарубежные решения и нормы, включая нормы МАГАТЭ [1–20].

Использование российских технологий при сооружении и эксплуатации атомных станций, основанных на российских нормах и правилах, обеспечивает им высокий уровень ядерной и радиационной безопасности, соответствующий современным международным стандартам.

В настоящее время, несмотря на высокую трудоемкость строительства, наибольшее распространение в мировой практике имеют защитные оболочки, изготовленные с использованием предварительно напряженного монолитного железобетона, содержащие внешний и внутренний цилиндрические контуры, имеющие сверху раздельные купольные покрытия, опирающиеся на единое плоское железобетонное плитное основание (рис. 1, 2).

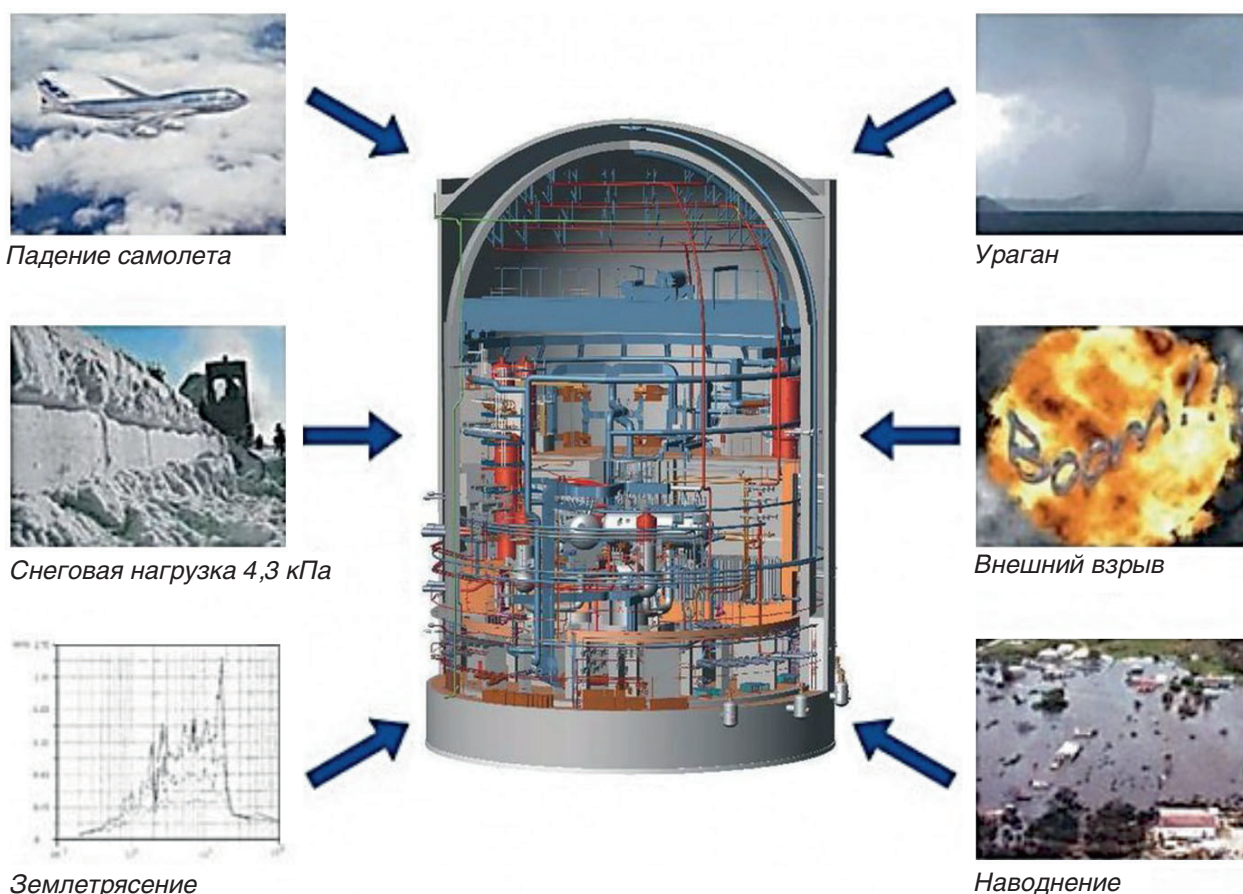
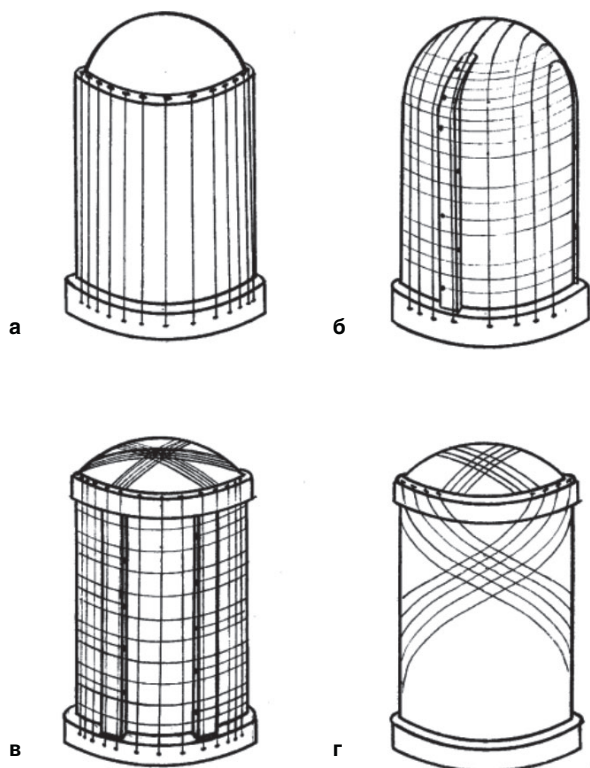


Рис. 1. Устройство защитных оболочек АЭС и внешние воздействия на них  
Fig. 1. The arrangement of NPP protective shells and external influences on them



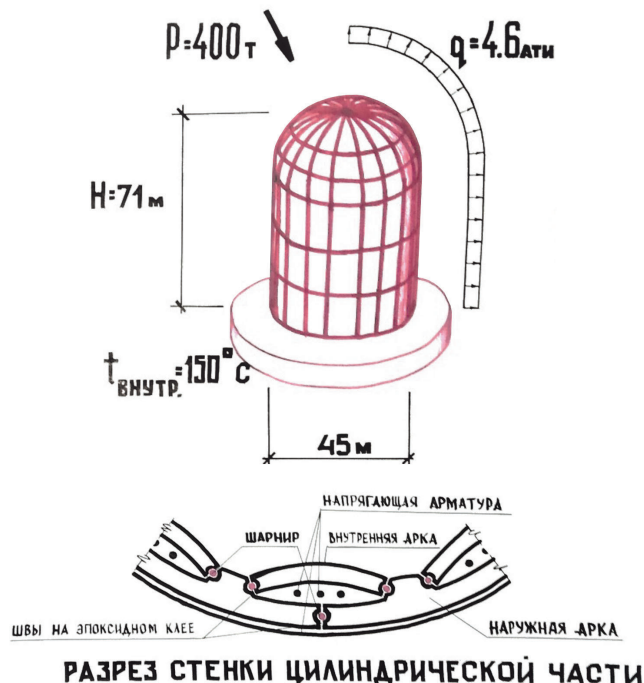


**Рис. 2.** а – частичное преднапряжение цилиндрической части в меридиональном направлении; б – совмещенная (ортогонально-петлевая) схема преднапряжения; в – раздельная ортогональная схема преднапряжения в цилиндре и трехпутная в куполе; г – раздельная геликоидальная (контргеликоидальная) схема преднапряжения в цилиндре и двухпутная в куполе

**Fig. 2.** а – partial prestressing of the cylindrical part in the meridional direction; б – combined (orthogonal-loop) prestressing scheme; в – separate orthogonal prestressing scheme in the cylinder and three-way in the dome; г – separate helicoidal (counterhelicoidal) prestressing scheme in the cylinder and two-way in the dome

Один из вариантов сборных железобетонных защитных оболочек реакторов АЭС, позволяющих значительно ускорить сроки строительства, создавался и исследовался в 80-х годах на Украине [21] (рис. 3, 4). К сожалению, внедрение ограничилось положительными испытаниями модели конструктивного решения в масштабе 1:5.

Учитывая актуальность строительства АЭС в России и за рубежом, увеличиваются требования по безопасности принимаемых конструктивных и технологических решений, по срокам строительства, а также по эксплуатационным затратам. В настоящее время отдается предпочтение высокоскоростным технологиям возведения сооружений основных и вспомогательных объектов, включая укрупненную сборку отдельных конструктивных элементов и укрупненных частей армирования (рис. 5, 6).



**Рис. 3.** Модель полносборной защитной оболочки АЭС  
**Fig. 3.** Model of prefabricated NPP protective shell

Высокоскоростные технологии бетонирования и армирования монолитных железобетонных конструкций с использованием инновационной винтовой арматуры и ее муфтовых соединений, которая обеспечивает до 30 % снижения металлоемкости возводимых конструкций и до 20 % уменьшения трудоемкости, рекомендуются учеными НИИЖБ им. А.А. Гвоздева для применения на объектах массового и специального назначения (рис. 7).

Сотрудники НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» принимают активное участие в работах по совершенствованию строительства АЭС путем внедрения новых бетонов и арматуры, технологии их эффективного применения.

В данной работе приводятся материалы, обосновывающие внедрение нового конструктивного решения железобетонной защитной оболочки ядерного реактора АЭС в сборном и монолитном исполнении.

В числе задач, которые были поставлены при разработке конструктивного решения, основной задачей стало обеспечение работы железобетона на сжатие при всех видах нагружения и восприятие растягивающих усилий канатами, находящимися в свободном состоянии, доступными для обслуживания и эксплуатации. Решение указанных задач выполнялось оптимизацией предложенной конструкции по результатам серии расчетов напряженно-деформированного состояния с варьированием отдельных конструктивных параметров.



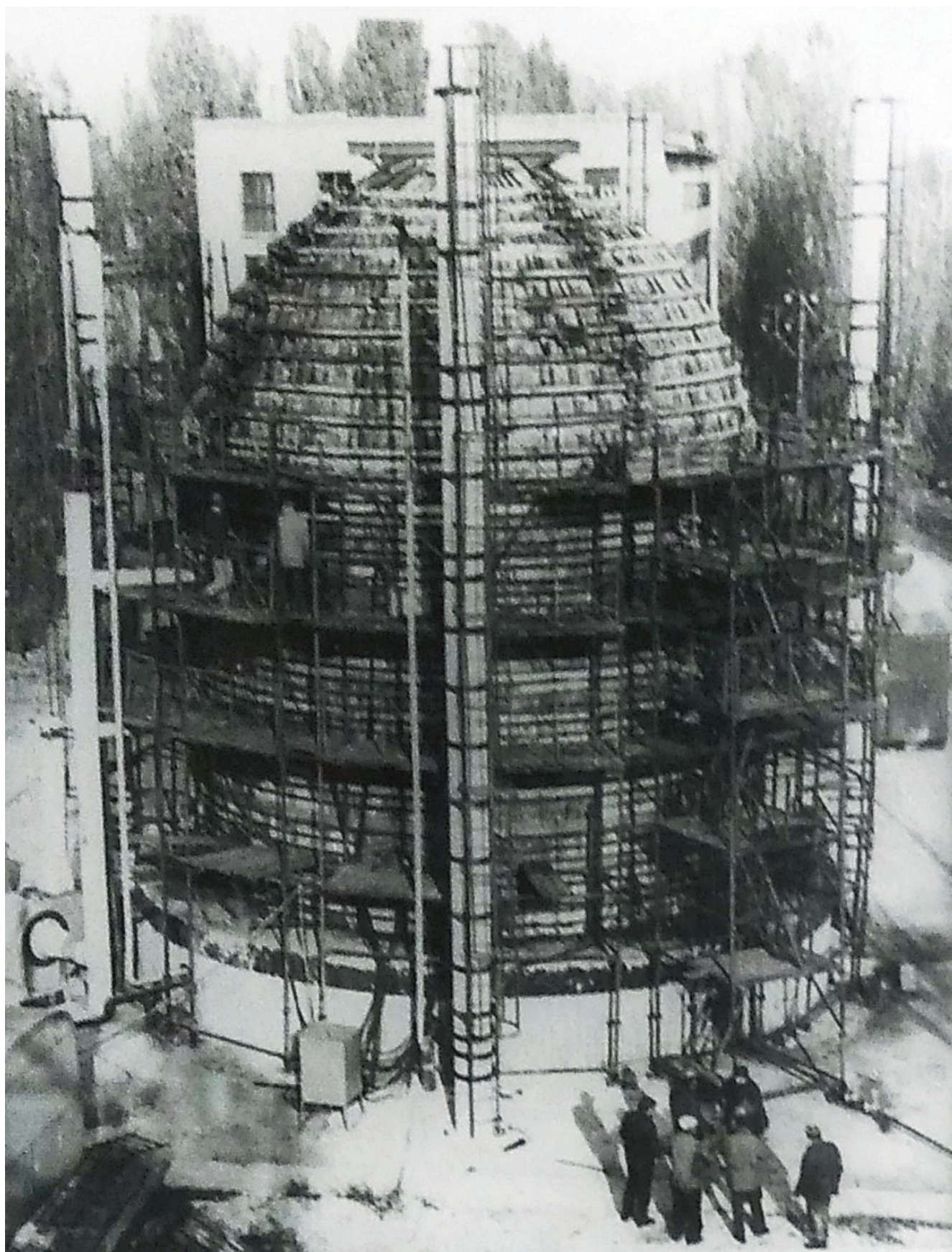
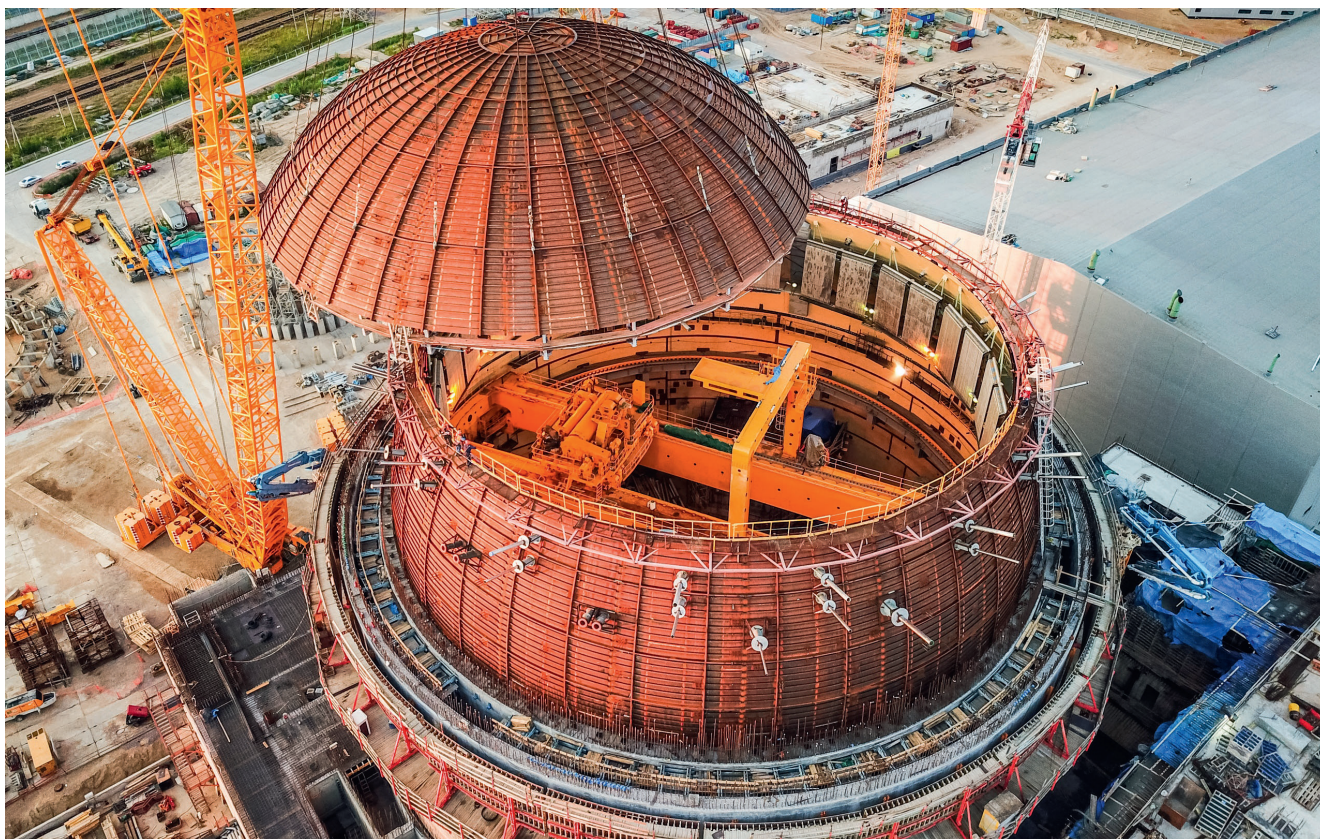
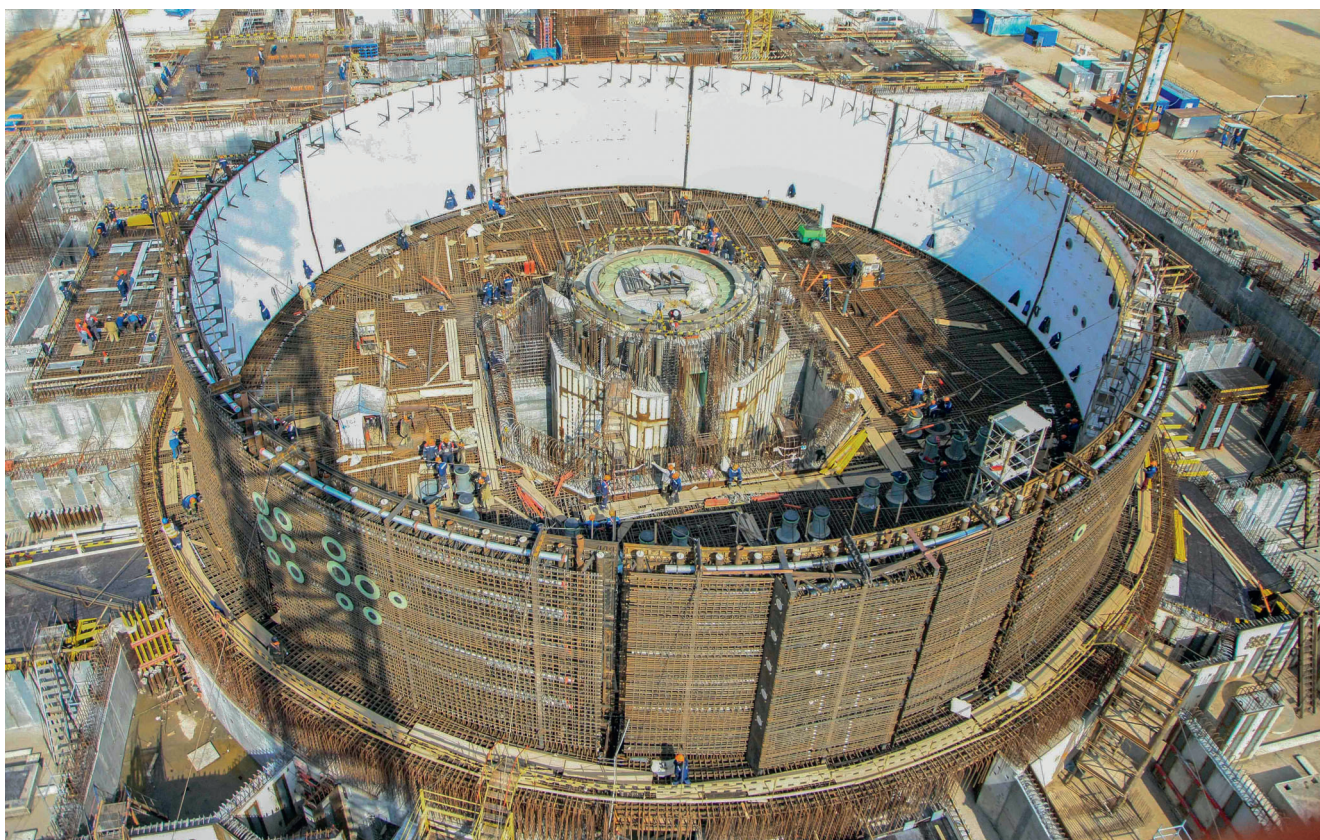


Рис. 4. Испытания модели в масштабе 1:5 (совместно с Киевским АТЭП)  
Fig. 4. Tests of the model on a scale of 1:5 (together with the Kiev ATEP)



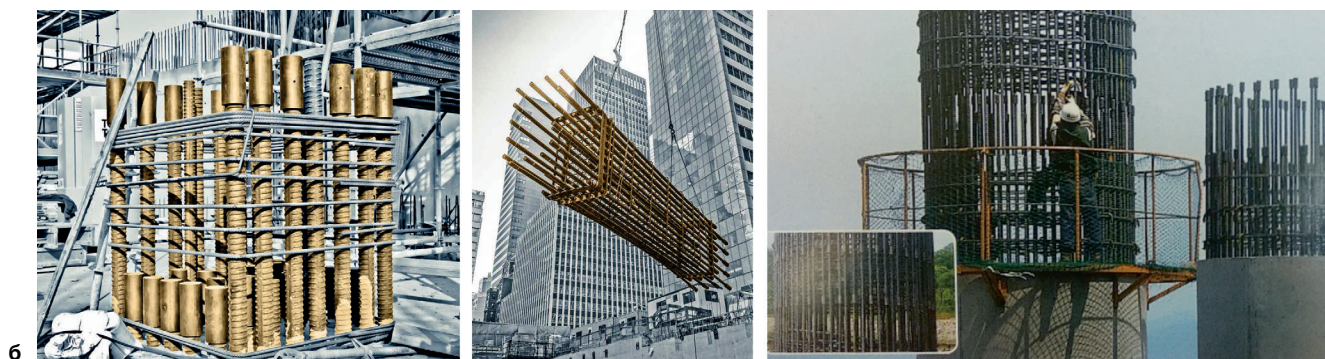
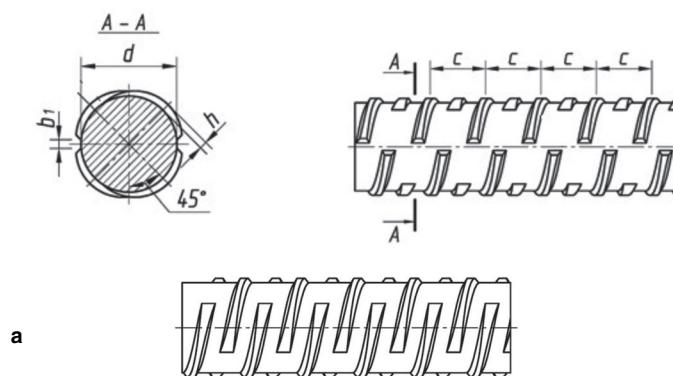


**Рис. 5.** Монтаж купольной металлической части внутренней защитной оболочки реактора Ленинградской АЭС-2  
**Fig. 5.** Installation of the dome metal part of the inner protective shell of the Leningrad NPP-2 reactor



**Рис. 6.** Монтаж армоблоков железобетонной части внутренней защитной оболочки реактора Ленинградской АЭС-2  
**Fig. 6.** Installation of reinforcing blocks of the reinforced concrete part of the inner protective shell of the Leningrad NPP-2 reactor



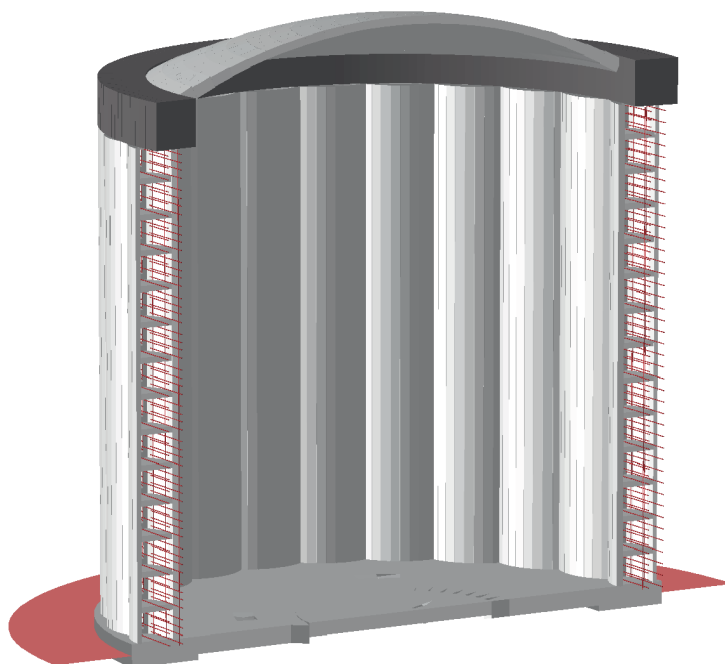


**Рис. 7.** а – арматура с винтовым четырехрядным профилем; б – примеры для ее эффективного применения  
**Fig. 7.** а – reinforce bar with a four-row screw profile; б – examples for its effective use

### Материалы и методы

Расчеты выполнены методом конечных элементов с использованием программного комплекса для расчета пространственных конструкций на прочность, устойчивость и колебания MicroFe-СтаДиКон. Конечно-элементная расчетная модель включала

фундаментную плиту переменной толщины на упругом основании, двухслойные стены цилиндрической части в виде многоволновых оболочек, стержневые элементы вертикальных и горизонтальных армопучков и купол с опорным кольцом (рис. 8).



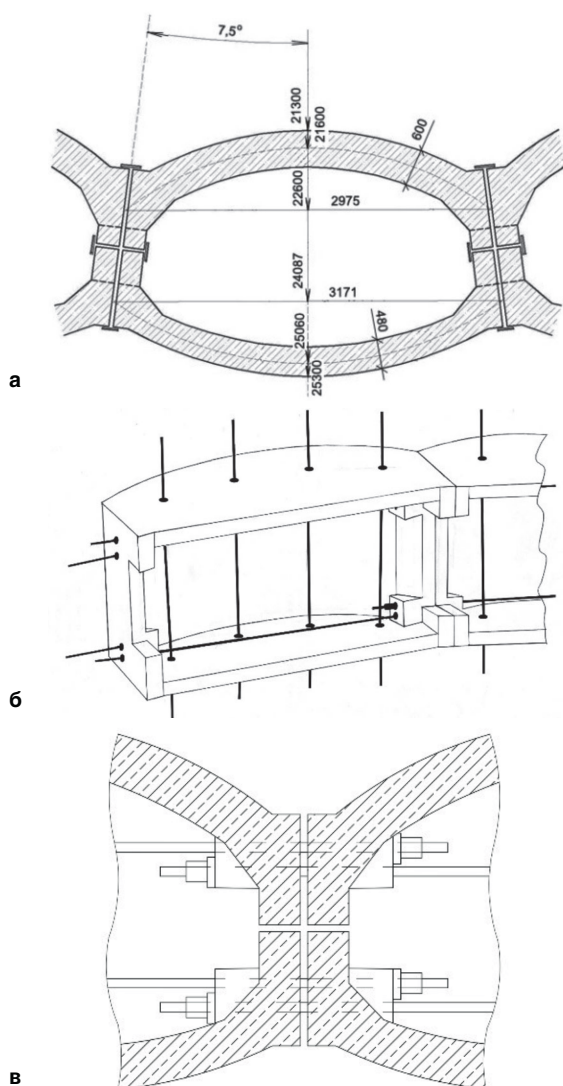
**Рис. 8.** Защитная оболочка. Разрез  
**Fig. 8.** Protective shell. Cut



# Результаты

Постоянными параметрами модели сооружения были приняты: радиус оси опорного кольца и цилиндрической части  $R_0 = 23,3$  м; высота сооружения до уровня оси опорного кольца  $H = 44,0$  м; количество волн по окружности стен – 24 (через  $15^\circ$ ); размеры сечения опорного кольца  $4 \times 4$  м и радиус кривизны купола  $R_k = 45,0$  м, что соответствует стреле подъема купола  $f = 6,5$  м.

Переменными геометрическими параметрами явились толщины и кривизны волн внешнего и внутреннего слоев стен цилиндрической части, а также переменная толщина купола. Окончательно принятое по результатам расчетов конструктивное решение поперечного сечения одной волны стены цилиндрической части для сборного варианта стен показано на рис. 9а.



**Рис. 9.** а – конструктивное решение стены цилиндра;  
б – сборные элементы внешней стены цилиндра;  
в – схема анкеровки затяжек  
**Fig. 9.** а – the structural solution of the cylinder wall;  
б – the prefabricated elements of the outer wall of the cylinder;  
в – the scheme of anchoring the ties

В конструкции применены следующие материалы: бетон класса В40, напрягаемая арматура – канаты  $\varnothing 15K1400$  (K7), ненапрягаемая арматура класса А500С, стальная облицовка внутренней поверхности сооружения толщиной 6 мм класса С245.

Предварительно напряженная арматура выполнена в виде армопучков (рис. 9б, в). Количество канатов определено из условия восприятия нагрузки при аварийном внутреннем давлении  $p = 396$  кПа: вертикальная арматура – 192 армопучка (по 8 в каждой волне) из 19 канатов; горизонтальная (кольцевая) арматура – 98 армопучков (по 8 на 3 м высоты стен) из 37 канатов. Расчет потерь предварительного напряжения выполнен в соответствии с рекомендациями [8].

В расчетах учтены следующие виды нагрузок и воздействий:

**Нагружение Н1** – собственный вес железобетонных конструкций.

**Нагружение Н2** – нагрузки предварительного напряжения.

**Нагружение Н3** – аварийное давление на внутренние поверхности сооружения.

**Нагружение Н4** – избыточное давление во фронте воздушной ударной волны ( $\Delta P_{\text{ф}} = 30$  кПа), направленной вертикально (против оси Z) с распределением давления на внешней поверхности купола по методике [20].

**Нагружение Н5** – избыточное давление во фронте воздушной ударной волны ( $\Delta P_{\text{ф}} = 30$  кПа), направленной горизонтально (по оси X) с распределением давления на внешней поверхности цилиндрической части по методике [1].

**Нагружение Н6** – удар падающего самолета ( $P = 12$  МН с  $k_{\text{дин}} = 1,3$ ; пятно  $12$  м<sup>2</sup>; угол падения  $45^\circ$ ) в центр купола.

**Нагружение Н7** – удар падающего самолета в  $1/4$  пролета купола.

На данном этапе исследования задачи аварийного совместного воздействия давления и температуры на внутренние поверхности сооружения, а также сейсмические воздействия не рассматривались.

В основном сочетании, включающем нагрузки Н1 и Н2, учитывался коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n = 1,1$ ; в особых сочетаниях, включающих Н1, Н2 и одну из нагрузок Н3–Н7,  $\gamma_n = 1,0$ .

В результате выполненных расчетных исследований получены данные о напряженно-деформированном состоянии конструкции защитной оболочки и ее отдельных элементов при различных воздействиях на эксплуатационной стадии работы и при аварийных воздействиях.

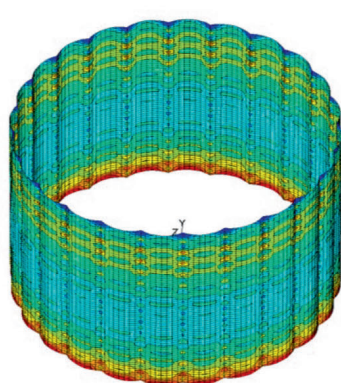
Рассмотрено напряженное состояние внутренней и внешней железобетонных стен цилиндрической части защитной оболочки. При заданном уровне предварительного напряжения, обеспечиваемом заданным количеством вертикальных и горизонталь-

ных (кольцевых) канатных пучков, практически все железобетонные конструкции испытывают сжатие. Уровень растягивающих напряжений, имеющих место в отдельных зонах, ниже напряжений трещинообразования (рис. 10). Исключение составляют узкие зоны в основании цилиндрической части, непосредственно прилегающие к фундаментной плите, и в верхнем уровне цилиндрической части, сопряженные с опорным кольцом купола. В этих зонах следует предусмотреть локальное усиление дополнительным армированием.

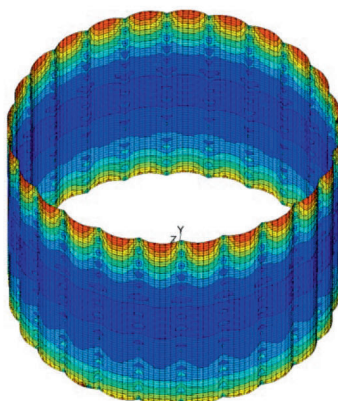
Купольная часть защитной оболочки при действии внешних нагрузок испытывает сжатие по всей площади, за исключением достаточно узкой приконтурной зоны, работающей совместно с опорным кольцом на растяжение и изгиб.

Следует отметить, что в выполненных расчетах в целях упрощения конструктивного решения принято выполнение опорного кольца без предварительного напряжения его продольной арматуры. Принятых габаритов сечения опорного кольца достаточно для размещения в нем количества арматуры, обеспечи-

### Внешняя железобетонная стена цилиндрической части



Нормальные напряжения  
в горизонтальном направлении  
 $\text{Min } S_r = -595.77 \text{ кН/м}^2$ ,  
 $\text{Max } S_r = 1597.24 \text{ кН/м}^2$

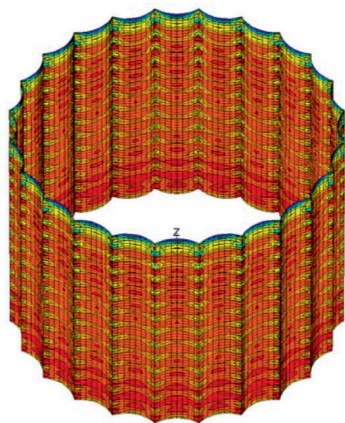


Нормальные напряжения  
в вертикальном направлении  
 $\text{Min } S_s = -4646.91 \text{ кН/м}^2$ ,  
 $\text{Max } S_s = -1309.24 \text{ кН/м}^2$

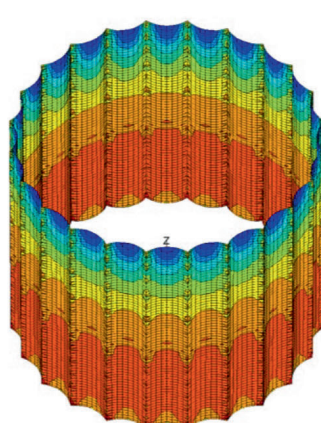


Погонные изгибающие моменты  
в горизонтальном направлении  
 $\text{Min } M_r = -13.8588 \text{ кНм/м}$ ,  
 $\text{Max } M_r = 59.6758 \text{ кНм/м}$

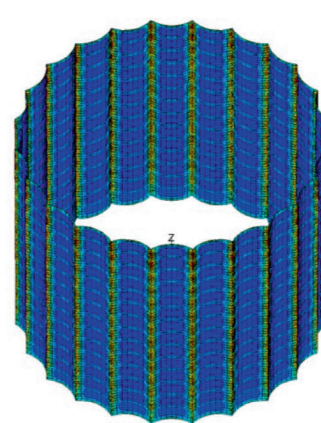
### Внутренняя железобетонная стена цилиндрической части



Нормальные напряжения  
в горизонтальном направлении  
 $\text{Min } S_r = -1447.44 \text{ кН/м}^2$



Нормальные напряжения  
в вертикальном направлении  
 $\text{Min } S_s = -3330.03 \text{ кН/м}^2$



Погонные изгибающие моменты  
в кольцевом направлении  
 $\text{Min } M_r = -231.99 \text{ кНм/м}$ ,  
 $\text{Max } M_r = 73.39 \text{ кНм/м}$

**Рис. 10.** Напряженное состояние внешней и внутренней стен цилиндрической части при воздействии аварийного внутреннего давления  
**Fig. 10.** The stress state of the outer and inner walls of the cylindrical part under the influence of emergency internal pressure

вающего отсутствие в монолитном железобетонном кольце сквозных трещин. Однако деформации кольца под нагрузкой достаточны для появления в сопряженных с кольцом конструкциях растягивающих усилий, способных вызвать в них появление трещин или локальное раскрытие швов между сборными элементами.

Анализ результатов расчета требуемого армирования, с учетом трещиностойкости в стенах цилиндрической части, показал, что практически по всей площади, за исключением отдельных зон, расход ненапрягаемой продольной и поперечной арматуры минимален ввиду преобладания сжимающих усилий в бетоне. В случае аварийного внутреннего давления на многослойную оболочку внутреннего слоя стены к усилиям сжатия, обеспечиваемым напрягаемой арматурой, добавляются усилия распора вследствие пространственного характера работы оболочки. Аналогичный эффект имеет место во внешнем слое стены цилиндрической части при воздействии на нее воздушной ударной волны.

Отдельно решался вопрос о технической возможности выполнения в стенах цилиндрической части предложенной конструкции технологических проемов и различного рода проходок. С этой целью выполнен ряд расчетов на моделях, включающих круглые отверстия (от 1 до 7 м в диаметре) и прямоугольные сквозные проемы различного размера (от  $3 \times 3$  до  $6 \times 6$  м). Расчеты напряженного состояния стен вблизи отверстий показали принципиальную возможность выполнения таких отверстий, в том числе при больших размерах проемов с соответствующим усилением железобетонных конструкций по контуру металлоконструкциями.

### **Выводы**

1. В процессе поисковой научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на тему «Конструктивная разработка и расчетное обоснование защитной оболочки ядерного реактора АЭС» разработано принципиально новое конструктивное решение защитной оболочки ядерного реактора АЭС, состоящей из железобетонных элементов в виде цилиндрических складок с выпуклостью, направленной навстречу возможному внешнему и внутреннему силовому аварийному воздействию, в том числе от взрыва реактора.

2. Разработаны варианты защитных оболочек с проработкой принципиальных технических решений унифицированных складчатых элементов из железобетона с возможностью их монолитного и сборного изготовления.

3. Предложена схема открытого расположения и натяжения пучков тросов с передачей напряжения на предварительно изготовленные конструкции внутренней и внешней частей защитной оболочки.

4. Выполнено теоретическое обоснование нового конструктивного решения.

Данное конструктивное решение обеспечивает при нагружении сжимающие усилия в железобетоне складок внутренней и внешней частей защитной оболочки от нагрузки, что препятствует образованию в них трещин.

Растягивающие усилия в оболочке воспринимаются предварительно напряженной арматурой, расположенной внутри ее конструкции, свободной для обслуживания и контроля.

Эффективность и правильность предпосылок принятого конструктивного решения подтверждены расчетом.

5. В процессе исследования разработаны принципиальные решения конструктивных узловых соединений сборных складчатых железобетонных элементов, технологических отверстий в конструкции оболочки и осуществления в ней предварительного напряжения.

6. Сопоставительный технико-экономический анализ предлагаемой и существующей внутренней защитной оболочки показал возможность снижения расхода бетона в 1,5–2 раза, ненапрягаемой арматуры – в 3–4 раза, сроков строительства – в 4 раза.

7. Основные технические решения предлагаемой защитной оболочки защищены патентами на изобретения [22, 23].

8. Перспективы продолжения работы:

а) разработка рабочей документации по модели защитной оболочки;

б) изготовление модели внутренней и внешней частей оболочки с их преднапряжением стержневой винтовой арматурой класса Аv1000П;

в) разработка приспособлений и методики проведения испытаний моделей оболочек статической нагрузкой;

г) оценка эффективности внедрения по результатам изготовления и испытания модели.

### **Список литературы**

1. Соколов В.А. Защитные оболочки атомных электростанций: учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та; 2003. 106 с.

2. Бирбраер А.Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А.Н. Бирбраер, А.Ю. Роледер. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та; 2009. 594 с.

3. Бирбраер А.Н. Расчет конструкции на сейсмостойкость. Санкт-Петербург: Наука; 1998. 255 с.

4. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Кумпяк О.Г., Югов Н.Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. Нортхэмптон-Томск: STT; 2004. 465 с.

5. Проект АЭС 2006. Санкт-Петербург: Атомэнергопроект; 2013.

6. Железобетонные пространственные конструкции атомных и тепловых электростанций / Л.А. Коробов, О.К. Назарьев, В.Я. Павилайнен. Москва: Энергоиздат; 1981. 328 с.



7. СТО СРО-С 60542960 00014-2014. Объекты использования атомной энергии. Работы бетонные при строительстве защитной оболочки реакторной установки атомных электростанций. Основные требования и организация контроля качества. Москва; 2014.

8. СТО СРО-С 60542960 00017-2014. Объекты использования атомной энергии. Система предварительного напряжения защитной оболочки реакторного отделения АЭС. Требования к конструированию, строительству, эксплуатации и ремонту. Москва; 2014.

9. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва; 2001.

10. НП-064-17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Москва; 2018.

11. ПИН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АЭС с реакторами различного типа. 1986.

12. ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных конструкций локализирующих систем безопасности атомных станций. Москва; 1991.

13. Безопасность атомных электростанций: проектирование. Конкретные требования безопасности № SSR-2/1 (Rev. 1). Вена: МАГАТЭ; 2016.

14. Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных электростанций. Руководство по безопасности. № NS-G-1.10. Вена: МАГАТЭ; 2008.

15. Учет внешних событий, исключая землетрясения, при проектировании атомных электростанций. Руководство по безопасности. № NS-G-1.5. Вена: МАГАТЭ; 2008.

16. Проектирование и аттестация сейсмостойких конструкций для атомных электростанций. Руководство по безопасности. № NS-G-1.6. Вена: МАГАТЭ; 2008.

17. Букринский А.М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности. Труды НТЦ ЯРБ. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ»; 2019. 196 с.

18. BS EN IEC/IEEE 60980-344:2021. Nuclear facilities. Equipment important to safety. Seismic qualification.

19. ASCE/SEI 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers; 2017.

20. СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77\*. Москва: Минстрой России; 2014.

21. Васягин Н.Г., Живов А.Н., Переяславцев Н.А., Сухенко И.В., Шоцкий В.И. Защитная оболочка ядерного реактора. Авторское свидетельство на изобретение SU 963376 А. Оpubл. 23.04.83.

22. Тихонов И.Н., Крючков В.Г., Звездов А.И., Соколов Б.С., Тихонов Г.И., Гришин Г.Е. Защитная оболочка ядерного реактора. Патент на полезную модель RU208108U1. Оpubл. 02.12.2021.

23. Тихонов И.Н., Крючков В.Г., Звездов А.И., Соколов Б.С., Тихонов Г.И. Защитная оболочка ядерного реактора. Патент на изобретение RU2784712C1. Оpubл. 29.11.2022.

## References

1. Sokolov V.A. Protective shells of nuclear power plants: a textbook. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2003. 106 p. (In Russian).

2. Birbraer A. N. Extreme impacts on structures / A.N. Birbraer, A.Y. Roleder. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University; 2009. 594 p. (In Russian).

3. Birbraer A.N. Calculation of the structure for seismic resistance. Saint Petersburg: Science; 1998. 255 p. (In Russian).

4. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumpyak O.G., Yugov N.T. Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads. Northampton-Tomsk: STT; 2004. 465 p. (In Russian).

5. NPP project 2006. St. Petersburg: Atomenergo-proekt; 2013. (In Russian).

6. Reinforced concrete spatial structures of nuclear and thermal power plants / L.A. Korobov, O.K. Nazarev, V.Ya. Pavilainen. Moscow: Energoizdat; 1981. 328 p. (In Russian).

7. ORGANIZATION STANDARD SRO-C 60542960 00014-2014. Facilities for the use of atomic energy. Concrete works during the construction of the protective shell of the reactor plant of nuclear power plants. Basic requirements and organization of quality control. Moscow; 2014. (In Russian).

8. ORGANIZATION STANDARD SRO-C 60542960 00017-2014. Facilities for the use of atomic energy. The pre-voltage system of the protective shell of the reactor compartment of the NPP. Requirements for design, construction, operation and repair. Moscow; 2014. (In Russian).

9. NP-031-01. Standards for the design of earthquake-resistant nuclear power plants. Moscow; 2001. (In Russian).

10. NP-064-17. Consideration of external impacts of natural and manmade origin on nuclear energy facilities. Moscow; 2018. (In Russian).

11. ПИН АЭ-5.6. Standards for the construction design of nuclear power plants with reactors of various types. 1986. (In Russian).

12. PNAE G-10-007-89. Standards for the design of reinforced concrete structures of localizing safety systems of nuclear power plants. Moscow; 1991.

13. Safety of nuclear power plants: design. Specific safety requirements No. SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna: IAEA; 2016. (In Russian).

14. Design of reactor containment systems for nuclear power plants. Safety Guide. No. NS-G-1.10. Vienna: IAEA; 2008. (In Russian).

15. Consideration of external events, excluding earthquakes, in the design of nuclear power plants. Safety Guide. No. NS-G-1.5. Vienna: IAEA; 2008. (In Russian).

16. Design and certification of aseismic structures for nuclear power plants. Safety Guide. No. NS-G-1.6. Vienna: IAEA; 2008. (In Russian).

17. Bukrinsky A.M. Safety of nuclear power plants according to federal norms and rules of Russia and IAEA standards. Comparison of the basic principles and requirements for ensuring safety. Proceedings of the NTC YARB. Moscow: FBI "NTC YARB"; 2019. 196 p. (In Russian).

18. BS EN IEC/IEEE 60980-344:2021. Nuclear facilities. Equipment important to safety. Seismic qualification.

19. ASCE/SEI 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers; 2017.

20. SP 88.13330.2014. Protective structures of civil defense. Updated version of SNiP II-11-77\*. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2014. (In Russian).

21. Vasyagin N.G., Zhivov A.N., Pereyaslavtsev N.A., Sukhenko I.V., Shotsky V.I. Protective shell of a nuclear reactor. Copyright certificate for the invention SU 963376 A. Publ. 04/23/83. (In Russian).

22. Tikhonov I.N., Kryuchkov V.G., Zvezdov A.I., Sokolov B.S., Tikhonov G.I., Grishin G.E. The protective shell of a nuclear reactor. The patent for the utility model RU208108U1. 02.12.2021. (In Russian).

23. Tikhonov I.N., Kryuchkov V.G., Zvezdov A.I., Sokolov B.S., Tikhonov G.I. The protective shell of a nuclear reactor. Patent for the invention RU2784712C1. Published on 11/29/2022. (In Russian).

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Игорь Николаевич Тихонов** ✉, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «НИЦ «Строительство»; руководитель центра № 21 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: tikhonovniizhb21@yandex.ru

**Igor N. Tikhonov** ✉, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials, JSC Research Center of Construction; Head of the Center No. 21, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: tikhonovniizhb21@yandex.ru

**Виталий Геннадьевич Крючков**, д-р экон. наук, генеральный директор АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Vitaly G. Kryuchkov**, Dr. Sci. (Economics), General Director, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Андрей Иванович Звездов**, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, заведующий кафедрой «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Andrey I. Zvezdov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Director for Scientific Work, Head of the Department Building Structures, Constructions and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Борис Сергеевич Соколов**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций (№ 4) НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Boris S. Sokolov**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Thin-walled and Spatial Structures (No. 4), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

**Георгий Игоревич Тихонов**, инженер-конструктор центра № 21 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

**Georgy I. Tikhonov**, Design Engineer of the Center No. 21, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author