

Михаил Климентьевич ВИНОГРАДОВ,
архитектор проекта,
УП «ТМ архитектора Виноградова М.К.»;
Виктор Владимирович КРАМАРЕНКО,
архитектор проекта,
УП «ТМ архитектора Крамаренко В.В.»;
Людмила Митрофановна ШОХИНА,
главный инженер проекта,
УП «Минскпроект»;
Тимофей Максимович ПЕЦОЛЬД,
доктор технических наук,
профессор, заслуженный деятель науки
РБ, научный руководитель проекта,
заведующий кафедрой БНТУ;
Дмитрий Николаевич ЛАЗОВСКИЙ,
доктор технических наук,
профессор, конструктор проекта,
ректор ПГУ;
Владимир Анатольевич ПОТЕРЩУК,
главный конструктор проекта,
главный конструктор
УП «Институт НИПТИС»

АРХИТЕКТУРНО- КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ УНИКАЛЬНОГО ЗДАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ БЕЛАРУСИ

Рассмотрена архитектурно-конструктивная схема здания Национальной библиотеки Беларуси, разработанная на основе монолитного железобетона. Приведены результаты проектирования и исследования работы конструкции пространственной структуры высотного здания книгохранилища с учетом технологии его возведения.

The architectural-constructive scheme of the building of the National library of Belarus, developed on the basis of cast-in-place reinforced concrete. Results of designing and research of structural behaviour of space structure of a high-rise building of book depository are instanced in view of production engineering of its erection.

Здание Национальной библиотеки Беларуси (НББ) состоит из двух основных объемов: высотного здания книгохранилища и расположенного вокруг него на уровне земли 2 – 4 этажного стилобата, где размещаются предусмотренные библиотечной технологией помещения (рис. 1).

Общая площадь здания – 112 670 м², вместимость книгохранилища – 14 млн. единиц хранения, количество читательских мест – 2000, читательских залов – 20, штат работающих – 1000 человек.

Высота здания книгохранилища составляет 72,6 м, а высота стилобата – 17,5 м. Круглое в плане

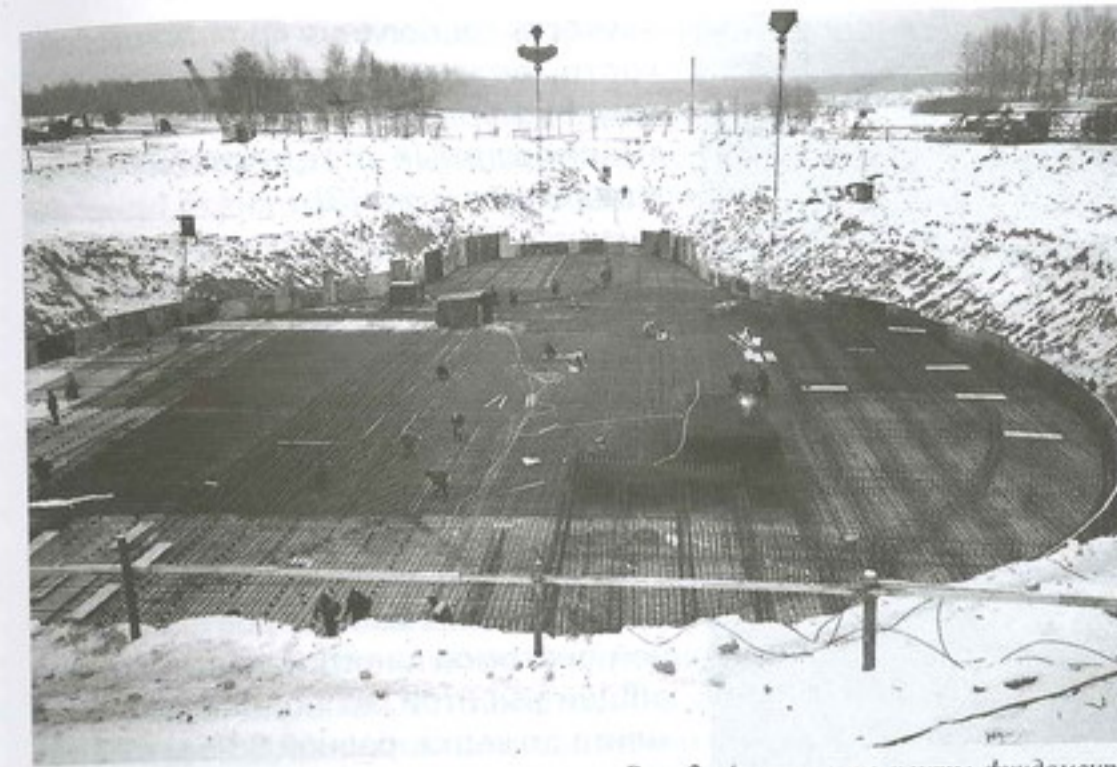


Рис. 2. Армирование плиты фундамента.

здание НББ имеет наружный диаметр, равный 167,5 м [1].

Стилобат отделен от высотного книгохранилища противопожарной цилиндрической монолитной железобетонной стеной диаметром 57,8 м. Основные конструкции стилобата – монолитный железобетонный каркас с круглыми колоннами диаметром 500 мм на 1, 2, 3 этажах и квадратными сечением 500x500 мм – в цокольном и подвальном этажах с сеткой колонн 6,6x6,0 и 7,2 x7,2 м. Перекрытие и покрытие монолитные железобетонные безригельные.

Конференц-зал, входящий в состав стилобата, диаметром 30,0 м, выполнен в монолитных железобетонных конструкциях, перекрыт четырьмя металлическими фермами высотой 2,4 м. Покрытие конференц-зала сборно-монолитное.

Лестницы и лифтовые шахты выполнены из монолитного железобетона. Фундаменты стилобата свайные в связи с обширной зоной насыпных грунтов, образовавшихся при рытье котлована фундамента высотного книгохранилища, строительство которого велось в первую очередь, а также большой подсыпкой под здание с южной стороны.

Читательские залы оборудованы компьютерной и другой современной техникой с выходом в Интернет.

Лифтовая башня диаметром 10 м с толщиной стенок 400 мм функционально соединена со зданием книгохранилища галереями и смонтирована на общем фундаменте.

Собственно книгохранилище начинается с отметки +12,6 м. До отметки +12,6 в этой зоне

высотного фондохранилища расположены вестибюль и центральный вход в НББ.

Основным, наиболее интересно решенным в архитектурно-конструктивном отношении, является высотная часть книгохранилища. Это объемный симметричный кристалл, имеющий геометрическую форму ромбокубооктаэдра с максимальными габаритами 60x60x60 м (рис. 1).

Математическое моделирование и расчет конструкции пространственной каркасной структуры здания книгохранилища были выполнены с помощью ПК «SCAD»¹.

Геометрическая форма здания книгохранилища диктовала возможные конструктивные варианты реализации архитектурного проекта. Вся сложность проекта заключалась в том, что кроме поиска надежного и экономичного конструктивного решения многоэтажного, сложного по объему

здания, должны быть решены и все технологические задачи для хранилища книг, их скоростной подачи к читателю, вопросы температурных режимов и противопожарных мероприятий, размещения лестниц, лифтов и другого технологического оборудования. Кроме этого, следовало обеспечить требуемую жесткость конструкции на внешнем контуре здания в связи с его облицовкой декоративным стеклом.

На последних двух этажах книгохранилища размещаются смотровые площадки, куда экскурсанты доставляются в обзорном лифте, расположенном в лестнично-лифтовой башне, которая соединена с книгохранилищем на всех этажах переходными галереями.

Авторским коллективом изучалось несколько вариантов возможной конструктивной схемы здания фондохранилища:

¹ Моделирование и расчеты конструкций выполнены с участием инж. Поправко А.В.

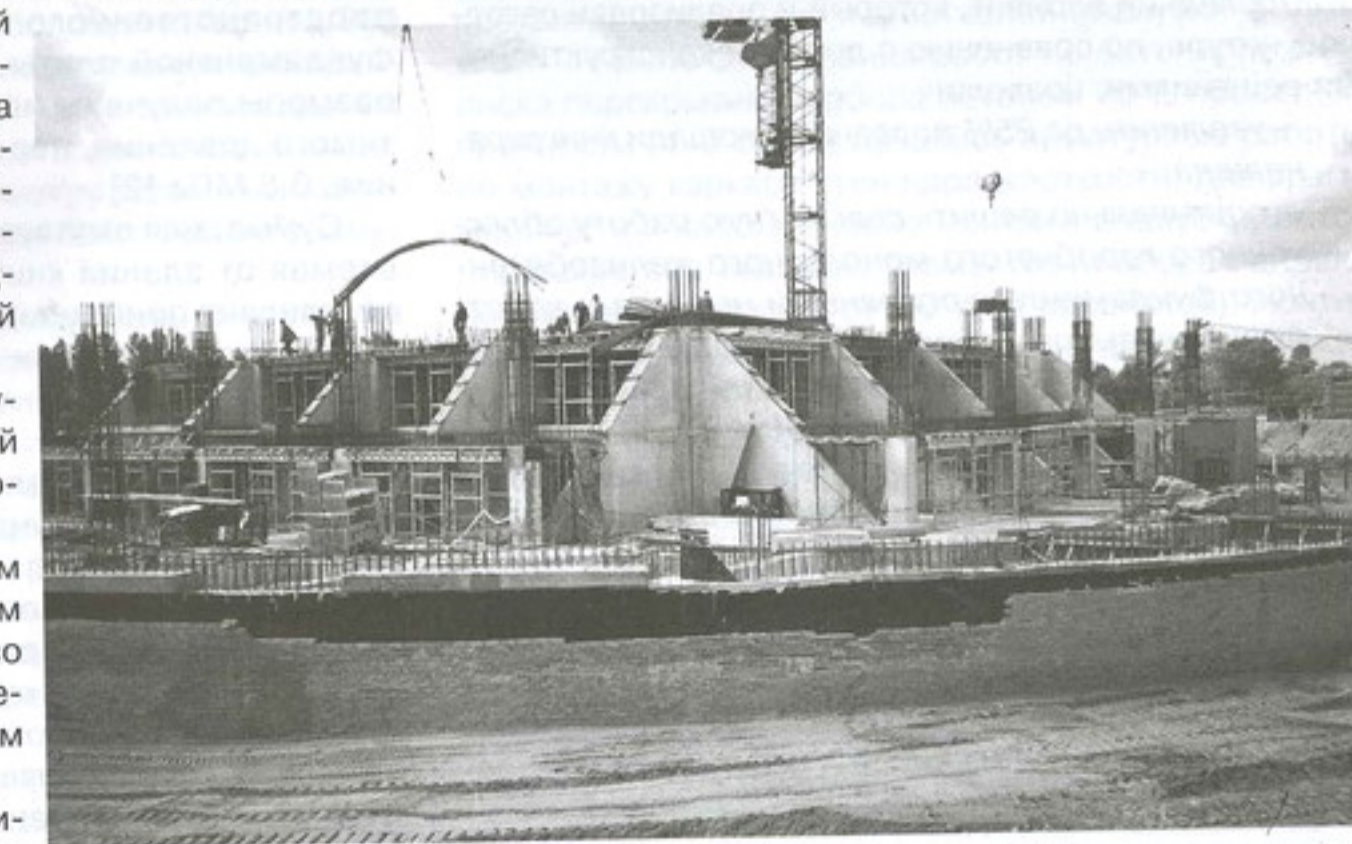


Рис. 3. Бетонирование верхней плиты фундамента на отметке 0,000



Рис. 1. Строительство Национальной библиотеки Беларуси



Рис. 4. Опорное кольцо на отметке 12,6 м перед бетонированием

— сборно-монолитный вариант, когда нижняя наклонная часть здания с отметки +12,6 до +30,6 и фундамент выполняются из монолитного железобетона с предварительным напряжением арматуры в построечных условиях, а остальная часть объема — из сборного железобетона;

— металлический пространственный каркас с монолитными дисками перекрытий и последующей защитой конструкций от пожара;

— пространственная структура из монолитного железобетона.

Последний вариант, который и реализован сегодня в натуре, по сравнению с другими конструктивными решениями, позволил:

- увеличить до 25% полезные площади книгохранилища;
- оригинально решить совместную работу облегченного коробчатого монолитного железобетонного фундамента с основными несущими конструкциями высотного здания как единую пространственную систему, обладающую высокой эксплуатационной надежностью [2 и 3];
- благодаря принципу концентрации материала сэкономить, по самым скромным подсчетам, до 20% бетона и арматуры;
- свести до минимума общую деформативность конструкции и узлов внешнего контура оболочки пространственной структуры, что позволяет применить любую конструктивную схему облицовки здания, в том числе и на отnose облицовки от стен*;

* Авторы выражают благодарность главному эксперту Главэкспертизы Журавскому В.Ю. за большую помощь в проектировании.

— учесть требования по сейсмостойкости, ветровым, динамическим и температурным воздействиям, противопожарные и технологические требования и др. [3];

— учесть при разработке проекта технические возможности строительного комплекса Беларуси, не имевшего опыта возведения подобных уникальных сооружений из монолитного железобетона, и сокращенные сроки строительства по сравнению с нормативными.

Книгохранилище является конструктивной каркасной пространственной системой многоэтажного здания общей высотой, от подошвы фундамента до верха, равной 88,5 м с переменной шириной, или условным диаметром, равным: в зоне фундаментной плиты 56 м, на уровне отметки +30,6 от 54,6 м до 60 м [4].

Колонны каркаса сечением 400x400 мм расположены с шагом 6x6 м, а по внешнему контуру здания — с шагом 3 м. При принятой конструктивной схеме в верхних стержневых элементах каркаса (колоннах), начиная с

отметки 54,6 м, возникают растягивающие усилия, достигающие 2000 кН в одном элементе. Поэтому колонны каркаса и внешнего контура здания выполнены из стальных сварных двутавров с последующим их обетонированием (рис. 5).

В нижней наклонной части структуры стержневые элементы внешнего контура выполнены в сталежелезобетоне, что значительно повысило их жесткость, упростило технологию бетонирования в подвесной опалубке и монтаж поддерживающих кружал.

Большое внимание было уделено разработке пространственного фундамента здания. Схема фундаментной плиты в плане, ее геометрические размеры получены исходя из максимально допустимого давления, передаваемого на грунт основания, 0,6 МПа [2].

Суммарная эксплуатационная нагрузка, передаваемая от здания книгохранилища на фундамент, составляет приблизительно 140 тыс. тонн. Фундамент запроектирован и выполнен в натуре в виде пространственной 3-ярусной коробчатой структуры с ячейками 6x6 м. Толщина монолитной фундаментной плиты составила 1200 мм, а толщина стен коробчатой части фундамента — 500 мм. Диски перекрытия имеют толщину, равную 500 мм. Такое конструктивное решение фундамента было принято после анализа и расчетов нескольких возможных конструктивных схем фундаментов, в том числе и в виде сплошной монолитной плиты [2]. Все элементы фундамента до отметки 0,000 запроектированы с армированием двумя сетками, из арматуры класса S500 разного диаметра. Например, плита фундамента армирована двумя сетками из

стержней Ж40 мм класса S500 с ячейкой 100x100 мм (рис. 2) [5].

По периметру фундаментной плиты с отметки -14,2 до 10,7 м возведена вертикальная стена из монолитного железобетона с колоннами, которая выполняет несколько важных функций. Во-первых, по требованиям противопожарной безопасности, стена отделяет вестибюль книгохранилища от стилобата. Во-вторых, в верхней зоне стена является опорой смонтированного сталежелезобетонного опорного кольца. В-третьих, стена, располагаясь по периметру фундаментной плиты, является своеобразным пригрузом фундамента, воспринимая и нагрузку от дисков перекрытия стилобата, что способствует выравниванию напряжений под подошвой фундамента книгохранилища. Так как осадка фундамента книгохранилища будет отличаться от осадок свайных фундаментов стилобата, то по периметру стены предусмотрен температурно-деформационный шов.

По центру здания расположено ядро жесткости, состоящее из среднего ядра кольцевого сечения $\varnothing 9,6$ м и внешнего восьмиугольного ядра с размерами по ширине, равными 18 м, которое отстоит от кольцевого ядра на 4,5 м. В этом образовавшемся пространстве расположена лестница, лифт и все технологическое оборудование. Толщина стен ядра жесткости — 400 мм.

В зоне верхней фундаментной плиты на отметке 0,000 до отметки 5,4 м, для плавного перехода от ядра жесткости к конструкциям фундамента выполнено 16 контрфорсов (рис.3).

По внешнему контуру с отметки +12,6 до +21,6 м выполнена железобетонная оболочка толщиной 200 мм, которая необходима для обеспечения пространственной жесткости наклонной части каркаса здания и для противопожарной защиты книгохранилища. Выше отметки +21,6 по периметру здания выполняются обвязочные балки сечением 300x1000 мм с замкнутым армированием.

Структура каркаса здания имеет четыре основные железобетонные диафрагмы жесткости высотой 60 м, расположенные в плане под углом 90° на высоту с отметки 12,6 до 72,6 м.

В нижней наклонной части здания начиная с отм. 12,6 до 30,6 м расположены дополнительно еще четыре диафрагмы жесткости. Для уменьшения деформации конструкций внешнего контура здания с отметки 66,6 до 72,6 м также выполнены на два этажа дополнительно еще четыре диафрагмы жесткости.

До отметки 30,6 м толщина сечения диафрагм жесткости равна 400 мм, а выше до отметки 72,0 м — 300 мм. Класс бетона всех сжатых элементов пространственной структуры здания принят равным

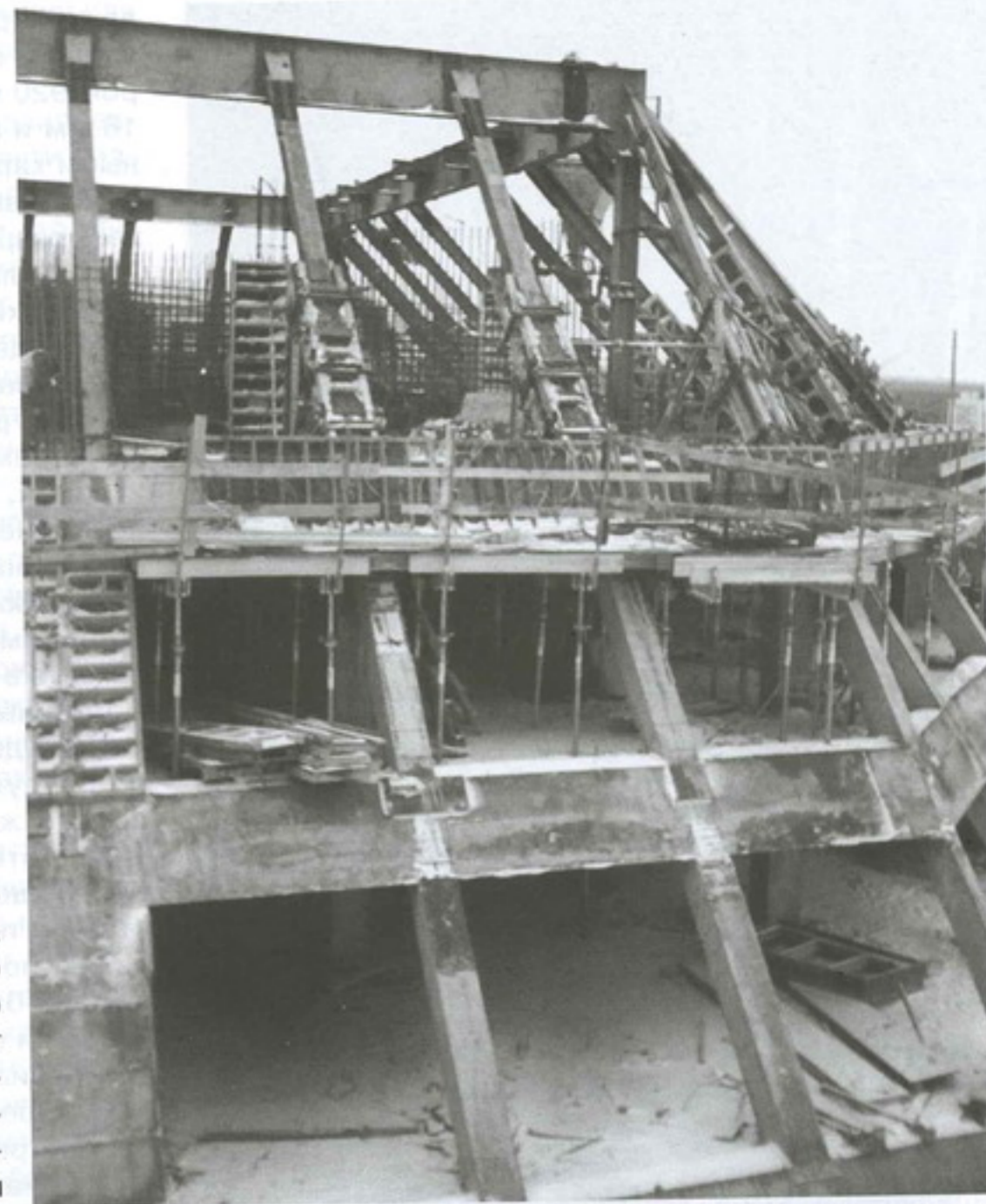


Рис. 5. Возведение пространственного каркаса здания книгохранилища на отметке 66,6 м

B40, а дисков перекрытия, толщина которых равна 250 мм, — B30 [4].

Возведение высотного книгохранилища велось поэтапно с помощью переставной опалубки фирмы «Peri». После завершения работ по бетонированию диска перекрытия и набора бетоном 70% проектной прочности (4–5 суток) начались арматурные работы по монтажу каркаса стен ядра жесткости, диафрагм жесткости и колонн. После монтажа опалубки, бетонирования вертикальных элементов и набора бетоном необходимой прочности (50% от проектной), монтировалась опалубка диска перекрытия внутри ядра жесткости, устанавливалась арматура и производилось бетонирование. Параллельно велись работы по монтажу арматуры контурных балок и вертикальных колонн по периметру структуры.

Последний, самый сложный и объемный передел — это монтаж опалубки и арматуры основной части дисков перекрытия, расположенных за пределами ядра жесткости, и бетонирование диска, которое продолжалось непрерывно в течение 1...1,5 суток.

* Состав литьевого бетона подобран под руководством проф. Блещика Н.П.

** Технология опалубочных работ выполнялась под руководством к.т.н. Марковского М.Ф.

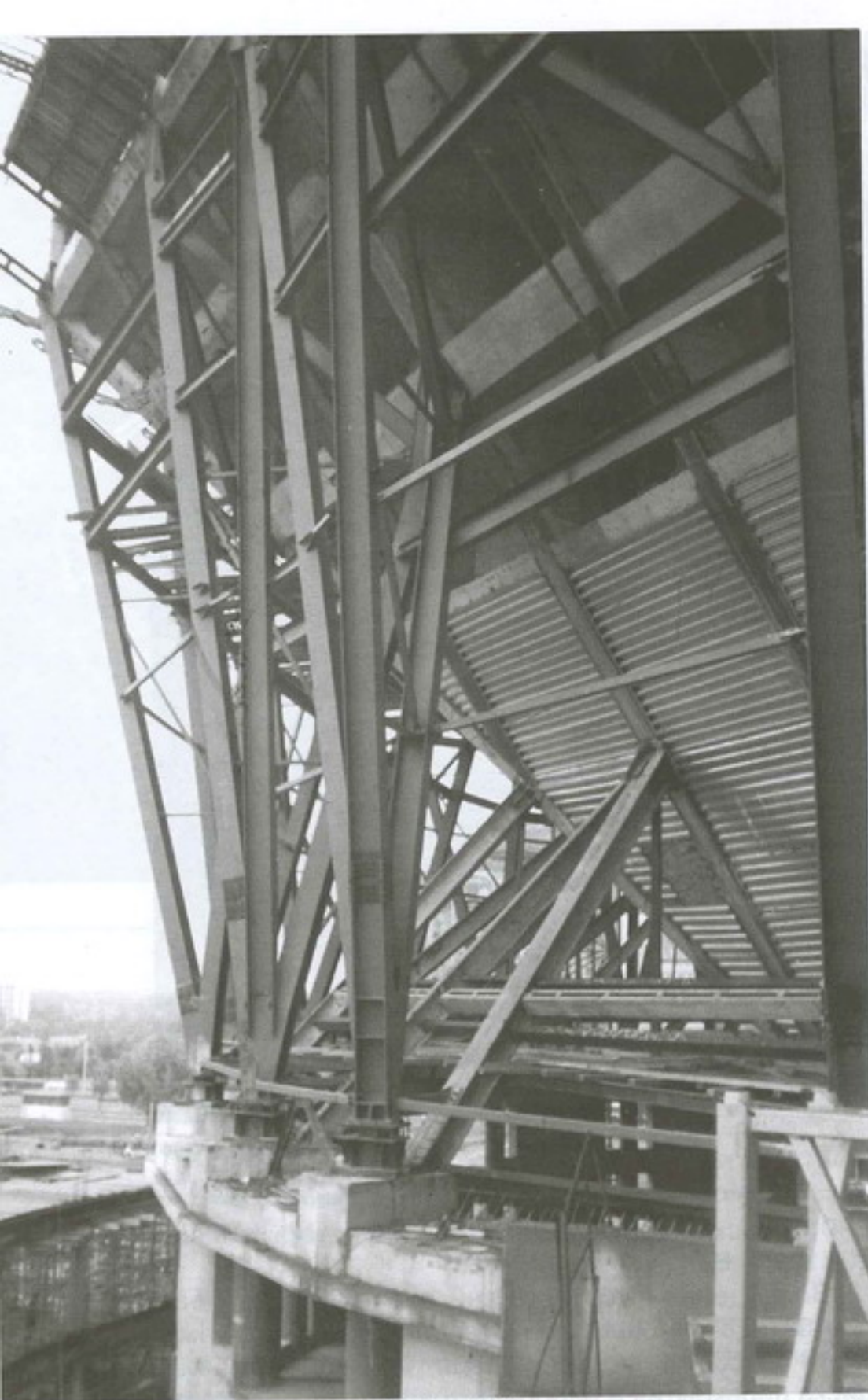


Рис. 6. Опорное сталежелезобетонное кольцо, песчаные домкраты и стойки кружал

Пространственная каркасная структура ромбокубооктаэдра связана с ядром жесткости через монолитные железобетонные диафрагмы, диски перекрытий, систему колонн каркаса с ячейкой 6x6 м, горизонтальные обвязочные балки и вертикальные колонны внешнего контура здания.

Основанием ромбокубооктаэдра является монолитная железобетонная плита 24x24 м, расположенная на отметке 12,6 м, которая опирается на ядро жесткости и 16 базовых колонн, установленных по контуру плиты. Колонны частично разгружают ядро жесткости, обеспечивают пространственную работу конструкции и более равномерную передачу вертикальных усилий на фундамент здания. На отметке 0,000 усилие в этих колоннах при эксплуатационной нагрузке достигает 20000 кН [3]. С целью уменьшения размеров колонн, учитывая их

важную роль в работе пространственного каркаса здания, они выполнены трубобетонными диаметром 920 мм с толщиной стенки стальных труб 12 и 16 мм и армированы двумя кольцевыми арматурными каркасами.

Чрезвычайно сложной технической задачей явилась разработка технологии возведения здания фондохранилища.

В архитектурно-конструктивной схеме нижней части здания были предусмотрены наклонные колонны-балки, которые расположены равномерно по периметру здания на отметках с 12,6 до 18,6 м и одновременно являются конструкциями покрытия атриума. Нагрузка от колонн вышележащих этажей здания через эти наклонные колонны с отметки 18,6 м первоначально должна была передаваться на монолитную железобетонную стену, расположенную по периметру здания (рис. 2 и 4). Возникла идея связать в единую конструктивную систему предусмотренные проектом наклонные колонны с отметки 12,6 до 18,6 м с системой стоек-кружал, которые будут воспринимать нагрузку от колонн и диафрагм жесткости высотной части структуры здания на отметках 24,6 и 30,6 м. Таким образом, логика и расчеты подсказали необходимость устройства по периметру структуры здания на отметке 12,6 м мощного опорного кольца, которое воспринимало бы нагрузку, передаваемую от наклонных колонн и стоек кружал.

Специалисты БНТУ, ПГУ, институтов «Минскпроект», «Проектстальконструкция», НИПТИС и СМУ-77, рассмотрев несколько вариантов поддерживающих систем наклонной части структуры каркаса здания, в том числе со сплошной системой поддерживающих лесов, выполнив большой объем компьютерного моделирования и расчетов, предложили оригинальное конструктивное решение пространственной стоечной-кружальной системы, состоящей из металлических стоек, воспринимающих нагрузку от вышележащих этажей здания с отметок 21,6 и 30,6 м и передающих ее на 28 песчаных домкратов, установленных равномерно на сталежелезобетонном опорном кольце на отметке 12,6 м (рис. 4 и 6)*.

Были разработаны чертежи и изготовлен опытный образец песчаного домкрата, проведены его лабораторные испытания, которые позволили уточнить конструкцию домкратов. Перед отправкой на объект в домкраты засыпался слой специально подготовленного песка и производилось его циклическое обжатие в 500-тонном прессе до полного уплотнения песка. В зажатом струбцинами состоянии домкраты монтировались на опорное кольцо и на них устанавливались стойки кружал (рис. 6).

После возведения здания, замоноличивания и набора прочности бетоном диска покрытия на отметке 72,6 м и включения в работу всех конструкций была произведена разгрузка песчаных домкратов и стоек кружал. Эта сложная инженерная операция была тщательно промоделирована, и только

* Металлоконструкции разработаны под руководством гл. конструктора Попова А.И.

после этого было принято оптимальная технология последовательности разгрузок песчаных домкратов*.

Анализ результатов компьютерного моделирования нескольких вариантов последовательности разгрузки домкратов и включения в работу конструкции пространственной структуры здания показал, что наиболее плавное включение в работу конструкций достигается при разгрузке домкратов начиная с угловых зон структуры, т.е. с включением в работу всех колонн каркаса и заканчивая разгрузкой песчаных домкратов и кружал, поддерживающих диафрагмы жесткости.

В этом случае идет равномерное включение в работу всех элементов структуры.

Наиболее нагруженными к моменту окончания возведения здания оказались стойки кружал, расположенные в угловых зонах пространственной структуры, которые воспринимают нагрузку до 3260 кН, передаваемую колоннами каркаса здания, расположенными на отметке 24,6 м. Наименее нагружены оказались стойки кружал, расположенные в зоне монолитных диафрагм жесткости. Здесь усилия в стойках составляют 1800...2300 кН.

В соответствии со схемой передачи нагрузки от вышележащих этажей структуры на ядро жесткости и далее на фундамент здания, наибольшую нагрузку воспринимает ядро и диафрагмы жесткости – основа всей пространственной конструктивной системы здания. От колонн безбалочных перекрытий каркаса и колонн наружной обвязки здания, кроме 16 колонн, расположенных за ядром жесткости передающих нагрузку непосредственно на фундамент здания, нагрузка передается на наклонные сталежелезобетонные балки и короткие диафрагмы жесткости, расположенные на отметке 12,6 – 30,6 м. Наклонные сталежелезобетонные балки на отметке 12,6 м опираются на

* Работами по раскружализации руководил доцент, канд.техн.наук Смах И.В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шохина Л.М. Конструктивные решения нового здания библиотеки. «Архитектура и строительство», № 2, 2003, стр. 2-3.
2. Шохина Л.М., Пецольд Т.М., Лазовский Д.Н., Потерщук В.А. Монолитный железобетонный фундамент высотной части здания Национальной библиотеки Беларуси. «Строительство», №1-2, 2003, стр. 295-299.
3. Борисевич А.А., Лазовский Д.Н., Пецольд Т.М., Сидорович Е.М. Особенности работы каркаса книгоохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь. Вестник БНТУ № 6, 2004, стр. 5-12.
4. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции.
5. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции.

монолитную железобетонную обвязочную балку, лежащую на 16 колоннах и связанную диском перекрытия и ядром жесткости здания.

График возведения высотного книгоохранилища был составлен таким образом, что раскружализация пространственной структуры здания производилось в январе-феврале 2005 года, то есть при отрицательных температурах. В этой связи был выполнен расчет усилий в металлических стойках кружал в условиях разгрузки домкратов при отрицательной температуре наружного воздуха, равной -10° и -30°C . Одновременно было промоделировано возможное напряженно-деформированное состояние при этой температуре в основных несущих конструкциях пространственной структуры здания.

При раскружализации пространственной структуры здания и включении в работу несущих конструкций велись замеры горизонтальных и вертикальных перемещений наружных узлов структуры на отметках 30,6; 54,6 и 72,6 м. Максимальные перемещения составили 2...6 мм и происходили равномерно по периметру здания.

В процессе строительства здания предприятие «Геосервис» ведет регулярный геодезический контроль за осадкой низа фундамента книгоохранилища. К сожалению, в процессе бетонирования стен фундамента были забетонированы контрольные марки, установленные на фундаментной плите. Поэтому эта часть осадки фундамента была рассчитана теоретически, что позволило восстановить полную картину деформаций. Анализ графика деформаций показал, что по мере строительства и после завершения работ по возведению книгоохранилища, осадки идут равномерно, на протяжении последних трех месяцев средние осадки низа фундамента стабилизировались и на июнь 2005 г. составили 52,6 мм.

В зоне ядра жесткости осадки низа фундамента составили 56 мм и также стабилизировались.