

*Национальная библиотека Беларуси – головная библиотека 4-уровневой библиотечной сети республики. Наряду с функциями крупной библиотеки она выполняет функции методического, культурного и информационного центра страны, являясь своеобразным оазисом интеллектуальной среды. Национальная библиотека Беларуси занимает 9-е место в мире по объему информации. В образном отношении фондохранилище напоминает бриллиант, который своей формой символизирует разум. Таким образом, форма получает дополнительную духовную функцию, что усиливает ее звучание как объекта архитектуры.*

УДК 69.035.4:711.7

## КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ КНИГОХРАНИЛИЩА НАЦИОНАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ БЕЛАРУСИ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, А.В. ПОПРАВКО  
(Полоцкий государственный университет),  
д-р техн. наук, проф. Т.М. ПЕЦОЛЬД  
(Белорусский национальный технический университет, Минск),  
Л.М. ШОХИНА (Минскпроект, Минск)*

*На основании компьютерного моделирования методом конечных элементов с учетом расчетных постоянных и временных нагрузок определена оптимальная конструктивная схема высотного здания книгохранилища Национальной библиотеки Беларуси.*

В здании Национальной библиотеки Республики Беларусь доминантой является высотное книгохранилище. Предложенная архитекторами М.К. Виноградовым и В.В. Крамаренко [1] форма этого уникального здания в виде бриллианта, символизирующего знания, накопленные человечеством за тысячелетия, имеет ряд преимуществ перед традиционными объемами. Кроме внешней привлекательности, форма экономична в теплотехническом плане, а также имеет безусловную функциональную рациональность доставки книг читателям в минимально возможное время. Принятая форма приближена к решетке кристалла алмаза с самыми короткими внутренними связями и дала конструкторам возможность проработки различных вариантов конструктивных схем. Из условий долговечности, пожарной безопасности основным материалом для высотного здания книгохранилища должен был служить железобетон.

Достаточно сложной и объемной работой явилось определение конструктивного решения сооружения высотного книгохранилища из железобетона в рамках принятой архитектурной формы. Исторически первым вариантом конструктивного решения здания книгохранилища была принята схема с жестко защемленным в фундаменте вертикальным цилиндрическим стволом и трубобетонными колоннами диаметром 1000 мм, расположенными по периметру квадрата со стороной 24 м. Несущая платформа высотой, равной высоте нижней расширяющейся кверху части (6 нижних этажей), образовалась из радиально расположенных восьми диафрагм и наклонных подкосов с затяжками, размещаемыми в перекрытиях этажей. На уровне верхней отметки образовывался восьмиугольник в плане со стороной 24 м (рис. 1). На данной платформе как на фундаменте должна была располагаться верхняя часть (14 этажей) каркаса здания с сеткой колонн 6×6 м и перекрытиями этажей высотой 3 м. При такой конструктивной схеме основная нагрузка приходилась на несущую платформу, а часть ствола выше платформы работала, в основном, на восприятие собственного веса. Поперечные сечения элементов несущей платформы, необходимые для восприятия внутренних усилий, получались большими, занимающими значительную часть пространства этажей и затрудняющими их функциональное использование, а требования жесткости консольных частей платформы невыполнимыми. Исходя из этого данный вариант конструктивного решения в качестве базового в дальнейшем не рассматривался.

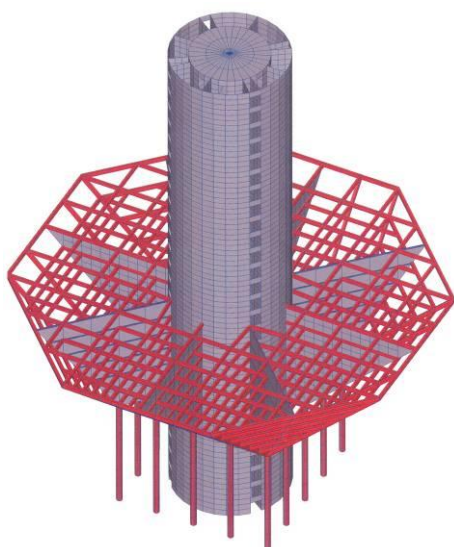


Рис. 1. Исходный вариант конструктивной схемы высотного здания книгохранилища (каркас здания и лифтовая башня условно не показаны)

Компьютерное моделирование вариантов конструктивного решения высотного здания книгохранилища выполнялось с применением сертифицированных программных комплексов: «SCAD-Office» (Киев, Украина), «MicroFE-STARK» (Еврософт, Москва), БЭТА (Новополоцк, ПГУ, Беларусь).

Расчетная схема первого варианта здания книгохранилища была принята в виде жестко защемленного в фундаменте круглого железобетонного ствола высотой 81 м от обреза фундамента, состоящего из стен толщиной 400 мм, расположенных по двум окружностям диаметром 12 и 18 м, связанных между собой 12-ю радиально ориентированными перегородками; рассеченного по высоте внутреннего диаметра перекрытиями в виде круглых плит толщиной 300 мм; трубобетонных колонн по периметру квадрата со стороной 24 м; четырех радиально расположенных железобетонных диафрагм жесткости толщиной 400 мм на всю высоту каркасной части здания; внутреннего железобетонного каркаса с сеткой колонн 6×6 м и монолитными железобетонными балками во взаимно перпендикулярных направлениях (ближайшие к стволу ряды колонн жестко защемлены в фундаменте, остальные – опираются на консольно выступающие балки перекрытий). Для восприятия распора в нижней части на каждом этаже книгохранилища предусмотрены радиально расположенные со смещением на 45° относительно диафрагм стальные затяжки. Фрагмент расчетной схемы варианта 1 сооружения книгохранилища представлен на рисунке 2 (на этом рисунке и далее элементы каркаса здания: колонны, балки и плиты перекрытия, а также лифтовая башня с переходными галереями условно не показаны).

При этом стены ствола с перегородками, перекрытия ствола и диафрагмы моделируются плоскими конечными элементами, а элементы каркаса – стержневыми конечными элементами с жесткими связями в узлах сопряжения. Принято, что расчетные конечные элементы совпадают с геометрическими осями элементов конструкции. Жесткость каждого элемента определяется его проектными размерами и начальным модулем упругости материала. Размеры поперечных сечений стержневых элементов каркаса колонн 1 яруса до отм. 12,6 м – круглые диаметром 1000 мм, до отм. 54,6 м – сечением 500×500 мм, кроме колонн двух крайних рядов (400×400 мм), до отм. 72,6 м – сечением 400×400 мм, балки перекрытия приняты поперечным сечением 400×600 мм, кроме крайних (400×400 мм). Для компьютерного моделирования все железобетонные конструкции приняты из тяжелого бетона класса  $C^{20/25}$ .

При выполнении расчетов учитывались постоянная нагрузка от собственного веса элементов сооружения, исходя из заданных при расчете размеров поперечного сечения и объема материалов. Расчетная постоянная нагрузка от собственного веса конструкции пола и плит перекрытия на данном этапе расчетов была принята 800 кг/м<sup>2</sup>. Расчетная временная нагрузка на перекрытия ствола и каркаса – 1200 кг/м<sup>2</sup>. Таким образом, полная расчетная нагрузка на перекрытие составляла 2 т/м<sup>2</sup>. Учитывая технологический регламент, что наиболее неблагоприятным расположением временной нагрузки на перекрытия может быть односторонняя загрузка в пределах нескольких этажей, в расчете предусматривается неравномерная загрузка 5 этажей книгохранилища. Снеговая нагрузка принималась приложенной к покрытию ствола и горизонтальной части покрытия книгохранилища. Ветровая нагрузка была принята для ветрового района г. Минска для открытой местности с коэффициентом, учитывающим изменение ветрового давления по высоте [2], коэффициентом динамичности, равным 2, и коэффициентом безопасности [3].

Исходя из конструктивной асимметрии здания предусматривали нагружения временной нагрузкой на перекрытия и ветровой нагрузкой в двух вариантах (рис. 3). Расчет производился на действие комбинаций постоянных и временных нагрузок: перемещений узлов расчетной схемы здания – их нормативных значений, внутренних усилий элементов – расчетных значений нагрузок. Для пластинчатых конечных элементов ствола и диафрагм вычислялись нормальные напряжения вдоль касательной, проведенной горизонтально (ось X) и вдоль вертикальной образующей (ось Y). Для стержневых конечных элементов определялись продольные усилия в колоннах и затяжках, продольные усилия и изгибающие моменты в балках каркаса и в наружных балках.

Результаты расчета варианта 1 расчетной схемы показали недопустимые перемещения в вертикальном и горизонтальном направлении узлов, а также неравномерность распределения вертикальных перемещений по горизонтальным сечениям каркаса здания книгохранилища. Соответственно эта неравномерность отражается и на внутренних усилиях в элементах расчетной схемы – наибольшие продольные усилия действуют в колоннах каркаса, жестко опирающихся на фундамент. Продольные усилия в колоннах, опирающихся на податливые наклонные балки нижней части здания, а также изгибающие мо-

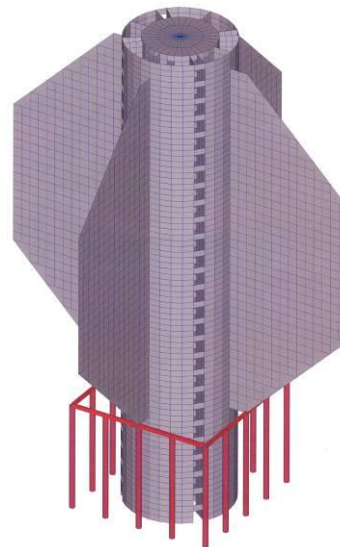


Рис. 2. Вариант 1 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются круглый железобетонный ствол с 4-мя диафрагмами и трубобетонные колонны)

менты в гибких балках перекрытия и наружных обвязочных балках, перераспределяющих усилия с податливых опор на более жесткие, оказались значительно ниже.

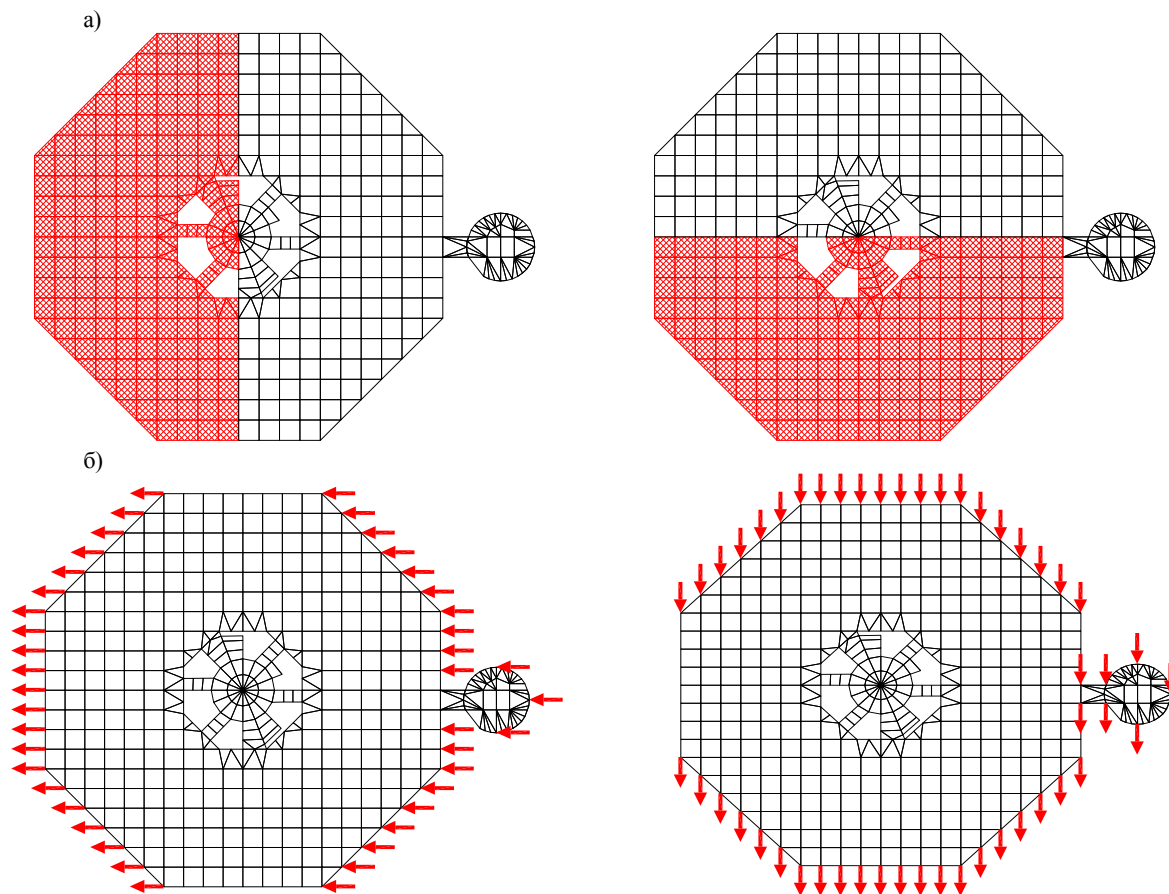


Рис. 3. Схема загрузки временной (а) и ветровой (б) нагрузками

С целью оптимизации конструктивной схемы сооружения книгохранилища и возможности ее исполнения рассматривались модификации конструктивной схемы высотного здания, направленные на повышение жесткости участков здания между диафрагмами.

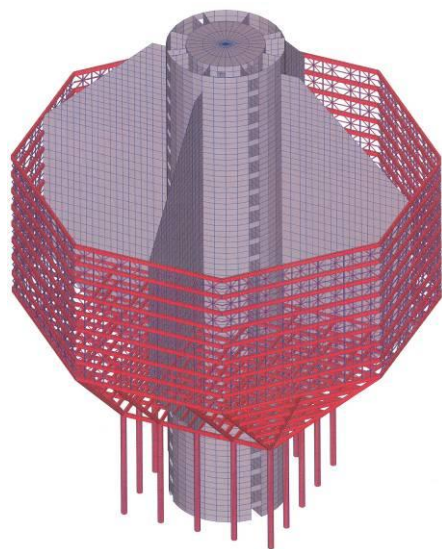


Рис. 4. Вариант 2 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются круглый железобетонный ствол с 4-мя диафрагмами, раскосная решетка по периметру и трубобетонные колонны)

Вариант 2 отличался от базового (варианта 1) наличием дополнительных раскосных решетчатых поясов жесткости в виде вертикальных стоек и наклонных стальных раскосов по периметру сооружения с 10 по 17 этажах, объединяющих наружные балки названных этажей и воспринимающих сдвигающие усилия между ними. Расчетная схема приведена на рисунке 4.

Вариант 3 конструктивной схемы здания книгохранилища (рис. 5) отличался от варианта 1 наличием дополнительных железобетонных диафрагм жесткости толщиной 400 мм, радиально расположенных по биссектрисам углов между диафрагмами базового варианта одинаковой с ними высоты.

Введение дополнительных элементов жесткости позволяет эффективно передать значительную часть нагрузки на ствол не через гибкие балки и податливые затяжки, а через жесткие диафрагмы, разгружая ближайшие к стволу колонны и балки перекрытий нижних и верхних этажей в продольном направлении. Это позволило более равномерно передавать на стенки

ствола сжимающие и растягивающие усилия от диафрагм. В то же время дополнительные элементы жесткости уменьшают габариты помещений для размещения стеллажей с книгами.

Вариант 4 объединяет в себе дополнительные раскосные решетчатые пояса в виде стоек и раскосов по периметру сооружения на 10...17 этажах и дополнительные диафрагмы жесткости (рис. 6).

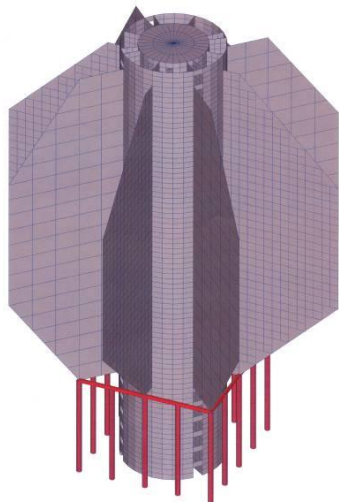


Рис. 5. Вариант 3 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются круглый железобетонный ствол с 8-ю диафрагмами и трубобетонные колонны)

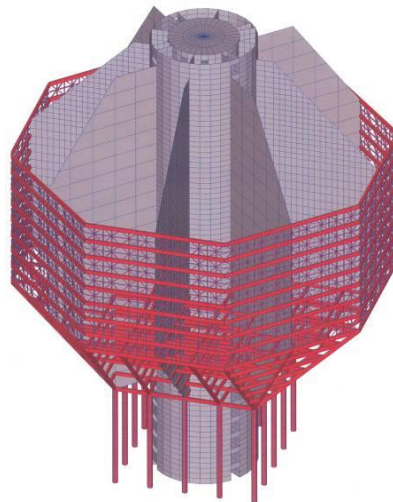


Рис. 6. Вариант 4 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются круглый железобетонный ствол с 8-ю диафрагмами, раскосная решетка по периметру и трубобетонные колонны)

Варианты 5 и 6 конструктивной схемы здания книгохранилища (рис. 7, 8) появились после дополнительной архитектурной и технологической проработки. Дополнительными элементами в названных вариантах, повышающими жесткость и устойчивость каркаса здания книгохранилища, являются подкосы, опирающиеся на стальное опорное кольцо и воспринимающие нагрузку от колонн каркаса, расположенных между железобетонными диафрагмами. При этом вертикальная составляющая усилий в наклонных подкосах передается на дополнительные железобетонные колонны в месте опирания подкосов по периметру кольца. Кроме того, была изменена форма поперечного сечения железобетонного ствола (более технологичная при производстве опалубочных работ при строительстве – восьмиугольная).

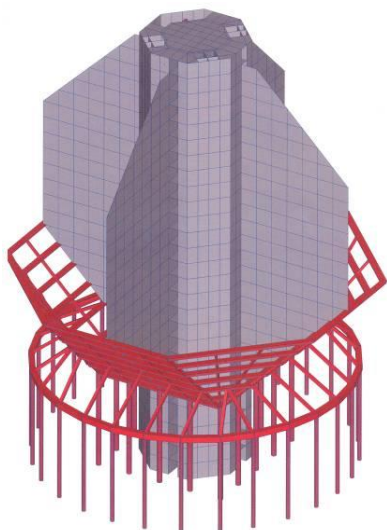


Рис. 7. Вариант 5 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются восьмигранный железобетонный ствол с 4-мя диафрагмами, опорное кольцо с раскосами и трубобетонные колонны)

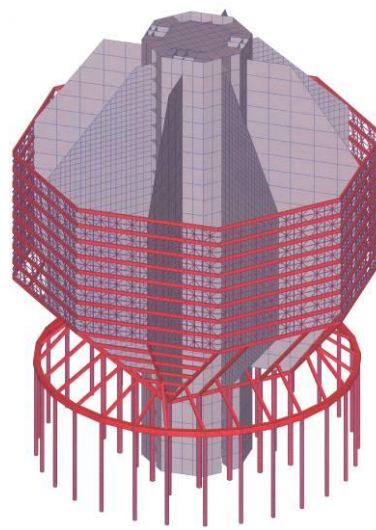


Рис. 8. Вариант 6 конструктивной схемы здания книгохранилища (несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются восьмигранный железобетонный ствол с 8-ю диафрагмами, раскосная решетка по периметру, опорное кольцо с раскосами и трубобетонные колонны)

На основании выполненных предварительных расчетов высотного здания книгохранилища были выявлены основные закономерности распределения параметров напряженно-деформированного состояния элементов здания под нагрузкой и влияние изменения жесткости основных частей сооружения на перемещения и внутренние усилия. Положительно влияет на уменьшение вертикальных и горизонтальных перемещений сооружения повышение его пространственной жесткости за счет введения дополнительных элементов жесткости (диафрагм, решетчатых поясов, дополнительных подкосов).

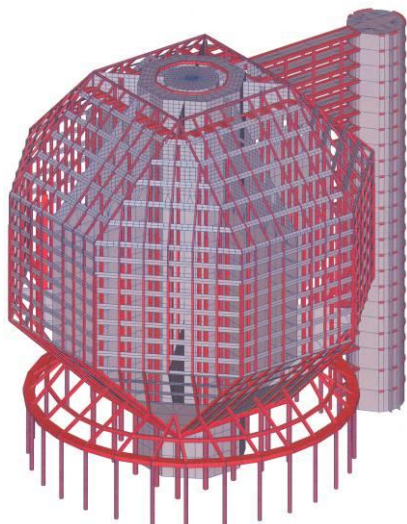


Рис. 9. Принятый базовый вариант конструктивной схемы здания книгохранилища

(несущими элементами, воспринимающими нагрузку от элементов каркаса, являются восьмигранный железобетонный ствол с 4-мя диафрагмами на всю высоту и 4-мя диафрагмами 6-ти нижних и 2-х верхних этажах, безраскосная железобетонная решетка по поверхности, опорное кольцо с раскосами, безбалочные железобетонные перекрытия этажей и трубобетонные колонны)

Выполненные предварительные расчеты предложенных с учетом требований прочности, жесткости, сохранения максимального объема помещений для размещения стеллажей для книг, внешней привлекательности и пожаробезопасности конструктивных схем высотного здания книгохранилища был выбран окончательный базовый вариант конструктивной схемы.

Базовым вариантом для последующей конструктивной проработки принят вариант 6 (рис. 9) со следующей модификацией:

- дополнительные железобетонные диафрагмы жесткости выполняются не на всю высоту, а только на 6-ти нижних этажах и 2-х верхних этажах;

- раскосные решетки со стальными раскосами по периметру здания заменены на более эстетичные безраскосные железобетонные;

- взамен монолитных балочных перекрытий приняты монолитные железобетонные безбалочные перекрытия этажей, позволяющие более полно использовать объем помещений для размещения стеллажей для книг.

Результаты расчета максимальных значений сопоставляемых параметров напряженно-деформированного состояния элементов вариантов и принятого базового варианта конструктивной схемы высотного здания книгохранилища представлены в таблице.

Максимальные значения перемещений и внутренних усилий (напряжений) в элементах

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6	Базовый
Вертикальные перемещения, мм	200	116	92	59	107	40	43
Горизонтальные перемещения, мм	54	30	21	20	37	29	6
Нормальные напряжения в стволе и диафрагмах (горизонтальные), г/см <sup>2</sup>	<u>120</u> -270	<u>117</u> -238	<u>150</u> -381	<u>175</u> -341	<u>47</u> -128	<u>37</u> -335	<u>195</u> -132
Нормальные напряжения в стволе и диафрагмах (вертикальные), кг/см <sup>2</sup>	<u>32</u> -244	<u>80</u> -285	<u>47</u> -291	<u>42</u> -288	<u>62</u> -144	<u>42</u> -225	<u>139</u> -149
Продольные усилия в колоннах, т	<u>130</u> -5713	<u>142</u> -4540	<u>341</u> -2415	<u>282</u> -2326	<u>151</u> -3661	<u>167</u> -5135	<u>205</u> -1869
Продольные усилия в наружных балках, т	<u>407</u> -1913	<u>956</u> -1417	<u>1201</u> -1410	<u>861</u> -1070	<u>349</u> -1530	<u>305</u> -913	<u>189</u> -754
Изгибающие моменты в наружных балках, т·м	113	147	193	141	122	147	170

На рисунке 10 приведено распределение вертикальных перемещений узлов расчетной схемы принятого базового варианта.

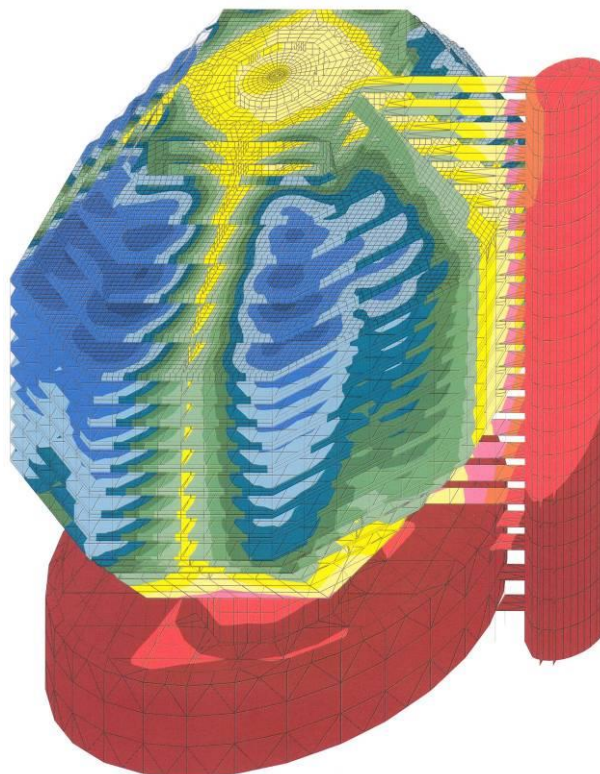
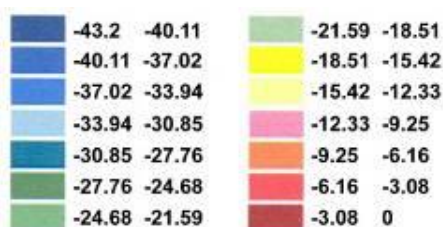


Рис. 10. Вертикальные перемещения узлов конструктивной схемы здания книгохранилища:



Предложенная конструктивная схема здания оценена с позиций механики деформируемых систем, проведена верификация расчетной схемы, исследована устойчивость здания при динамических воздействиях [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архитектурно-конструктивные решения уникального здания Национальной библиотеки Беларуси / М.К. Виноградов, В.В. Крамаренко, Л.М. Шохина, Т.М. Пецольд, Д.Н. Лазовский, В.А. Потерщук // Строительная наука и техника. – № 1. – 2005. – С. 8 – 13.
2. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. – М., 1986. – 36 с.
3. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции (с изм.) / Минкстройархитектуры. – Мн., 2003. – 139 с.
4. Особенности работы каркаса книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь / А.А. Борисевич, Д.Н. Лазовский, Т.М. Пецольд, Е.М. Сидорович // Вестник БНТУ. – 2004. – № 6. – С. 5 – 12.