

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рак Н. Plain Concrete Strength Under Local Compression According To Belarusian Building Code // Behavior of Concrete at High Temperatures and Advanced Design of Concrete Structures. — Мн.: Технопринт, 2003. — С.206-217
2. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. — Мн.: РУП «Минсктиппроект», 2003. — 140 с.
3. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах железобетонных конструкций: Монография. — Брест, БГТУ, 2003. — 252 с.
4. Заварзаев Г.Н. Платформенный стык с усилением внешним армированием тонколистовой стальной участков внутренних несущих стеновых панелей крупнопанельных зданий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / НИИЖБ. — М. 1988. — 19 с.
5. Клевцов В.А., Бирулин Ю.Ф., Заварзаев Г.Н. Влияние пластин закладных деталей на прочность узлов железобетонных конструкций при местном сжатии // Бетон и железобетон. — 1990. — № 2. — С. 16-18.
6. Гусева Т.К. Расчет и конструирование зон концентрированного приложения нагрузки в железобетонных мостах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.15 / ЦНИИС. — М., 1991. — 20 с.
7. Рак Н.А., Аль-Арики Н. Влияние условий приложения нагрузки на прочность тяжелого высокопрочного бетона при местном сжатии // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2002. — № 1(13) — С.64-68.
8. Рак Н.А. Расчет прочности опорных участков железобетонных конструкций при местном приложении нагрузки с учетом их конструктивных особенностей // Инженерные проблемы современного бетона и железобетона: Материалы Международной конференции. — Мн.: БелНИИС, 1997. — Т. 1, ч. 2. — С.107-114.

УДК 624.04

*Борисевич А. А., Босаков С. В., Сидорович Е. М.*

### ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗДАНИЯ КНИГОХРАНИЛИЩА НАЦИОНАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ

Исследования о влиянии вибраций туннелей метрополитена мелкого заложения на близлежащие здания и сооружения, проведенные различными авторами [1, 2, 3, 4, 5], показали актуальность и значимость этой проблемы. Так, по данным В. А. Ильичева [5], продолжительность колебаний в зданиях, расположенных вблизи проходящего поезда метрополитена, составляет примерно 10 сек., а продолжительность воздействия колебаний в часы пик может достичь 10-20% общего времени эксплуатации метрополитена. Характеризуя параметры колебаний, В. А. Ильичев отмечает, что спектральный состав этих колебаний достаточно широк (5-100 Гц), однако основная энергия колебаний сосредоточена в диапазоне 30-40 Гц, а максимальные амплитуды колебаний несущих конструкций зданий, расположенных вблизи трассы метрополитена мелкого заложения, равны нескольким микронам. Однако при скорости колебаний 0,5 мм/сек. ускорение колебаний может достигать 20 см/сек.<sup>2</sup>, что по шкале MSK-64 эквивалентно сейсмическому воздействию интенсивностью 5 баллов [6]. Колебания такой интенсивности могут быть ощутимыми и раздражающе действовать на людей. Наиболее опасными для зданий являются горизонтальные колебания поперек оси туннеля, совершающиеся обычно в диапазоне 35-60 Гц. При амплитудах колебаний отделки туннелей в 3-15 мкм они могут вызывать амплитуды колебаний близлежащих конструкций в 1-3 мкм [4, 5].

Учитывая, что здание Национальной библиотеки Республики Беларусь является уникальным инженерным объектом, проблема его защиты от колебаний, возникающих при движении поездов метрополитена, приобретает особую значимость.

По указанным причинам авторы настоящей работы провели всестороннюю оценку поведения системы "туннель метрополитена – грунтовый массив – фундамент-каркас книгохранилища" при вибрационном воздействии со стороны туннеля. Вследствие отсутствия достоверной методики оценки «работы грунта» при вибрационном воздействии было принято решение о комплексном исследовании поведения системы "туннель метрополитена-каркас книгохранилища" в резонансных режимах в диапазоне частот 30 – 60 Гц.

При заданных уровнях вибраций отделки туннелей метрополитена при движении метropоездов определялись уровни виброускорений, виброскоростей и виброперемещений в элементов каркаса книгохранилища и оценивалось их влияние на людей и высокоточное оборудование.

В соответствии с [9] была принята модель основания в виде фрагмента линейно деформируемого полупространства с ограничением глубины деформируемой толщи. Так как глубина сжимаемой толщи грунта нормируется [9] только в зависимости от значений вертикальных дополнительных и бытовых напряжений, потребовалось решение задачи по определению глубины деформируемой толщи при действии горизонтальных кинематических воздействий. Для предварительной оценки была исследована пространственная система "каркас-фундамент-основание-обделка туннеля" в условиях плоской деформации (рис. 1). Параметры условной плоскостной модели здания книгохранилища подбирались так, чтобы ее первые собственные частоты совпадали с первыми собственными частотами рассмотренной ранее [1, 10] пространственной расчетной модели. Первая собственная частота плоскостной модели при жестком защемлении каркаса в фундаменте оказалась равной 1.5 Гц при собственной частоте соответствующей формы (третьей) пространственной модели [1, 10], равной 1.04 Гц. Плоскостная расчетная модель каркаса книгохранилища на безынерционном упругом основании Винклера-Пастернака (два коэффициента пружины) имела первую собственную частоту равную 0.35 Гц, в то время как соответствующая частота (вторая) пространственной модели на том же безынерционном основании Винклера-Пастернака была равна 0.38 Гц.

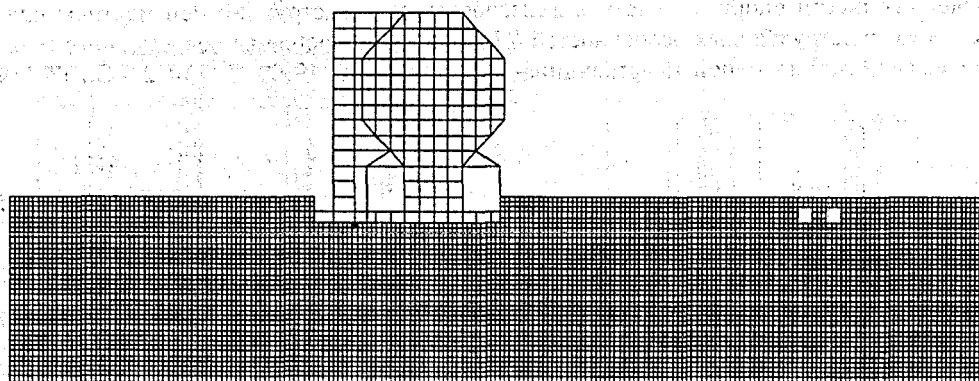


Рисунок 1 – Плоскостная расчетная модель системы "Каркас-основание-туннели"

Условность приведенных значений первых собственных частот подтверждается фактом их зависимости от модели основания и учета его инерционности. Для модели безынерционного основания в виде фрагмента полупространства (плоская деформация) размером 400 на 70 метров первая собственная частота колебаний каркаса понизилась до 0.25 Гц. Увеличение размеров фрагмента безынерционного полупространства до размеров 400 на 400 м (плоская деформация) снизило первую собственную частоту до 0.20 Гц. Еще большее влияние оказал учет инерционности основания. В этом случае колеблется само основание, а жесткий каркас как бы плавает на нем. Первая собственная частота была равна 0.105 Гц (рис. 2), а вторая – 0.115 Гц.

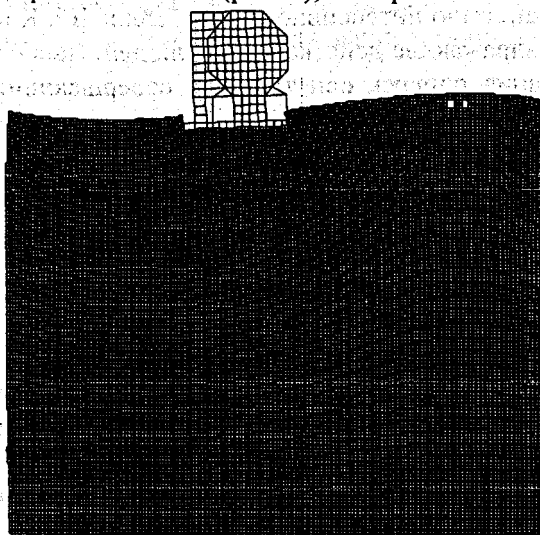


Рисунок 2 – Первая собственная форма (0.105 Гц) колебаний плоскостной модели на фрагменте инерционного полупространства размером 400×400 м

Отметим, что первые собственные частоты системы "Каркас-основание-туннели" являются достаточно низкими при любых моделях деформируемого основания. Тем не менее, даже безынерционные модели деформируемого основания позволили выявить основную особенность исследуемой системы. В частотном диапазоне 30-60 Гц собственные колебания с относительно большими амплитудами совершают отдельные достаточно жесткие элементы каркаса при почти неподвижном основании. Это значит, что вибровоздействия с малыми амплитудами, создаваемые метропоездами; могут вызвать в здании книгохранилища (в стилобате, возможно, тоже) резонансные колебания локального характера (колебания перекрытий, колонн или элементов обвязки отдельных этажей).

Предварительные исследования собственных колебаний реальной пространственной модели каркаса книгохранилища, проведенные методом дихотомии спектра собственных частот, позволили установить следующее:

в диапазоне 30-35 Гц находится 305 собственных частот;

в диапазоне 35-40 Гц находится 163 собственные частоты;

в диапазоне 40-50 Гц находится 338 собственных частот;

в диапазоне 50-60 Гц находится 427 собственных частот.

Для диапазона 40-41 Гц удалось уточнить 32 собственные частоты и найти соответствующие собственные формы. В этом достаточно узком диапазоне частот происходят колебания перекрытий верхних и нижних (рис. 3) этажей, переходных галерей, колонн, элементов обвязки, фундаментов и лестнично-лифтового ствола.

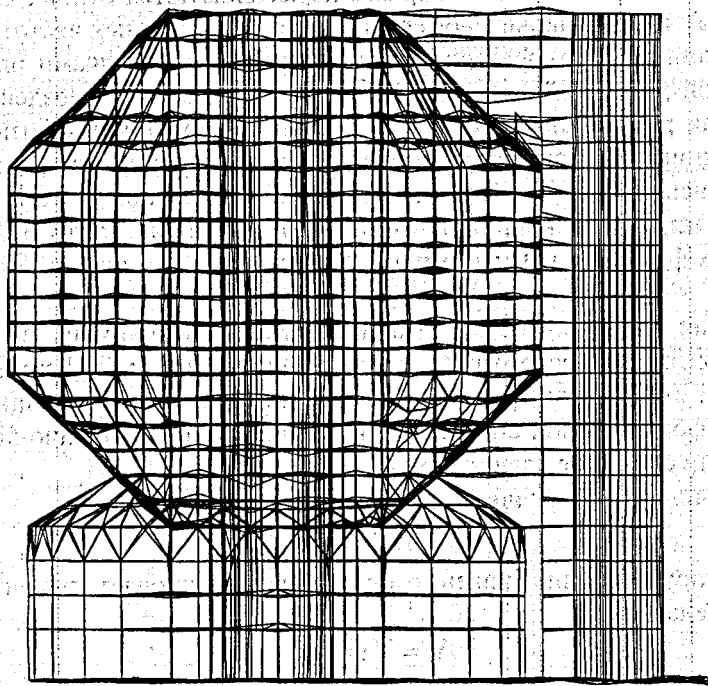


Рисунок 3 – Вибрации каркаса на частоте 40.032 Гц

Для возможности проведения динамического расчета книгохранилища на кинематические вибровоздействия, передаваемые обделкой туннеля, сначала определялись статические перемещения подошвы фундамента каркаса. Это было выполнено статическим расчетом системы "каркас-основание-туннель" на некоторые заданные силовые воздействия, приложенные к обделке туннеля, причем искомые перемещения вычислялись в долях от перемещений обделки туннеля. Проведенные расчеты показали, что значения искомых перемещений подошвы фундамента здания книгохранилища существенно зависят от принимаемой расчетной конечно-элементной модели основания.

Так, для фрагмента деформируемого основания в условиях плоской деформации размером 400 на 70 метров при неподвижном закреплении по нижней кромке и свободных остальных кромках уровень вертикальных перемещений подошвы фундамента составил 1% от уровня вертикальных перемещений лотковой части туннеля, а уровень горизонтальных перемещений подошвы фундамента – 15% от уровня горизонтальных перемещений обделки туннеля. При скользящей нижней кромке де-

формируемого слоя, неподвижной по горизонтали левой и свободной правой и верхней уровень горизонтальных перемещений подошвы фундамента увеличился до 63% от уровня горизонтальных перемещений обделки туннеля. При закрепленных левой и нижней кромках деформируемого слоя уровень горизонтальных перемещений подошвы фундамента составил 12% от уровня горизонтальных перемещений обделки туннеля.

Увеличение высоты и ширины деформируемого слоя привело, в соответствии с законами деформирования упругих тел, к увеличению искомых перемещений. Введение деформируемых связей вместо закрепленных и свободных кромок эквивалентно увеличению абсолютных размеров конечно-элементной модели деформируемого слоя. Для всех исследованных моделей уровни горизонтальных перемещений, как наиболее опасных, находились в пределах от 10% до 65% от уровня горизонтальных перемещений обделки туннеля.

В современных проектно-вычислительных комплексах (ПВК SCAD, LIRA) для расчета сооружений на вибрационные силовые воздействия применяется метод разложения движения по формам собственных колебаний. При этом полагается, что в расчете могут быть учтены только несколько низших собственных форм как наиболее значимых для прочности сооружения. Проведенные исследования показали, что пространственная модель системы «каркас книгохранилища – инерционное грунтовое основание» обладает сотнями тысяч собственных форм. Парциальные колебания каркаса как твердого тела на деформируемом основании и парциальные колебания самого деформируемого основания (модель основания имеет конечные размеры) характеризуются низкими частотами (0,1, ..., 10 Гц). Парциальные колебания элементов каркаса характеризуются относительно высокими частотами (30 – 80 Гц и выше); их порядковые номера в спектре собственных частот системы «каркас книгохранилища – инерционное грунтовое основание» исчисляются тысячами или десятками тысяч (в зависимости от принятой расчетной модели). Основные вибрационные воздействия подвижного состава метрополитена как раз лежат в последнем диапазоне. При таких соотношениях собственных частот и частот вибрационного воздействия расчетные виброперемещения каркаса и виброусилия в его элементах получались нулевыми. В соответствии с заложенной в него методикой проектно-вычислительный комплекс (ПВК), например, SCAD не в состоянии найти и учесть в расчете такое количество собственных форм. По учитываемым в ПВК нескольким низшим формам колебания просто не возбуждаются.

Для подтверждения или опровержения таких результатов одним из авторов был создан программный комплекс для динамического расчета стержневых систем (деформируемое основание заменяется эквивалентной стержневой моделью), основанный на решении общих дифференциальных уравнений движения деформируемой системы при одночастотном вибрационном воздействии. Суть принятого метода расчета состоит в следующем.

Исходя из системы дифференциальных уравнений движения

$$M\ddot{Y} + RY = F \sin \theta t,$$

пренебрегая силами неупругого сопротивления, определяются одночастотные гармонические колебания в установившемся режиме

$$Y = V \sin \theta t.$$

Подставив искомое решение в систему дифференциальных уравнений движения, можно получить систему алгебраических уравнений относительно амплитуд перемещений (виброперемещений) узлов деформируемой системы

$$(R - \theta^2 M)V = F,$$

где  $R$  – матрица жесткости рассчитываемой модели сооружения;

$\theta$  – задаваемая круговая частота вибровоздействия;

$M$  – матрица узловых масс деформируемой системы;

$V$  – искомые амплитуды динамических перемещений;

$F$  – амплитуды задаваемых вибрационных узловых нагрузок.

Отличительной особенностью полученной системы линейных алгебраических уравнений является знаковая неопределенность ее матрицы коэффициентов (динамической матрицы жесткости) при достаточно высоких частотах возбуждения.

Формирование матрицы жесткости стержневой системы реализовано методом стержневых конечных элементов. В основу решения полученной системы линейных алгебраических уравнений с учетом симметричности и ленточной структуры матрицы коэффициентов положена стандартная про-

грамма [13], реализующая метод квадратных корней для положительно определенных матриц. Данная программа была модифицирована так, что стала применима для решения систем линейных уравнений со знаконеопределенной матрицей коэффициентов. Графическая визуализация результатов расчета, программирование и компиляция были выполнены программными средствами на базе алгоритмического языка Фортран-98. Разработанный программный комплекс прошел верификацию путем решения тестовых задач и сравнения полученных результатов с известными решениями и с результатами, полученными с помощью других проектно-вычислительных комплексов.

Затем была рассмотрена плоскостная модель системы «каркас книгохранилища – инерционное грунтовое основание» в виде плоской рамы на фрагменте линейно деформируемого основания размером  $60 \times 300 \text{ м}^2$  в условиях плоской деформации. Деформируемое основание моделировалось шарнирно-стержневой структурой [14]. Параметры рамной системы и структуры, моделирующей основание, выбирались из условия совпадения первых собственных частот пространственной конечно-элементной модели объекта на безынерционном основании (ПБК SCAD) и плоскостной модели также на безынерционном основании (разработанный ПК). Дальнейшие исследования плоскостной модели проводились с учетом инерционности основания. Общие количественные параметры плоскостной модели: 1386 узлов, 6927 стержней, порядок решаемой системы линейных алгебраических уравнений – 4158, количество кодиагоналей верхнего треугольника матрицы коэффициентов – 1811. Размеры ячейки модели упругого основания  $4 \times 4 \text{ м}^2$ . Вибрационное воздействие моделировалось восемью горизонтальными гармоническими силами с единичными амплитудами и варьируемыми частотами, приложенными в зоне расположения туннелей метрополитена на глубине 4 м и 8 м с шагом по горизонтали 4 м.

Исследовался отклик каркаса и основания на указанные вибрационные воздействия с разными частотами от 0.2 гц до 60 гц. Виброперемещения фиксировались в грунте на месте воздействия (точка 1), в центре подошвы фундамента (точка 2) и в самом верхнем узле каркаса (точка 3). Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Частота возмущения (Герцы)	Количество предыдущ. собственных частот	Вычисленные виброперемещения (мкм)			Экспериментальные виброперемещения (мкм)	Поправочный коэффициент
		Точка 1	Точка 2	Точка 3		
0.2	0	$46 \times 10^4$	$83 \times 10^4$	$1.26 \times 10^6$	—	—
7.5	1240	85	1.7	2.4	1.2	0.014
8	1406	70	9.9	19	2	0.028
9	1873	860	6.7	15	2.2	0.0026
10	2163	230	0	0	0.9	0.0039
23	2179	17	0	0	0.4	0.024
35	2193	7.2	0	0	8	1.11
40	2208	5.5	0	0	2	0.36
45	2221	4.3	0	0	1.3	0.30
51	2231	3.3	0	0	3.2	0.97
55	2234	2.9	0	0	5	1.72
60	2240	2.4	0	0	1.6	0.67

Из анализа результатов динамического расчета на вибрационные силовые воздействия следует вывод о том, что каркас книгохранилища заметно откликается только на низкочастотные колебания с частотой вынуждающей нагрузки до 9 герц. При частоте воздействия 10 Гц и выше колебания собственно каркаса в рассматриваемой расчетной модели получаются пренебрежимо малыми. На высоких частотах возбуждаются колебания только деформируемого основания вблизи точек приложения вибрационных сил, хотя колебания элементов каркаса и в данной модели, как и в пространственной модели, характеризуются высокими частотами.

Надо подчеркнуть принципиальное значение количества учитываемых форм собственных колебаний при динамическом расчете здания книгохранилища. Критерием здесь служит полнота базиса [15], эквивалентная работе внешних сил, которая печатается в протоколе расчета по каждой форме собственных колебаний. Расчеты, выполненные для первых 100 форм собственных колебаний, не дали возможность увидеть пренебрежимо малое значение последних шести форм колебаний, что гово-

рит о насущной необходимости учета значительно большего числа собственных форм колебаний конструкции книгохранилища при всех динамических расчетах, в т.ч. и на пульсацию ветра.

Выполненные теоретические и численно-аналитические исследования позволили сделать следующие выводы.

При учете инерционных свойств грунтового массива количество собственных частот исследуемой пространственной модели исчисляется сотнями тысяч, из них десятки тысяч относятся к низкочастотной зоне (0.1 – 10 Гц). В плоскостных моделях к низкочастотной зоне относятся несколько тысяч собственных частот, независимо от различных расчетных моделей грунтового основания. Указанные особенности могут служить основой для увеличения количества резонансных полос системы "туннель метрополитена–грунтовой массив–фундамент–каркас книгохранилища".

Вибровоздействия с малыми амплитудами от метропоездов с большой долей вероятности могут вызвать в здании книгохранилища резонансные колебания локального характера (колебания перекрытий, колонн, переходных галерей или обвязочных элементов отдельных этажей).

Расчеты, выполненные по трем независимо разработанным программным комплексам (ПВК SCAD, ПВК ЛИРА, и разработанному ПК) на воздействия от подвижного транспорта метрополитена, показали существенное различие в значениях перемещений и усилий в узлах и элементах каркаса книгохранилища. Так, ПВК SCAD и разработанный ПК, например, при вибровоздействии с частотой 45 Гц дали пренебрежимо малые перемещения узла 148, в то время как ПВК ЛИРА дал большие перемещения этого узла. Это объясняется разными методиками динамического расчета, заложенными в ПВК.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование численно-аналитическими методами прочности, жесткости и устойчивости конструкций здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь и выдача заключения: Отчет о НИР (заключит.) / БНТУ; Рук. темы А. А. Борисевич. – № г.р. 200367. – Мн.: 2003. – 74 с.
2. Кудрявцев И. А. Влияние вибрации на основания сооружений. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 274 с.
3. Поляков В. С., Грановский А.Н. Влияние параметров рельсового основания пути метрополитенов на уровень колебания обделки туннелей // Строительная механика и расчет сооружений, № 3, 1987. – С. 58 – 61.
4. Ильичев В. А., Шехтер О. Я. Определение динамических напряжений и перемещений в упругой полуплоскости от внутреннего источника, имитирующего воздействие туннеля метрополитена мелкого заложения. // Основания и фундаменты при сейсмических и динамических воздействиях: Тр. / НИИОПС. – М., 1976. – Вып. 67. – С. 42–64.
5. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия: Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – С.-Пб.: Наука, 1998. – 253 с.
7. Дорман И. Я. Борьба с вибрацией и шумом, создаваемыми поездами метрополитена. – М.: 1973. – 123 с.
8. Прогнозирование уровней вибраций грунта от движения метропоездов и расчет виброзащиты строительных устройств: Ведомственные строительные нормы ВСН 211-91. / Согласованы Госстроем СССР 31 октября 1991 г. № АЧ-786-8. – М.: Мин-во трансп. стр.-ва, 1991. – 35 с.
9. Основания зданий и сооружений: СНиП 2.02.01-83. – М.: Стройиздат, 1985. – 42 с.
10. Борисевич А. А., Босаков С. В., Сидорович Е. М. Национальная библиотека Республики Беларусь. Некоторые основные вопросы теории сооружений / Белорусский строительный рынок. – 2003. – № 19(184). – С. 10 – 16.
11. Заключение по расчету деформаций основания, содержащего биогенные грунты фундаментной плиты под здание «Национальной библиотеки Беларуси». В. Е. Сеськов, БелНИИС, Мн., 2002. – 82 с.
12. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, Б. Я. Лашеников, Н. Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
13. Сборник научных программ на фортране. Вып. 2: Матричная алгебра и линейная алгебра. Нью-Йорк, 1960–1971, пер. с англ. (США), – М. «Статистика», 1974. – 224 с.
14. Сидорович Е. М. Нелинейное деформирование, статическая и динамическая устойчивость пространственных стержневых систем. Мн.: БГПА, 1999. – 200 с.
15. Перельмутер А. В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. – Киев: «Сталь», 2002. – 597 с.