

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ **РИСКИ**

**БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ**

научно-технический журнал

5 | 2013





Р. Н. ГУЗЕЕВ, канд. техн. наук,  
В. А. ПЕТРОВ, канд. техн. наук,  
К. Ю. ПОЛИНКЕВИЧ, инженер  
(ЗАО «Институт Гипростроймост — Санкт-Петербург»)

## РАСЧЁТ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННОГО ЗДАНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ТЕРМИНАЛА НА СТ. АДЛЕР

*Выполнен расчётный анализ сейсмической реакции здания конкурса пассажирского терминала в г. Адлере. Использована нелинейная динамическая теория сейсмостойкости. Для снижения сейсмического отклика здания применена система сейсмоизоляции, включающая резинометаллические опорные части со свинцовым сердечником и гидравлические демпферы. Нелинейный анализ динамического поведения конструкции выполняется на основе метода конечных элементов. Результаты расчёта показывают, что все конструктивные элементы здания отвечают условиям прочности и сейсмостойкости.*

*Ключевые слова: сейсмоизолированное здание, сейсмическая реакция, пассажирский терминал, сейсмостойкость, сейсмоизоляция, резинометаллические опоры, свинцовый сердечник, гидравлический демпфер, метод конечных элементов.*

### 1. Введение

Современные средства сейсмоизоляции и сейсмозащиты позволяют существенно повысить сейсмостойкость ответственных зданий и сооружений. Использование сейсмоизолирующих устройств в конструкциях зданий приводит к необходимости применения адекватных методов расчётного анализа их сейсмической реакции. Статья посвящена расчётному анализу сейсмического отклика сейсмоизолированного здания конкурса пассажирского терминала на ст. Адлер.

Строительство терминала приурочено к XXII зимним Олимпийским Играм. Комплекс зданий возводится по уникальному проекту на месте старого вокзала непосредственно над действующими железнодорожными путями в сейсмически опасном районе. Расчётная интенсивность землетрясения составляет 9 баллов по шкале MSK-64.

### 2. Описание конструкции здания и его расчётной модели

Комплекс зданий пассажирского терминала включает здания городской части, морской части и конкурса, разделённые антисейсмическими деформационными швами.

Здание конкурса возводится по уникальному проекту с покрытием, напоминающим по форме набегающую морскую волну. Плановые размеры здания 95,0×62,5 м, высота 30,0 м. Несущие элементы здания изготавлива-

ются из стальных конструкций и монолитного железобетона.

Основу несущего каркаса составляют 26 железобетонных колонны высотой 9,5 м и сечением 1,5×2,0 м, выполненных из бетона В40 и расположенных в межпутевом пространстве.

Перекрытия первого этажа на отм. +10,800 и второго этажа на отм. +15,750 представляют собой сталежелезобетонные балочные клетки.

Балочная клетка первого этажа состоит из 6 главных продольных двутавровых балок, поперечные балки располагаются с шагом 6,0 м, толщина плиты составляет 200 мм. Балочная клетка второго этажа состоит из 4 главных продольных балок коробчатого сечения, поперечные балки располагаются с шагом 3,0 м. Железобетонная плита толщиной 80 мм работает совместно со стальным профилированным листом.

По колоннам между отметками 10,800 и 15,750 устраивается система вертикальных связей. Лестничные шахты из монолитного железобетона с толщиной стен 160 мм включены в ядро жесткости.

Несущие конструкции выше отм. +10,800 приняты в стальном исполнении. Покрытие представляет собой балочную систему с максимальным пролетом 30 м, строительной высотой 1,5 м, шагом поперечных балок 6 м и шагом продольных балок 6-12 м. Конструкция опирается на V-образные стойки, в основании которых (отм. +15,750) устраиваются шарнирно неподвижные опорные части. Связевое

заполнение устроено по периметру кровли, а также в зонах опирания.

Фасадная часть покрытия — это пространственная конструкция из трубчатых элементов, с шагом основных несущих ферм 6 м. Конструкция жестко крепится к плитам первого и второго этажей.

Высокая ответственность здания конкурса привела к необходимости включения в проект системы сейсмоизолирующих устройств.

Балочная клетка первого этажа опирается на железобетонные колонны через 26 резинометаллических опорных частей со свинцовым сердечником (РОЧ) с максимально допустимым горизонтальным смещением 200 мм. В зонах размещения РОЧ устанавливаются гидравлические демпферы (14 демпферов в продольном направлении и 12 — в поперечном). При высоких скоростях движения штока в гидравлических демпферах может возникнуть усилие до 1000 кН.

Верхняя сейсмоизолированная часть здания представляет собой слабodeформируемый блок, благодаря наличию перекрытий, вертикальных связей, V-образных стоек, лестничных и лифтовых шахт.

При сейсмическом воздействии верхний конструктивный блок поступательно движется на опорных частях, не испытывая существенных изгибных деформаций. При горизонтальных смещениях происходит рассеивание энергии в гидравлических демпферах и свинцовых сердечниках РОЧ.



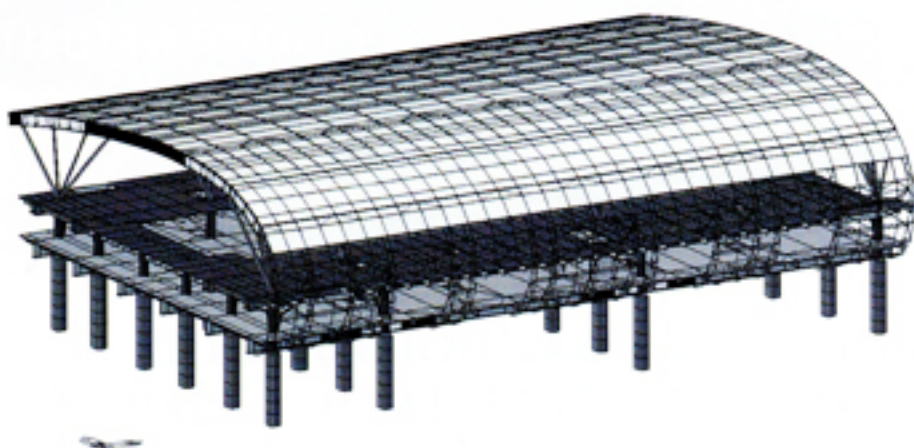


Рис. 1. Конечно-элементная модель здания конкурса

Рассеивание энергии землетрясения происходит за счет работы антисейсмических устройств, а не за счет необратимого пластического деформирования основных несущих конструкций. Таким образом, существенно повышается надежность здания в случае сейсмического воздействия.

Расчет здания выполнен на эксплуатационные нагрузки и сейсмические воздействия, а также на основные и особые сочетания нагрузок и воздействий.

Конечно-элементная модель здания показана на рис.1. Колонны, балочные клетки перекрытий и покрытия (включая фасадную часть), V-образные стойки, связи, а также лифтовые шахты и лестничные клетки схематизированы балочными конечными элементами. Железобетонные плиты перекрытий, а также профилированные листы кровли представлены конечными элементами пластины.

В нелинейных динамических расчетах антисейсмические устройства моделируются нелинейными двухузловыми связями.

Колонны железобетонного каркаса считаются жестко заделанными в фундаменты.

Основная трудность расчета здания, включающего систему сейсмоизолирующих устройств, по динамической теории сейсмостойкости состоит в учете нелинейного поведения резинометаллических опорных частей и гидравлических демпферов.

Резинометаллическая опорная часть со свинцовым сердечником имеет билинейную диаграмму деформирования (рис. 2), которая описывается уравнениями:

$$f = r k d + (1-r)F_y z$$

$$\dot{z} = \frac{k}{F_y} \left[ 1 - |z|^2 (\alpha \operatorname{sign}(\dot{z}) + \beta) \right] \dot{d} \quad (1)$$

где  $d$  — горизонтальное перемещение,  $k$  — начальная жесткость,  $r$  — отношение конечной и начальной жесткостей,  $F_y$  — предельное горизонтальное усилие, при котором возникают пластические деформации свинцового сердечника,  $\alpha$  и  $\beta$  — характеристики петли гистерезиса.

Приведенная модель позволяет учитывать гистерезисное поведение РОЧ и напрямую учитывать рассеивание энергии.

Гидравлический демпфер описывается моделью Максвелла, в которой пружина последовательно соединяется с вязким демпфером. Жесткость пружины определяет сжимаемость жидкости. Усилие в демпфере является нелинейной функцией скорости:

$$f = C_d \left( \operatorname{sign}(\dot{d}) \left( \frac{\dot{d}}{v_0} \right)^\alpha \right) \quad (2)$$

где относительная скорость  $v_0 = 1,0 \text{ м/с}$ ,  $C_d$ ,  $\alpha$  — параметры демпфера.

Статические расчеты на эксплуатационные нагрузки выполняются в линейной

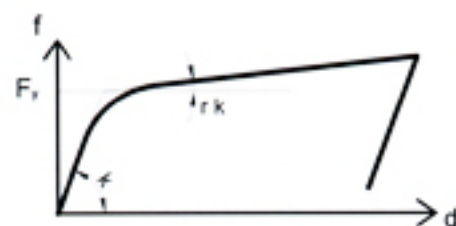


Рис. 2. Диаграмма деформирования резинометаллической опорной части со свинцовым сердечником

постановке. Эксплуатационные нагрузки задаются в соответствии с [1] и включают нагрузки от оборудования и людей, снеговые нагрузки на кровлю и ветровые воздействия на её фасадную часть.

Динамические расчеты здания выполняются методом прямого интегрирования по времени. Сейсмическое воздействие задается с помощью трёхкомпонентной акселерограммы землетрясения, действующей на свободной поверхности грунтового основания. Акселерограмма синтезирована с учетом сейсмогеологических условий площадки строительства в соответствии с [2]. Продолжительность акселерограммы составляет 16 с, шаг цифровки —  $\Delta t = 0,01 \text{ с}$ , пиковые значения горизонтальных ускорений —  $4 \text{ м/с}^2$ .

Матрица конструкционного демпфирования строится, как линейная комбинация матриц жесткости и инерции. В соответствии с [3] сейсмические воздействия продольного и поперечного направления рассмотрены независимо.

### 3. Результаты расчета

В результате расчетов получены все компоненты перемещений, ускорений, а также усилий и нормальных напряжений в сечениях конструктивных элементов здания конкурса при сейсмических

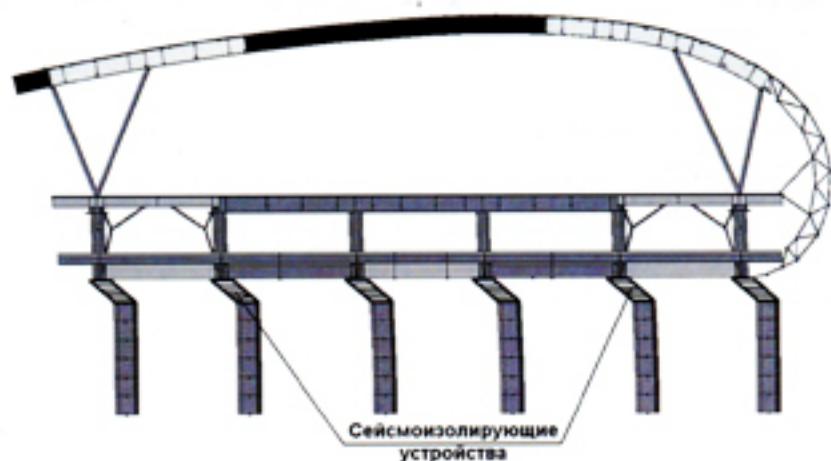


Рис. 3. Поперечные перемещения здания при поперечном сейсмическом воздействии



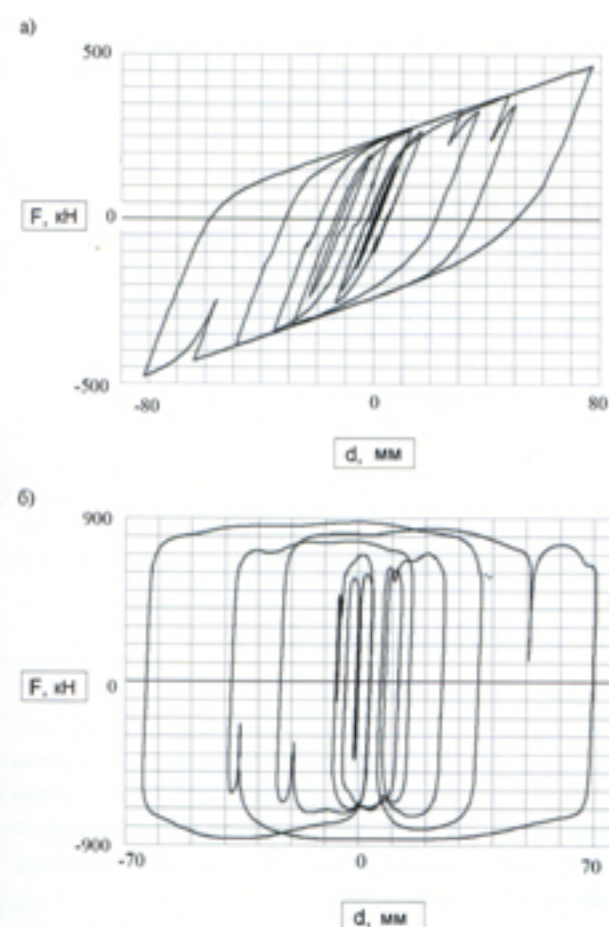


Рис.4. Диаграммы «усилие-перемещение» для резинометаллической опорной части и гидравлического демпфера

воздействиях, а также для особых сочетаний эксплуатационных нагрузок и сейсмических воздействий.

Перемещения части здания, расположенной выше отм. +10.800, при сейсмическом воздействии близки к перемещениям жёсткого целого относительно железобетонных колонн первого этажа (рис.3). Поэтому усилия и напряжения в соответствующих конструктивных элементах сравнительно невелики.

Максимальные продольные перемещения перекрытия на отм. +10.800 составляют 93 мм, максимальные поперечные перемещения — 128 мм. При этом наибольшие взаимные горизонтальные смещения в РОЧ не превышают 85 мм в продольном направлении и 120 мм — в поперечном. Наибольшие продольные перемещения перекрытия на отм. +15.750 составляют 102 мм, наибольшие поперечные перемещения — 135 мм. Максимальные продольные перемещения кровли составляют 133 мм, максимальные поперечные перемещения — 156 мм.

Ускорения перекрытия на отм. +10.800 не превышают 2,2 м/с<sup>2</sup>, перекрытия на отм. +15.750 — 2,6 м/с<sup>2</sup>. Продольные ускорения кровли достигают 4,4 м/с<sup>2</sup>, поперечные — 5,0 м/с<sup>2</sup>. Сопоставительные расчёты показали, что в результате применения системы сейсмоизоляции продольные и поперечные ускорения кровли снизились более чем в 3 раза. Соответствующим образом уменьшились инерционные нагрузки на здание.

На рис.4а представлена полученная в результате расчёта диаграмма «усилие-

перемещение» для резинометаллической опорной части, на рис.4б — та же диаграмма для гидравлического демпфера. Гистерезисные петли на рис.4 подтверждают эффективность применения сейсмоизолирующих устройств с точки зрения рассеяния энергии сейсмических колебаний.

Анализ полученных усилий и напряжений в конструктивных элементах здания показывает, что условия прочности и сейсмостойкости всех элементов выполняются.

#### 4. Выводы

Анализ полученных результатов расчёта здания конкурса на особые сочетания эксплуатационных нагрузок и сейсмических воздействий интенсивностью 9 баллов показал, что все конструктивные элементы здания отвечают условиям прочности и сейсмостойкости.

Благодаря применению системы сейсмоизолирующих устройств здание обладает достаточной сейсмостойкостью для восприятия максимального расчётного землетрясения интенсивностью 9 баллов по шкале MSK-64.

#### Литература

1. СНиП 2.01.07-85\*. *Нагрузки и воздействия*. — М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП. 2004.
2. Алтикаев Ф. Ф., Эртелева О. О. *Задание спектров и соответствующих синтетических акселерограмм. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2005. № 5.
3. СНиП II-7-81\*. *Строительство в сейсмических районах*. — М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП. 2000.

Контактная информация: 197198, Санкт-Петербург, ул. Яблочкова 7,  
ЗАО «Институт Гипростроймост Санкт-Петербург».  
Тел: +78124980925, факс: +781223396 66. E-mail: roman.guzeev@gpsm.ru.

eng

Guzeev R. N., Petrov V. A., Polinkevich K. G.

## ANALYSIS OF ADLER PASSENGER TERMINAL STRUCTURE WITH SEISMIC ISOLATION SYSTEM

Analysis of seismic reaction for Adler passenger terminal concourse structure is performed. Nonlinear dynamic seismic theory is used. In order to reduce the structure seismic response the seismic isolation system is used, including steel-rubber bearings with a lead core and hydraulic dampers. Nonlinear time history analysis is performed by means of finite element method. Analysis results show that all the structural members meet the strength and the seismic resistance requirements.

Key words: seismic isolation system, seismic isolation system, passenger terminal, nonlinear dynamic seismic theory, steel-rubber bearings, lead core, hydraulic dampers, seismic resistance requirements.