

# Опыт применения программного комплекса SCAD Office

для АНАЛИЗА СИСТЕМЫ  
СЕЙСМОЗАЩИТЫ  
ЗДАНИЯ  
Республиканского  
национального театра  
драмы  
в Горно-Алтайске



В марте 2003 года НО "РАСС" провело обследование несущих конструкций реконструируемого здания Республиканского национального театра драмы в городе Горно-Алтайске (рис. 1). Обследование выполнялось в рамках Федеральной целевой программы "Сейсмическая безопасность России", утвержденной правительством России в сентябре 2001 г. Основанием для проведения работ стало принятое заказчиком решение о повышении сейсмостойкости конструкций здания, связанное с уточнением сейсмогеологической обстановки на площадке строительства в соответствии с требованиями СНиП II-7-81\* "Строительство в сейсмических районах" и повышением

требований к безопасности (сейсмичность площадки, ранее оценивавшаяся в 7 баллов, после уточнений оценивается в 9 баллов). Здание запроектировано и построено в 1977 году без проведения антисейсмических мероприятий.

По результатам изучения проектной документации здания театра и данных визуального обследования обнаружилось несоответствие требованиям СНиП II-7-81\* более чем по двадцати пунктам. В связи с этим на стадии предпроектной проработки были предложены два варианта приведения здания театра к уровню сейсмостойкости, соответствующему 9 баллам. Первый предусматривал применение традиционных методов сейсмоусиления (разделение здания на девять самостоятельных отсеков, усиление

существующих стен слоями торкретбетона, развязка свободных краев ограждающих конструкций вертикальными диафрагмами жесткости и т.д.).

Второй вариант основывался на использовании системы сейсмоизоляции с использованием резинометаллических сейсмоизолирующих опор (PMCO) (рис. 2).

Применение резинометаллических опор со свинцовым сердечником — один из наиболее эффективных способов сейсмоизоляции, обеспечивающий восприятие вертикальной нагрузки, горизонтальную податливость и повышенное гистерезисное затухание колебаний. Сейсмоизоляторы выпускаются со стандартными параметрами для вертикальной нагрузки от 280 до 16000 кН (28-1600 тс). Резиноме-



Рис. 1. Здание Республиканского национального театра драмы в Горно-Алтайске

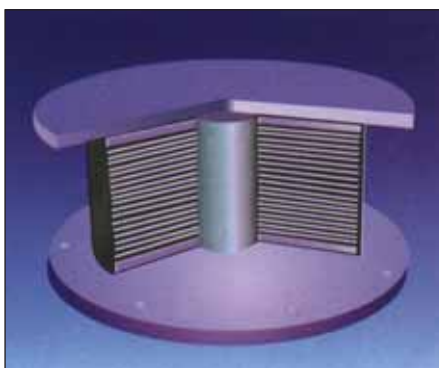


Рис. 2. Общий вид резинометаллической сейсмоизолирующей опоры



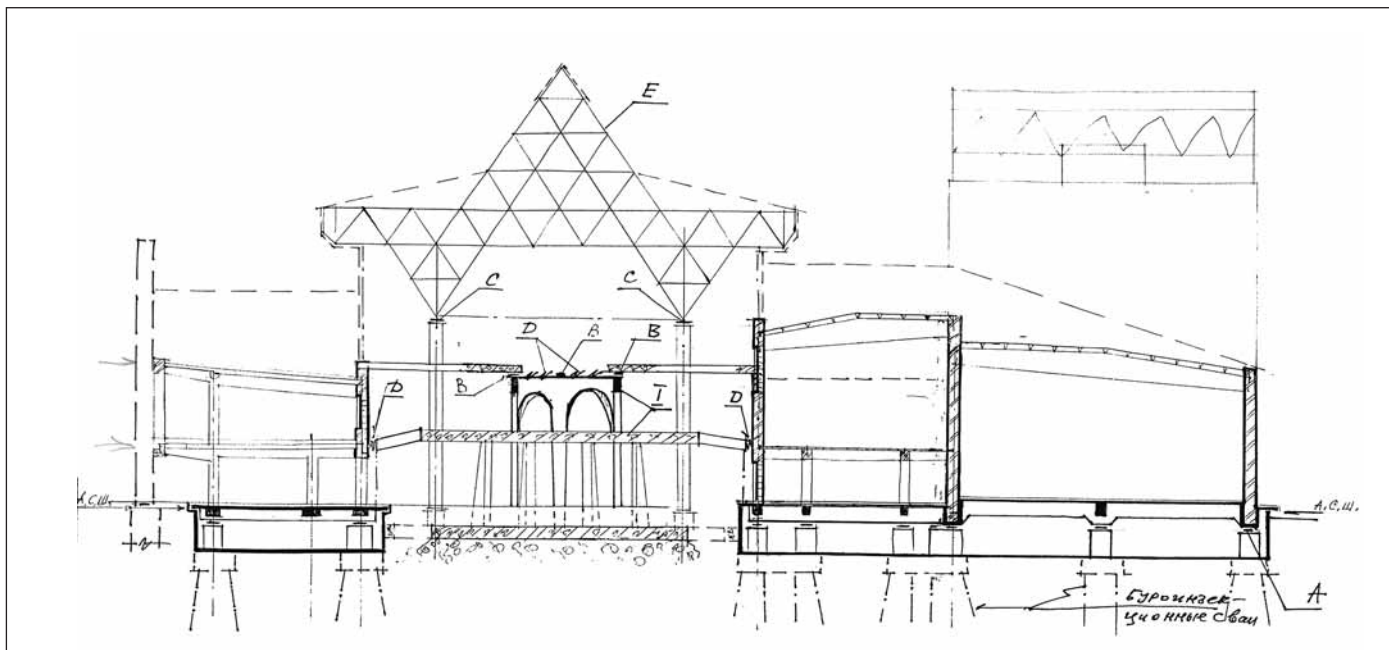


Рис. 3. Вариант сейсмоусиления здания театра с применением PMCO: А – PMCO, В, С – сейсмоопоры фирмы "GERB", D – демпферы вязкого трения фирмы "GERB"

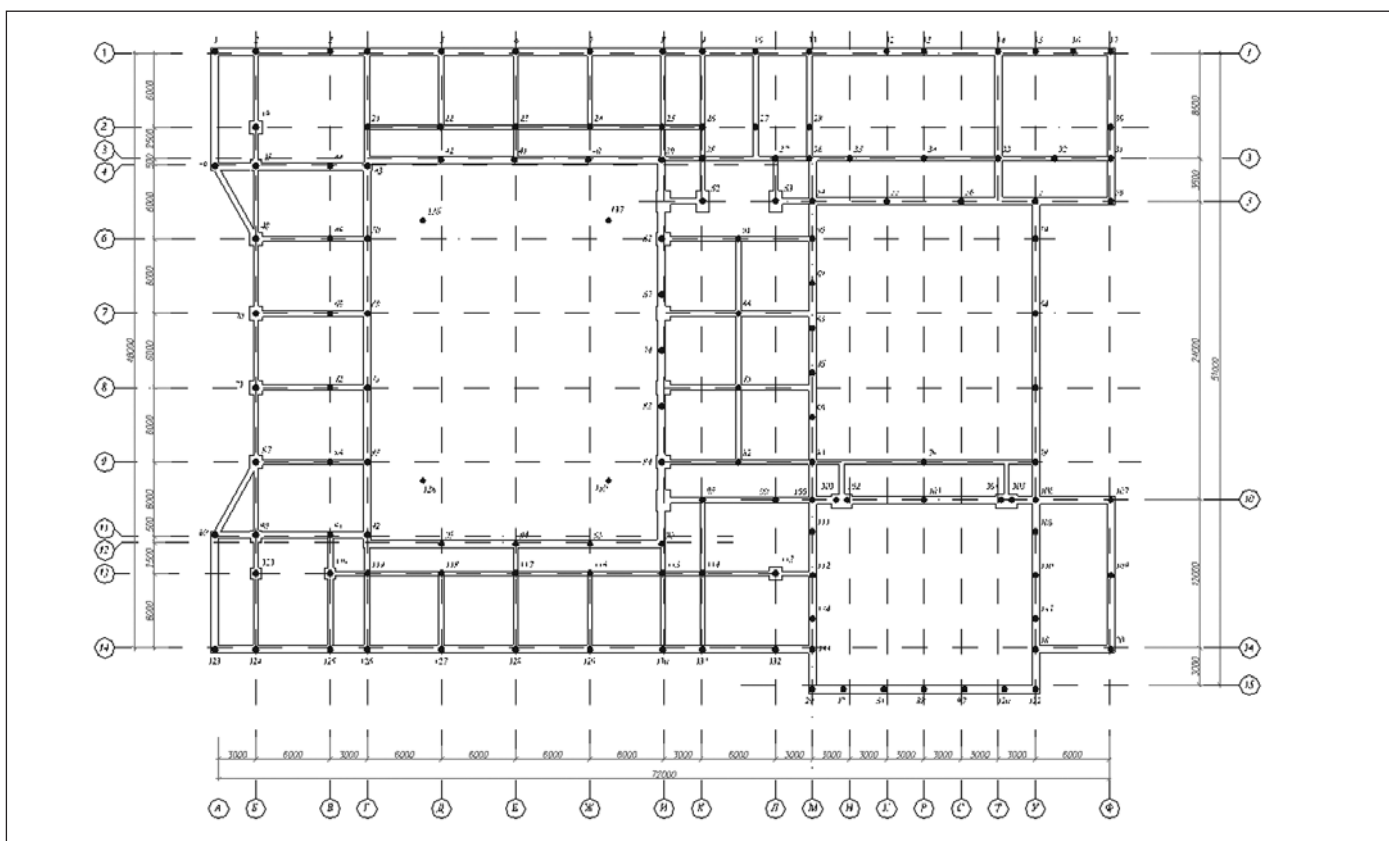


Рис. 4. Схема расположения PMCO

таллические изоляторы проектируют и изготавливают таким образом, чтобы обеспечить решение поставленной задачи по несущей способности, по деформированию в любых направлениях с заданной жесткостью и с требуемым затуханием во время землетрясения.

Концепция организации системы сейсмозащиты здания драмтеатра с использованием PMCO приведена на рис. 3.

Этот вариант предусматривает выполнение следующих комплексных мероприятий:

- создание в уровне пола первого этажа жесткой горизонтальной платформы, служащей основанием надземной части здания и образованной непрерывным опорным ростверком и монолитной плитой;
- создание жесткого основания для сейсмоопор, для чего в местах уста-

новки PMCO подводятся новые фундаменты в виде кустов из трех, четырех и более буронасосных свай – стоек с монолитными железобетонными столбчатыми ростверками;

- монтаж PMCO, которые устанавливаются на новые фундаменты и подводятся под опорный ростверк;
- организация горизонтального антисейсмического шва;

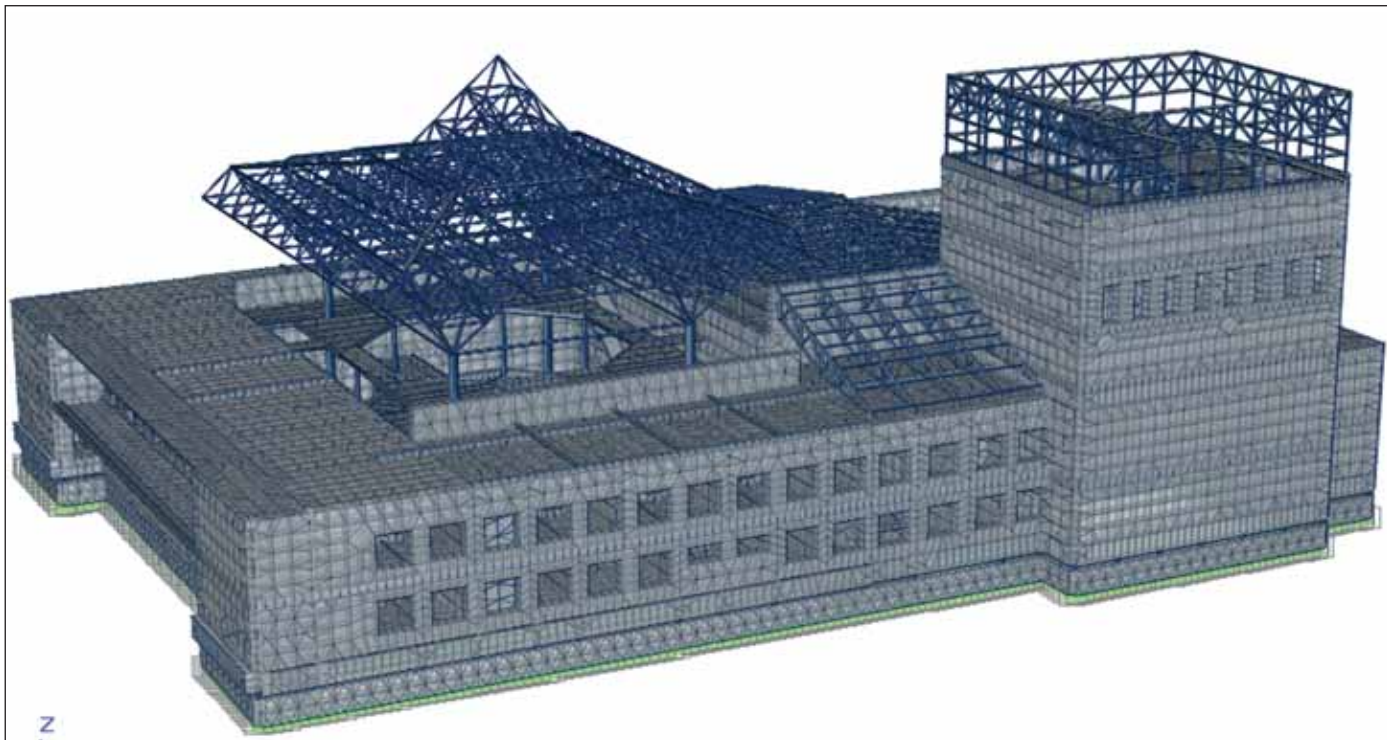


Рис. 5. Общий вид расчетной модели здания театра в Горно-Алтайске

- отделение перекрытия внутреннего двора от остального здания антисейсмическими швами (на отметке 4,2 м);
- устройство "второй линии обороны" в виде пассивной сейсмозащиты, то есть частичное усиление надземных конструкций традиционными методами.

Расстановка РСМО (рис. 4) и оптимизация мероприятий по сейсмоусилению проводилась по Техническим условиям, разработанным НО "РАСС" в соответствии с требованиями СНиП II-7-81\*, и на основании расчетного анализа.

Выбор РСМО был обусловлен следующими факторами:

- театральное здание, построенное без учета антисейсмических требований, по своей объемно-планировочной структуре таково, что привести его к уровню сейсмостойкости, соответствующему 9 баллам, обычными методами невозможно;
- разрезка здания на отдельные отсеки и введение новых конструктивных элементов приведет к уменьшению площадей помещений и отрицательно повлияет на архитектурные и технологические решения;
- работы по сейсмоусилению с применением традиционных методов находятся на критическом пути графика строительно-монтажных работ и решающим образом влияют на сроки завершения строительства.

Предложенная концепция сейсмоусиления строительных конструкций здания является комплексной и предпо-

лагает поэтапное проведение ряда исследований.

На первом (предварительном) этапе определяются места установки и тип РСМО с учетом фактических объемно-планировочных и конструктивных параметров здания, а также действующих (проектных) нагрузок.

На втором этапе с учетом заданных параметров деформирования расставленных РСМО определяются действующие усилия в элементах и узлах здания для подбора уровня их усиления.

В ходе третьего этапа анализируются проектные решения, выполняемые по результатам расчетов второго этапа.

Четвертый этап предусматривает сравнительный анализ двух вариантов здания — без сейсмоизоляции и с применением РСМО (сопоставляются усилия и напряжения в конструкциях здания).

При такой постановке задачи необходимы современные компьютерные программы, позволяющие реализовать эффективные математические модели анализируемых вариантов несущих конструкций.

Далее мы представим опыт решения указанной задачи средствами интегрированной системы анализа конструкций StructureCAD (SCAD). В проведении расчетов участвовали специалисты ЦИСС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, НО "РАСС" и SCAD Soft.

Вычислительный комплекс SCAD реализует универсальный метод конечных элементов. Пакет широко используется во многих регионах России, чему способствует наличие у него сертифика-

та соответствия строительным нормам РФ. Высокую конкурентоспособность комплекса на рынке программных продуктов обеспечивает его ориентированность на решение прикладных задач, актуальных для инженеров-проектировщиков. Одним из важнейших достоинств SCAD является управляемая визуализация всех аспектов строительного проектирования: от создания конечно-элементной модели до расчета напряженно-деформированного состояния конструкций и их конструирования.

Формирование моделей и расчетный анализ проводились с применением программного комплекса SCAD Office. Укрупненная расчетная модель здания строилась в специальном препроцессоре ФОРУМ: основные размеры, привязки колонн и несущих стен, очертания перекрытий, положение проемов и отверстий формируются здесь с необходимой степенью детализации. Для упрощения формируемой модели в схему не включались ограждения и перегородки, которые не влияют на жесткость конструкции, архитектурные детали, фермы.

Препроцессор ФОРУМ предоставляет широкие возможности построения и корректировки конечно-элементной сетки. Формирование расчетной схемы здания завершается заданием жесткостных характеристик, условий опирания и примыкания элементов модели.

Сгенерированная конечно-элементная модель была частично доработана в среде SCAD. Расчетная модель здания (рис. 5) без сейсмоизоляции дополнялась только моделью структурно-





Рис. 6. Элемент 51 для моделирования работы РМСО

го покрытия, созданного в среде SCAD (этот процесс проводился в режиме сборки, где назначались условия сопряжения опорных узлов покрытия с колоннами, а собранные нагрузки от ферм передавались как нагрузки от фрагмента схемы).

Добавление в модель системы сейсмоизоляции с применением РМСО осуществлялось следующим образом:

- моделировалось структурное покрытие (процесс аналогичен представленному выше);
- изменялись жесткости и объемные веса несущих элементов, усиливаемых в соответствии с предпроектной концепцией сейсмоизоляции здания;
- перекрытия в уровне первого этажа внутреннего двора отделялись от остальной части здания антисейсмическим швом;
- задавалось условие примыкания стоек и перекрытия второго этажа внутреннего двора (разрешались линейные перемещения в плоскости перекрытия);
- в уровне перекрытий моделировались дополнительные сейсмоязы как

стержневые элементы, содержащиеся в библиотеке SCAD;

- вводились резинометаллические сейсмопоры в виде специальных конечных элементов (элемент 51) — жесткости задавались как по вертикальному, так и по горизонтальным направлениям (рис. 6).

В задаче рассмотрены все регламентированные нормами статические и динамические нагрузки, включая сейсмические.

**Первый этап** исследования заключался в расчете здания театра без системы сейсмоизоляции на основное и особое сочетание нагрузок с целью определения усилий и напряжений в несущих элементах.

**Второй этап** предполагал получение результатов, необходимых при выборе типа РМСО. Для этого производился расчет на действие основного сочетания нагрузок здания с сейсмоусилением (торкретбетон), но без РМСО. По максимальному значению вертикальных усилий были выбраны тип и количество сейсмопор (140 штук) с заданными жесткостными характеристиками — GZY400V5A.

На **третьем этапе** в созданную расчетную схему вводились элементы 51 с жесткостями РМСО (горизонтальные и вертикальная жесткости) (рис. 7-9). Результаты расчета на основное и особое сочетание нагрузок показали, что тип сейсмопор был выбран правильно (максимальные горизонтальные перемещения сейсмопор находились в допустимых пределах и соответствовали требо-

ваниям заказчика по ограничению этих перемещений вследствие близости других объектов). Когда были получены максимальные значения перемещений, появилась возможность определить размер горизонтального антисейсмического шва, отделяющего внутренний дворик от остальной части здания.

**Четвертый этап** заключался в проведении сравнительного анализа результатов расчета по двум расчетным схемам здания театра (с сейсмоизоляцией и без нее). Выполненные расчеты подтвердили эффективность сейсмоизоляции здания театра с применением РМСО — в комбинации с традиционными методами усиления наземной части и основания.

Сравнение результатов показало существенное улучшение характера работы здания: в отличие от базового варианта оно приобрело признаки единой системы с четко выраженной формой развития и распределения деформаций по высоте и в плане. Прежде всего об этом свидетельствуют результаты динамического расчета (рис. 10-11).

При использовании РМСО повысились периоды собственных колебаний (табл. 1), что, в свою очередь, более чем вдвое снизило коэффициент динамичности (рис. 12).

Снизилась расчетная нагрузка на элементы и узлы здания. Например, анализ распределения внутренних усилий (рис. 13), возникающих в одной из наиболее нагруженных стен, показал снижение сжимающих напряжений на 20-30% (табл. 2).

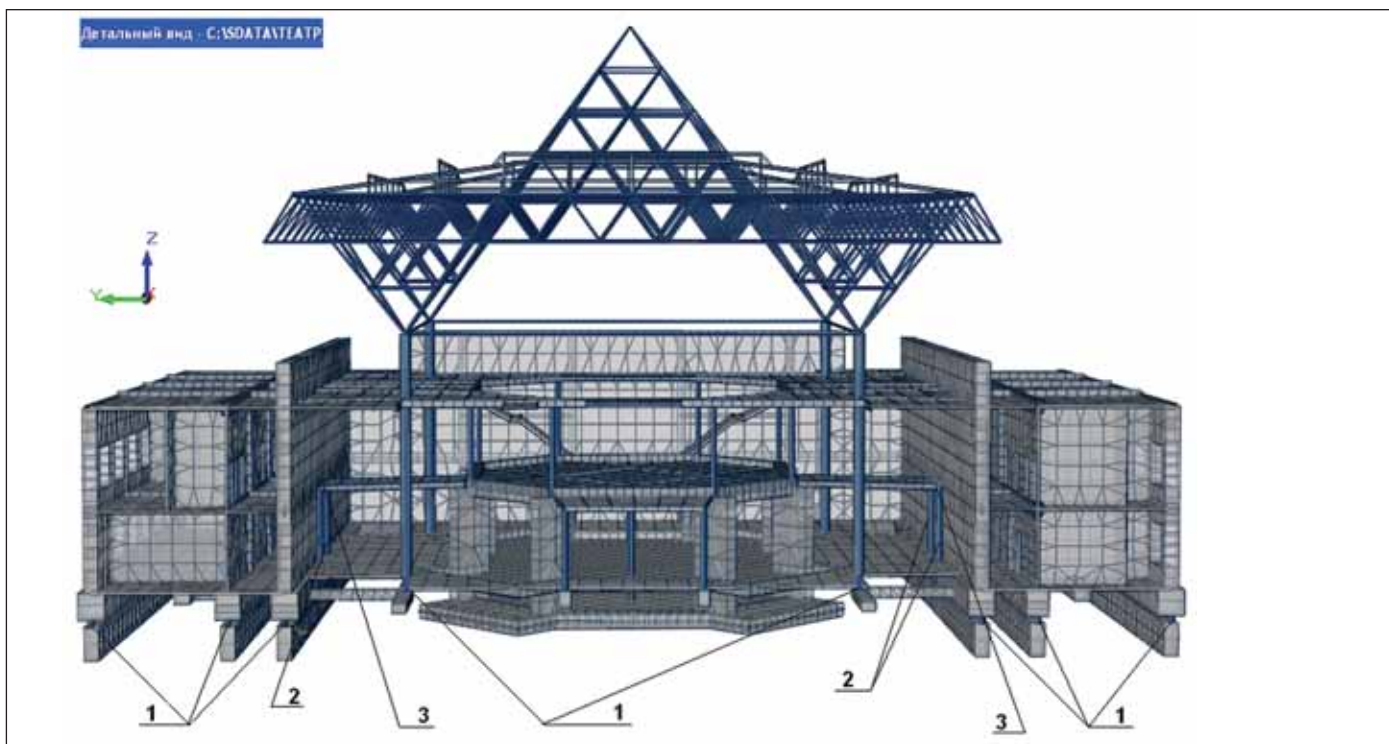


Рис. 7. Общая схема сейсмоусиления здания театра с применением РМСО: 1 — резинометаллические сейсмопоры GZY400V5A; 2 — дополнительные стойки под площадками; 3 — антисейсмический шов

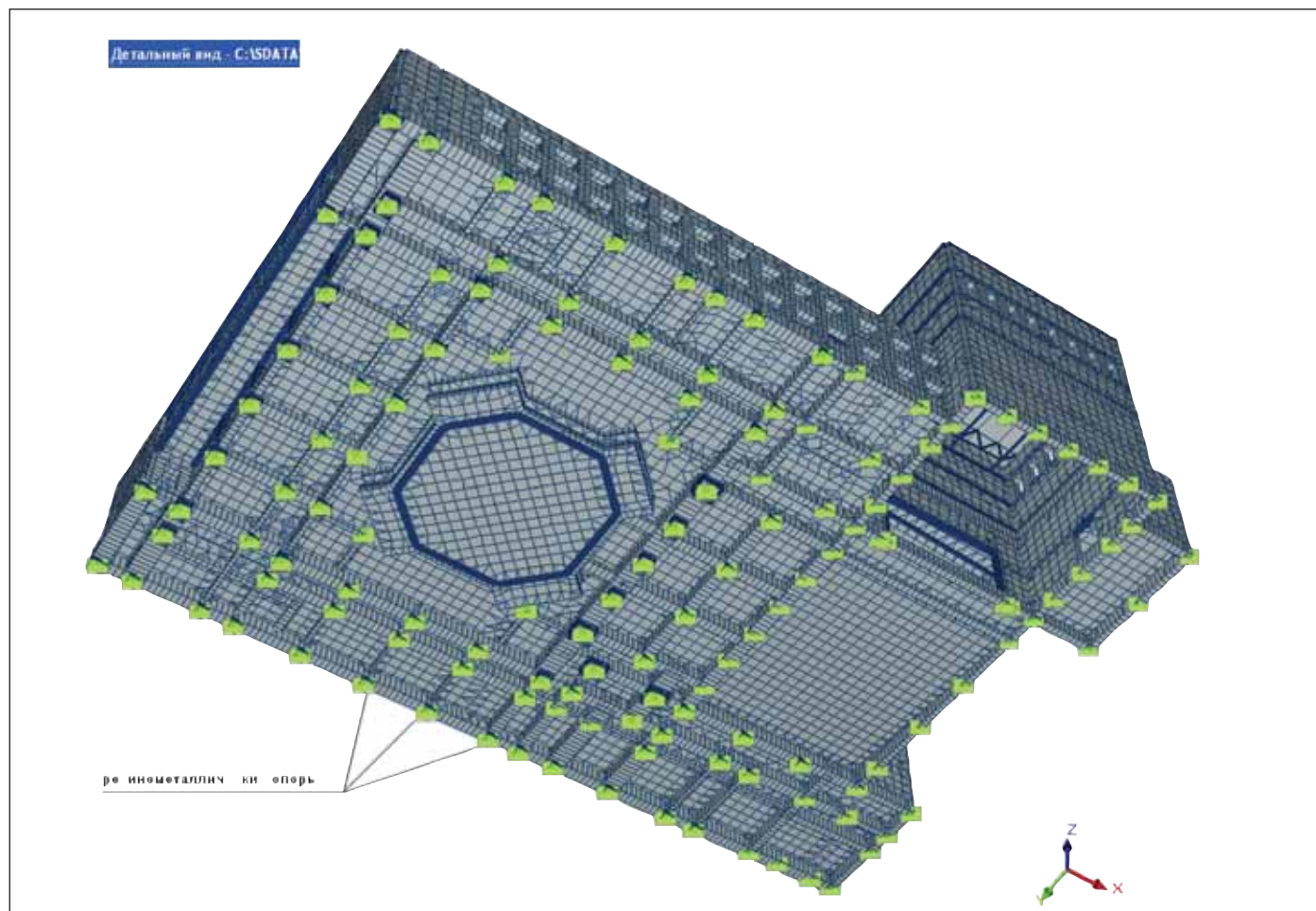


Рис. 8. Внешний вид расчетной модели по варианту 2 (сейсмоусиление с применением РМСО)

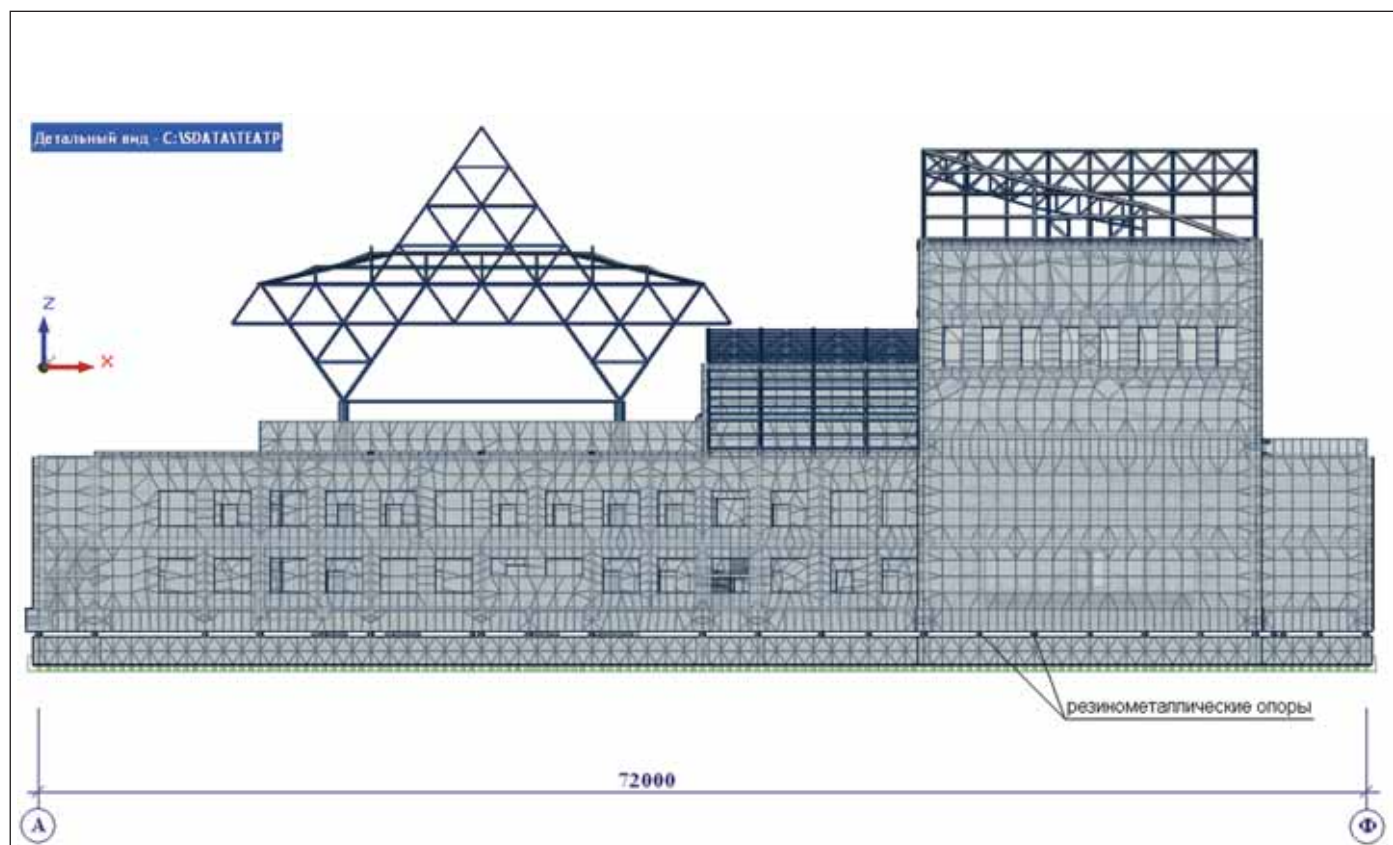


Рис. 9. Внешний вид расчетной модели (фасад А – Ф)



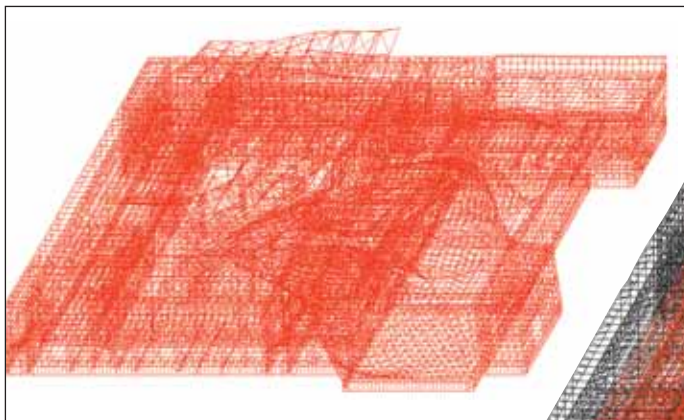


Рис. 10. Деформированная схема здания без системы РМСО с усиленными конструкциями наземной части (10-я форма колебаний)

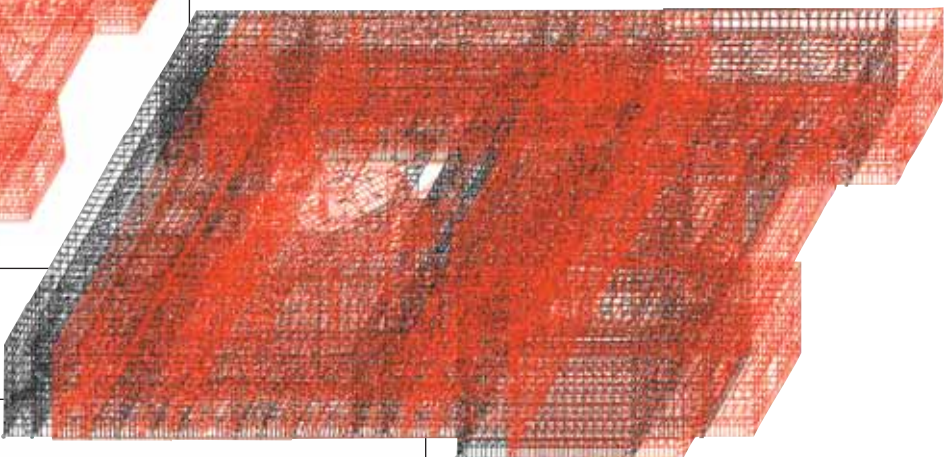


Рис. 11. Деформированная схема здания с РМСО (1-я форма колебаний)

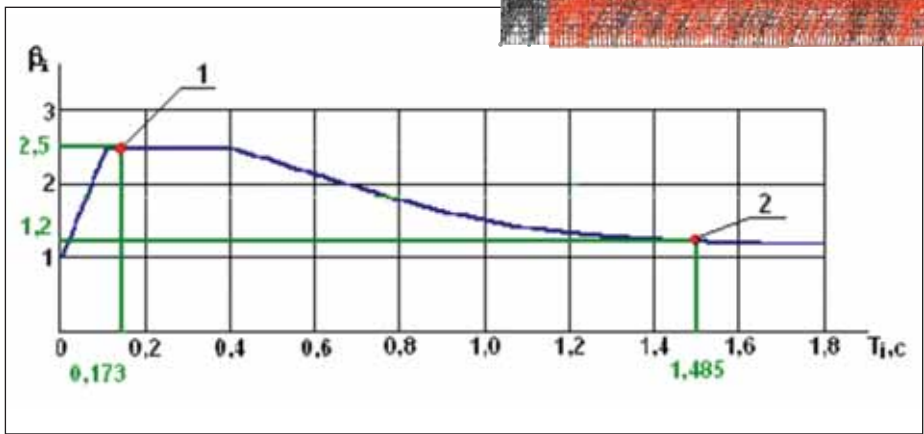


Рис. 12. График зависимости  $\beta_i$  от  $T_i$

Анализ полученных результатов свидетельствует о следующем.

- 1. Базовый вариант здания драмтеатра имеет объемно-планировочные и конструктивные показатели (распределение масс и жесткостей), наиболее неблагоприятные с точки зрения восприятия возможных сейсмических нагрузок.
- 2. Деформирование строительных конструкций здания (без сейсмоусиления), возведенного с существенными отклонениями от нормативных требований, при расчетном сейсмическом воздействии приводит к непредсказуемому (нерегулярному) характеру.
- 3. При землетрясении расчетной интенсивности в элементах и узлах здания без сейсмоусиления возникнут расчетные усилия (напряжения), в 7-15 раз превышающие нормативные значения сопротивлений кладки. С учетом фактического состояния конструкций эта величина существенно больше.
- 4. С точки зрения восприятия сейсмических нагрузок наиболее уязвимы конструкции сценической коробки, структурного покрытия и узлы примыкания внутреннего двора к основному строению.

Периоды собственных колебаний

Вариант 1*	Вариант 2
Здание, усиленное традиционными методами	Здание на резинометаллических опорах
$T_1 = 0,173 \text{ с}$	$T_1 = 1,485 \text{ с}$
$T_2 = 0,164 \text{ с}$	$T_2 = 1,397 \text{ с}$
$T_3 = 0,159 \text{ с}$	$T_3 = 1,224 \text{ с}$

\*Примечание. В первом варианте речь идет об относительной величине периода (мгновенная частота) собственных колебаний, определенных для сценической коробки.

Табл. 1

Табл. 2

Расчетная модель		Вариант 1. Здание без РМСО, наземная часть которого усилена традиционными методами	Вариант 2. Сейсмоусиленное здание на РМСО
Параметры			
Максимальные нормальные напряжения в простенках (МПа) от особого сочетания нагрузок			
Стена по оси 15 (М — У)	горизонт. напряж., сж./раст.	-0,16 (0,12)	-0,11 (0,07)
	вертик. напряж. сж./раст.	-0,59 (0,13)	-0,46 (-)
Стена по оси У (15 — 10)	горизонт. напряж. сж./раст.	-0,18 (0,087)	-0,17 (0,05)
	вертик. напряж. сж./раст.	-0,48 (0,04)	-0,35 (0,04)

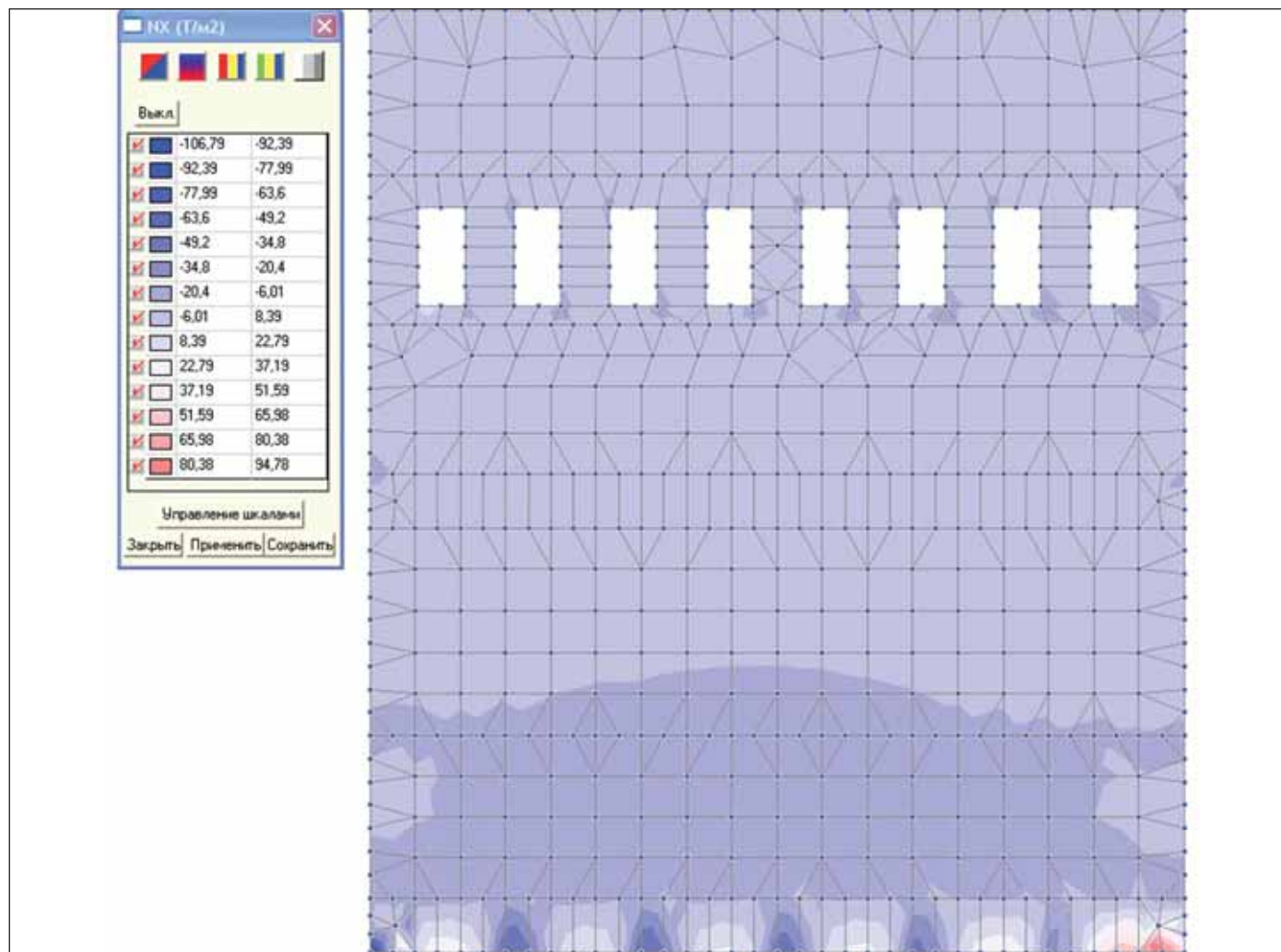


Рис. 13. Распределение напряжений в стене сценической части здания по оси 15 (M-Y) при расчете по варианту 2

5. Оптимальным (с точки зрения максимального сохранения существующих планировочных решений и конструктивных элементов) методом комплексной сейсмозащиты здания является метод с применением РМСО.
6. Основной вклад в работу системы с РМСО (98%) вносят первые три формы колебаний. В отличие от базового проекта характер деформирования усиленного здания носит ярко выраженный поступательный характер (рис. 11). Конструкции и узлы системы колеблются как одно целое, что приводит к более равномерному распределению усилий.
7. Сравнение значений периодов собственных колебаний здания по двум вариантам (соответственно без использования и с использованием РМСО) подтверждает возможность существенного регулирования динамических характеристик и свойств системы.
8. По первой форме период колебаний здания на резинометаллических опорах в 8,56 раза (1,485/0,173) превышает аналогичный период для

здания без РМСО, что в свою очередь свидетельствует о возможном снижении значения динамического коэффициента  $\beta_1$  до двух и более раз (рис. 12). В реальной конструкции это значение будет существенно выше за счет нелинейного характера работы РМСО и более высокого, по сравнению с расчетным значением, затухания в системе.

9. Анализ напряженного состояния конструкций сценической коробки показывает возможность благоприятного перераспределения и снижения (до 1,5 раз — при растяжении и до 12 раз — при сжатии) напряжений и усилий в наземных конструкциях при устройстве РМСО. Максимальные значения напряжений "перемещаются" от перемычек и простенков, как наиболее уязвимых частей стен, в основание и ростверк, резервы конструктивной защиты которых значительно шире.

Приведенный пример показывает, что возможности, предоставляемые программным комплексом SCAD Office, позволяют в полном объеме и с необходимой степенью точности смоделиро-

вать напряженно-деформированное состояние сложной трехмерной несущей конструкции, подвергающейся интенсивным сейсмическим воздействиям. При этом время, необходимое для создания достаточного количества вариантов расчетных схем, выполнения расчетов и анализа их результатов, вполне приемлемо для обоснования конструктивных решений в условиях проектирования реальных строительных объектов.

**Наталья Мосина,**  
заместитель директора  
ООО "СКАД СОФТ"

**Дмитрий Вережкин,**  
специалист по архитектурно-  
строительным САПР  
ООО "СКАД СОФТ"

Тел.: (495) 267-4076  
E-mail: scad-soft-m@mtu-net.ru

**Мурат Чубаков,**  
инженер лаборатории  
сейсмостойкости сооружений  
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко  
ФГУП НИЦ "СТРОИТЕЛЬСТВО"  
Тел.: (495) 170-0693  
E-mail: akbiev@seismo.ru