

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Спецкурс по поверочным работам

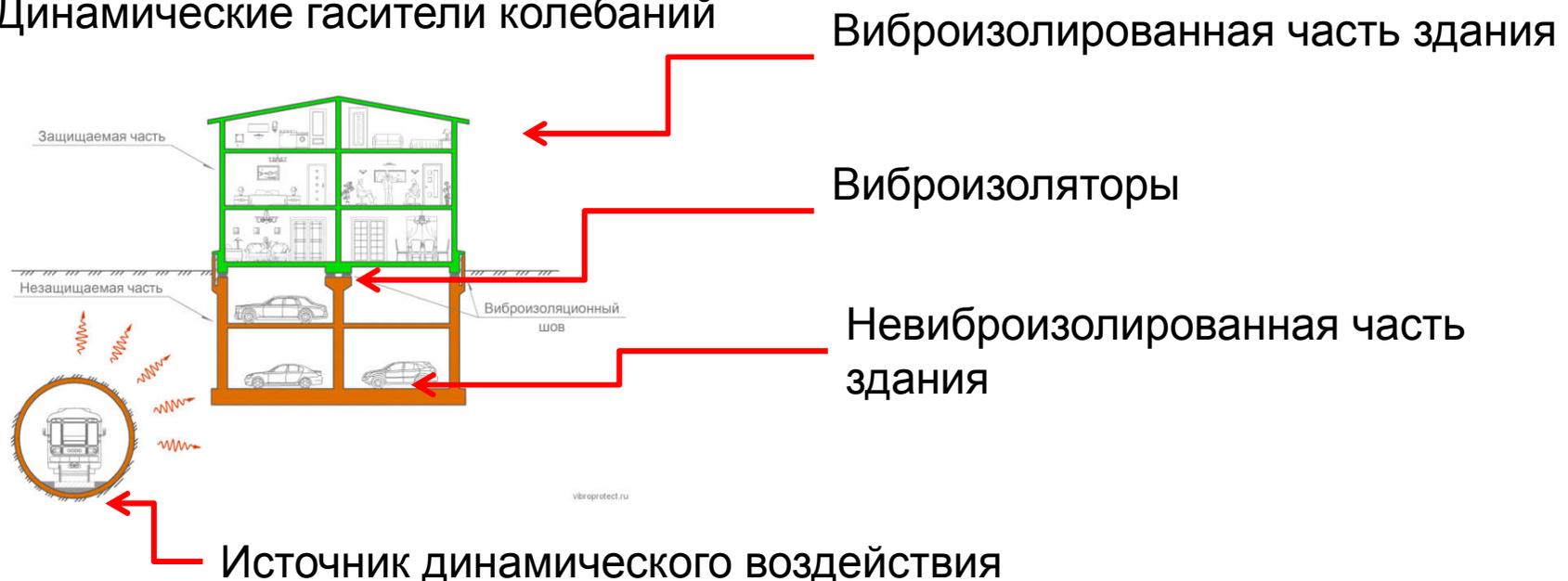
Особенности расчета многоэтажного здания расположенного в зоне влияния
линии метрополитена неглубокого заложения

Москва 2023, Сизов Д.К.

Постановка проблемы

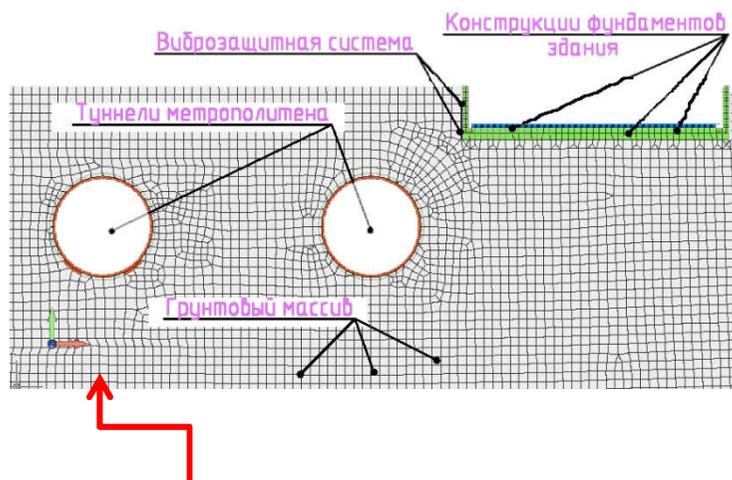
Одной из важных проблем современного строительного комплекса является застройка территорий вдоль линий метрополитена неглубокого заложения. Для снижения негативного воздействия вибрационного воздействия возможно применение различных виброгасящих устройств, в качестве которых могут выступать:

1. Резинометаллический виброизоляторы;
2. Стальные пружины
3. Полиуретановые маты
4. Динамические гасители колебаний

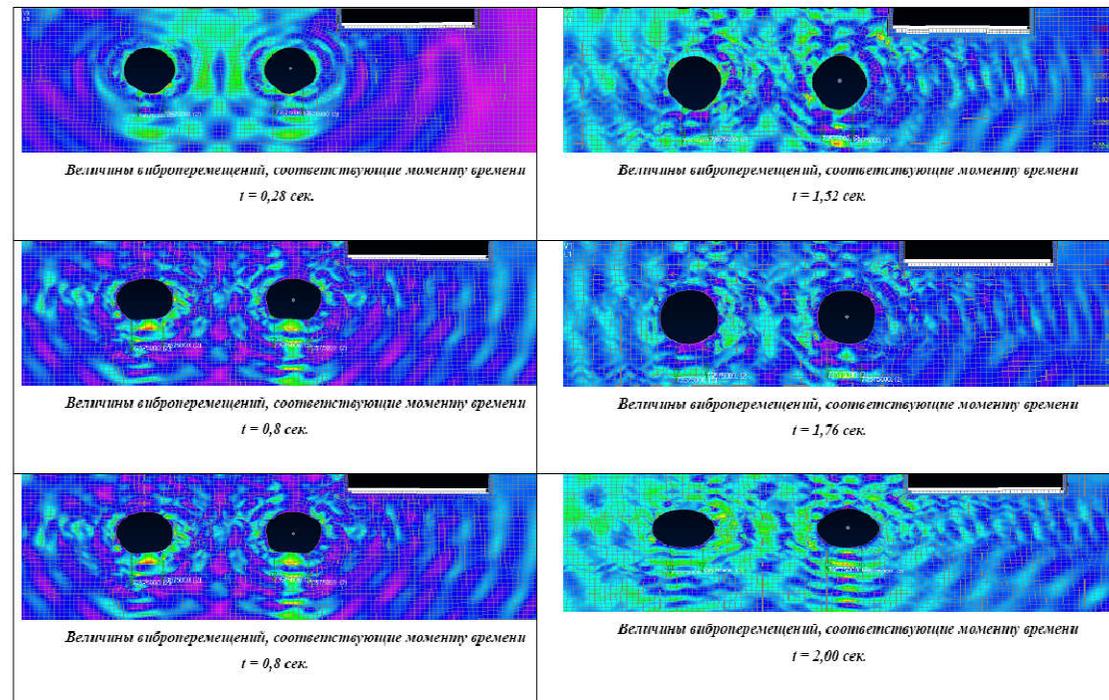


Применение МКЭ для прогноза уровней колебаний грунтового массива

Одним из способов прогноза уровней колебаний грунтового массива под зданиями, вызванного движением поездов метрополитена, либо другими источниками является рассмотрение динамических задач, например, для плоских задач.



Важной проблемой при применении МКЭ в этом случае является учет граничных условий, т.н. «Неотражающих границ»



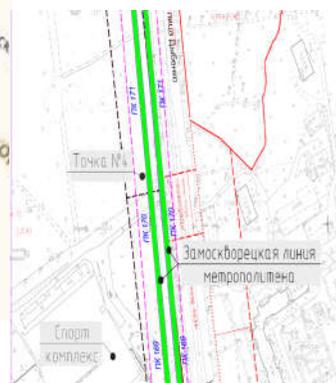
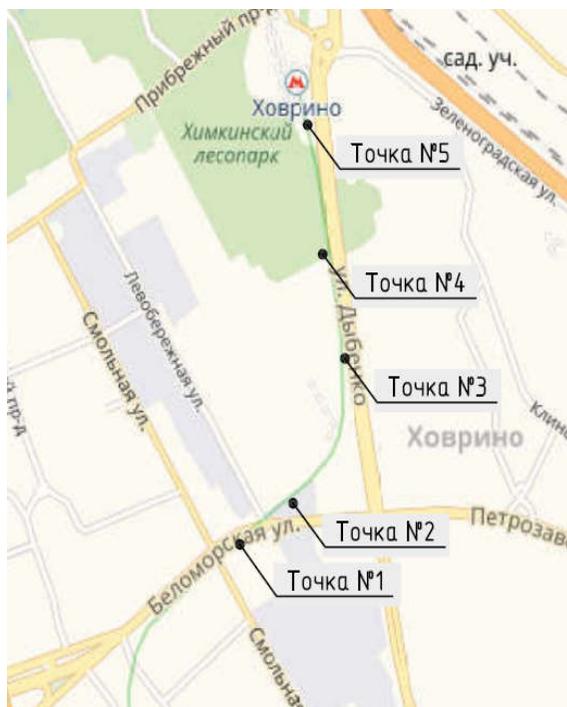
Использование «неотражающих границ» позволяет смоделировать затухание волн бесконечности

Фиксация вибраций вдоль линии метрополитена неглубокого заложения

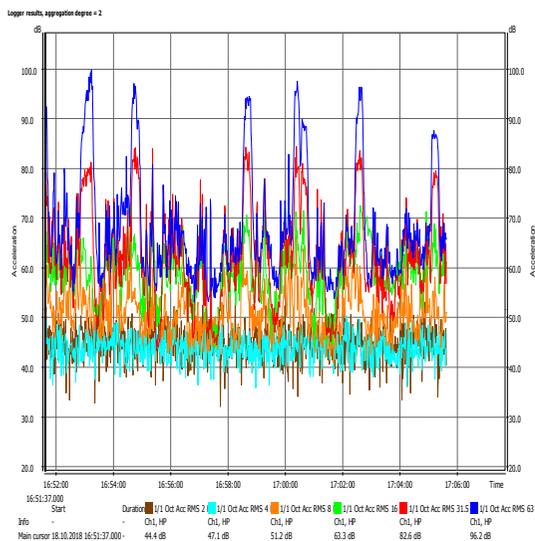
Расположение точек виброизмерений вдоль линии метрополитена (в местах предполагаемой перспективной застройки)



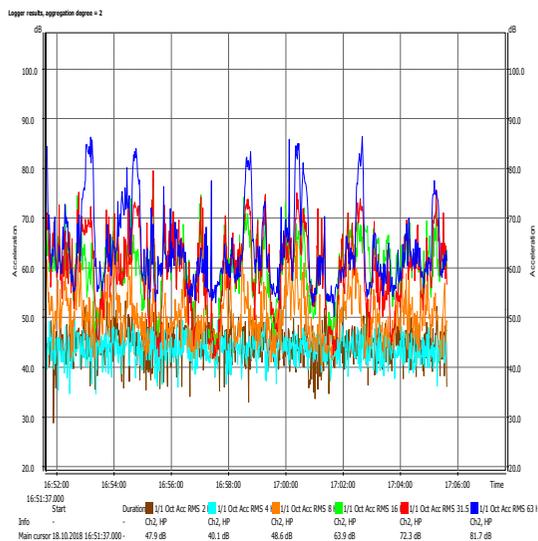
Виброизмерительный комплекс для фиксации колебаний строительных конструкций, либо грунта площадки строительства



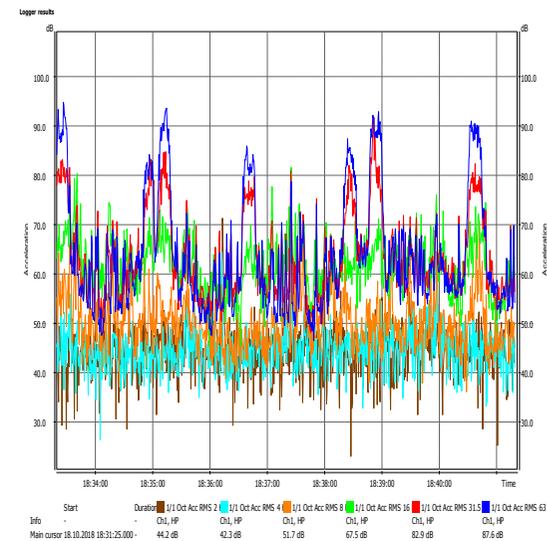
Спектральный состав вибрационного воздействия



Горизонтальные составляющие вибрационного воздействия вдоль оси X



Горизонтальные составляющие вибрационного воздействия вдоль оси Y

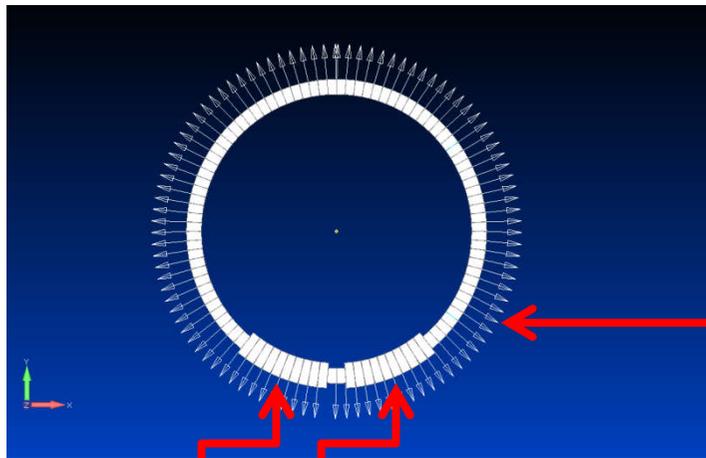


Горизонтальные составляющие вибрационного воздействия вдоль оси Z

Выделяются октавные полосы 16,0 Гц, 31,5 Гц, а также 63 Гц. На других частотах воздействие слабовыражено

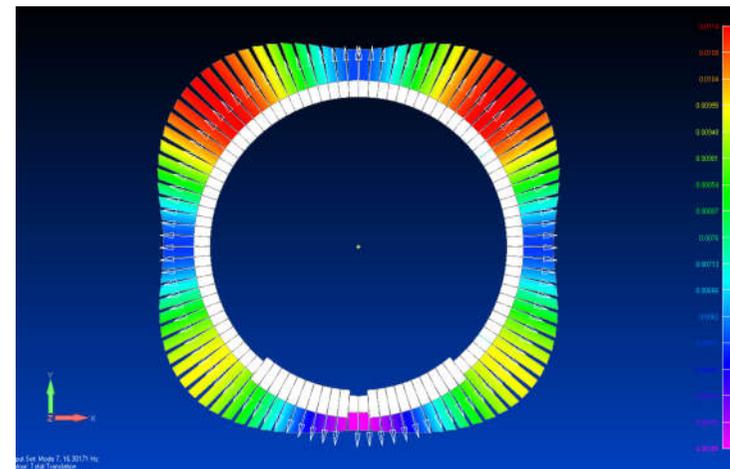
Частоты тоннеля, расположенного в грунтовой основе

Одним из факторов, влияющих на спектральный состав вибрационного воздействия со стороны метрополитена собственные частоты колебаний тоннеля.



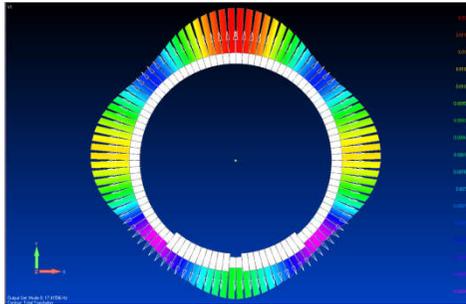
Локальные утолщения моделируют массы путевого бетона

Радиально расположенные упругие элементы моделируют взаимодействие тоннеля с грунтовым основанием

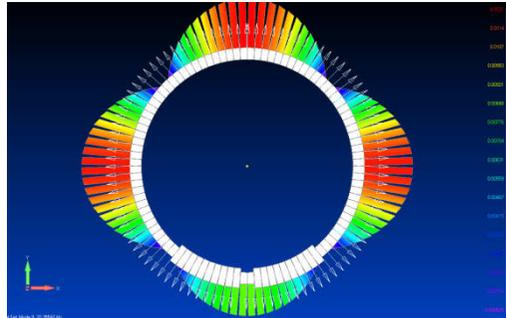


Первая форма колебаний тоннеля метрополитена, частота 16,3 Гц

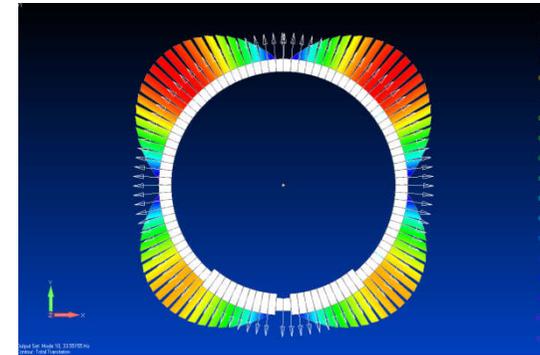
Формы колебаний №2-7 тоннеля в грунтовой среде



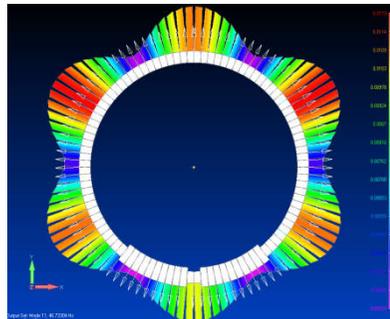
Вторая форма, частота
17,41 Гц



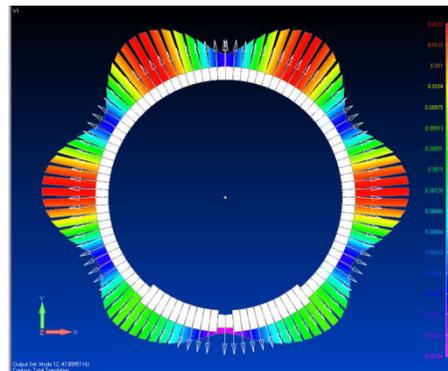
Третья форма, частота
32,35 Гц



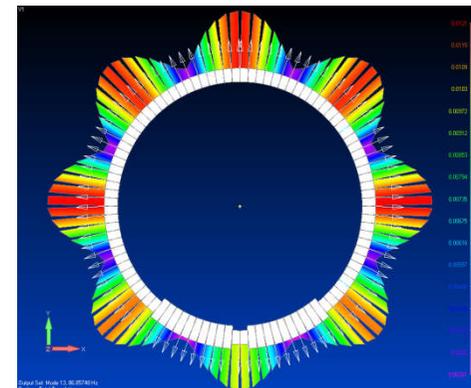
Четвертая форма, частота
33,55 Гц



Пятая форма, частота
46,73 Гц

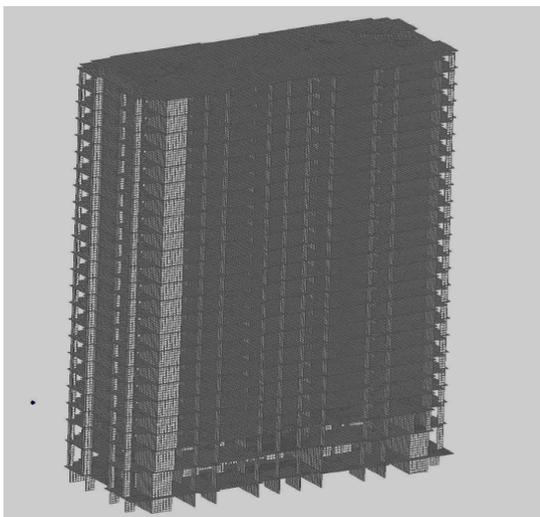


Шестая форма, частота
47,89 Гц

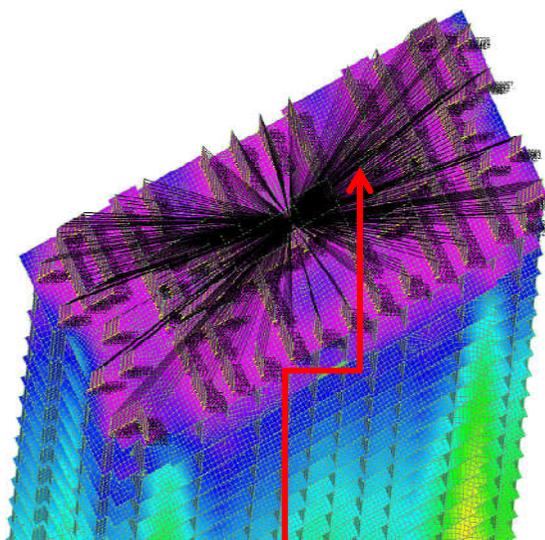


Седьмая форма, частота
86,85 Гц

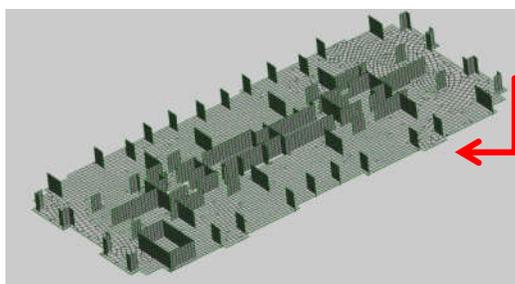
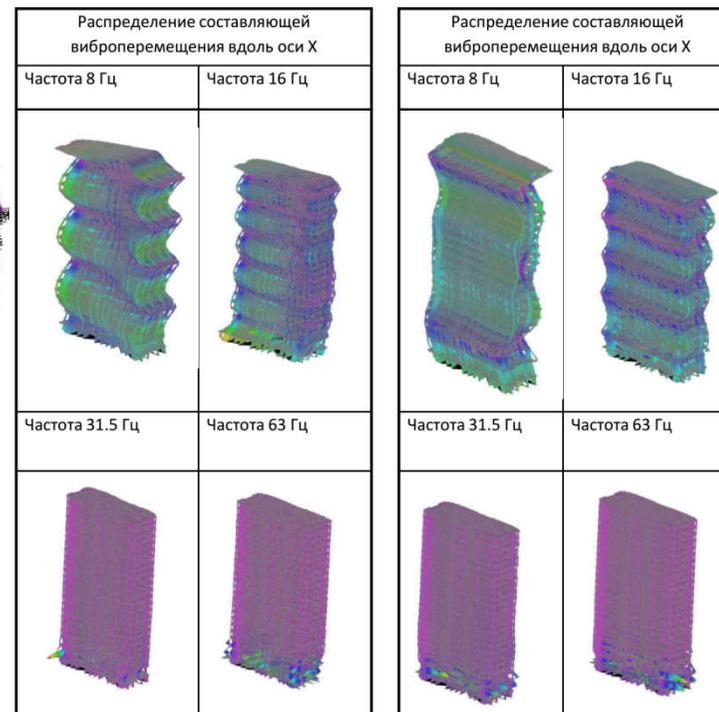
Моделирование распространения вибрации по конструкциям здания



МКЭ модель здания



Присоединенная масса, связанная с узлами МКЭ модели Rigid элементами

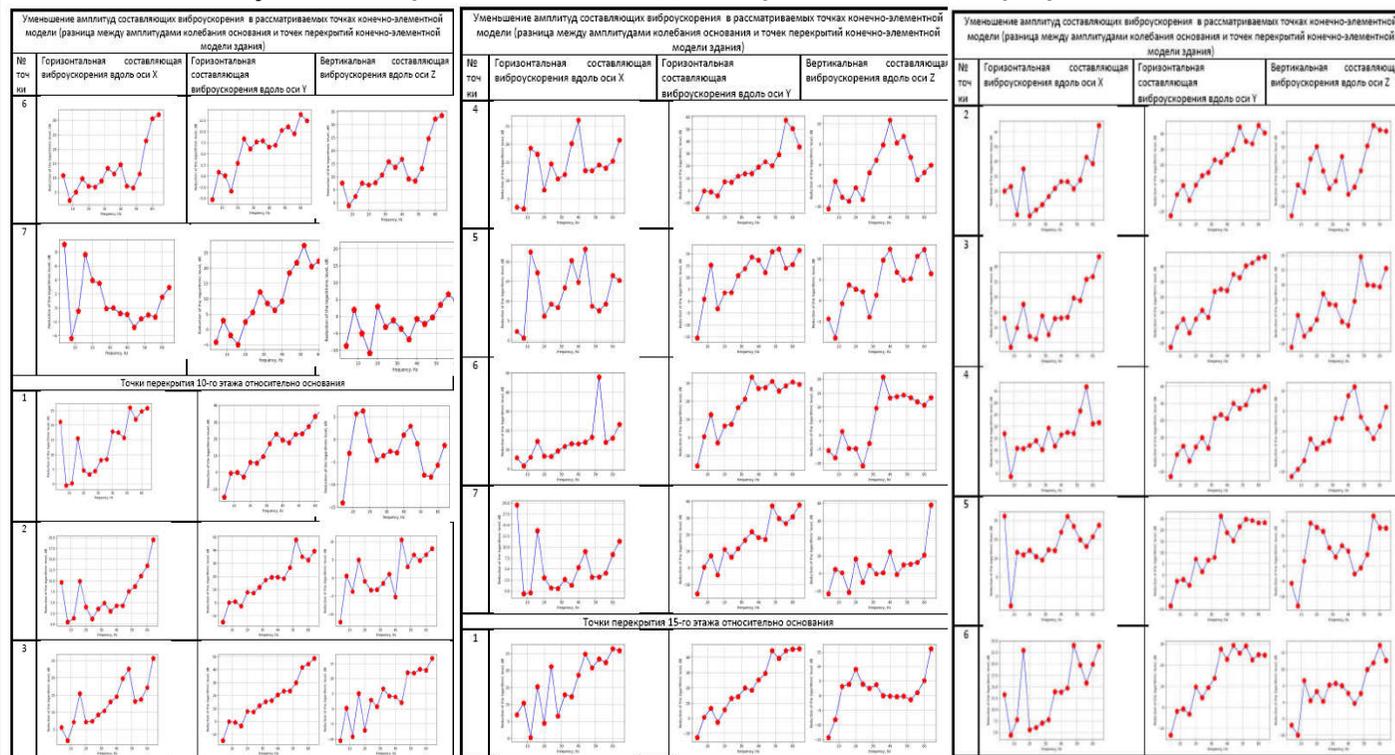
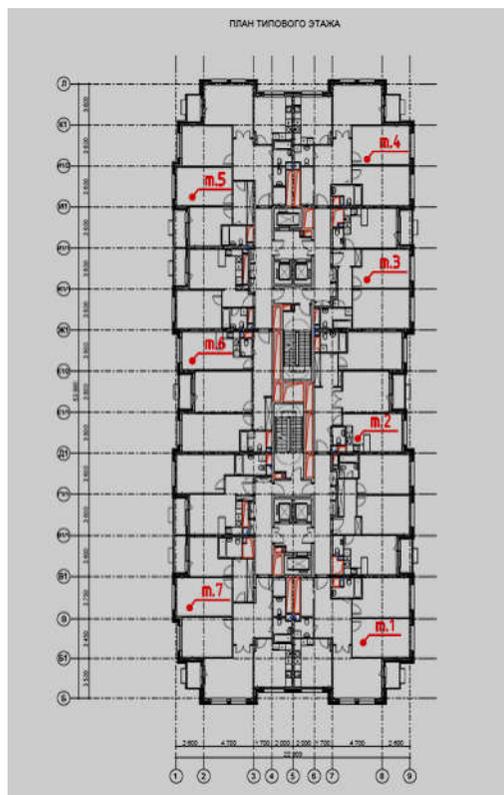


Типовой этаж

Результаты расчета методом прямого интегрирования

Моделирование распространения вибрации по конструкциям здания

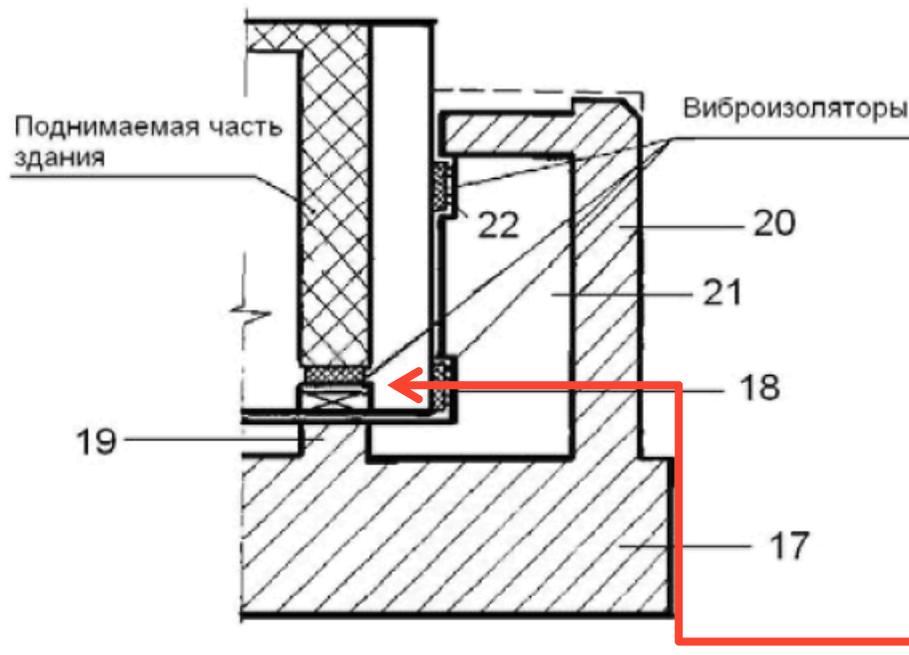
Результаты расчета методом прямого интегрирования



План типового этажа с контрольными точками

Внешний вид виброизолирующих устройств

Конструктивно резинометаллические виброизоляторы представляют собой системы чередующихся слоев резины (либо иного эластичного материала) и армирующих стальных слоев



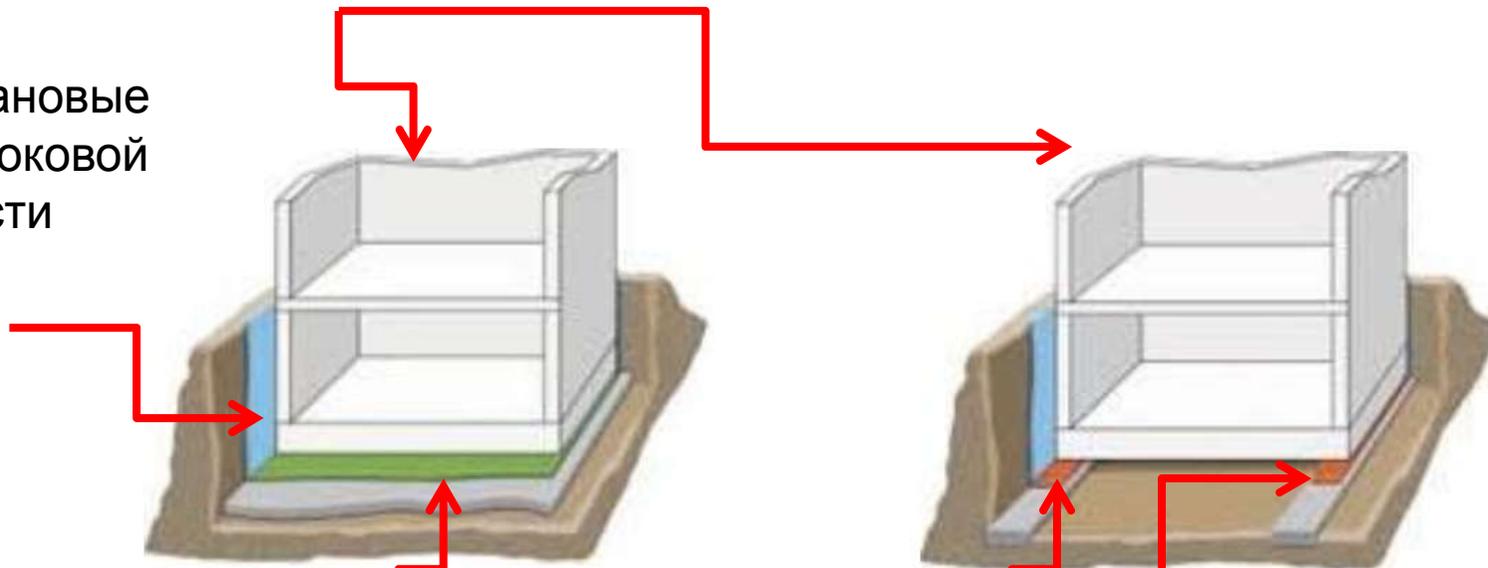
Установка виброизоляторов производится в несущих стенах и на колоннах здания в специально предусмотряваемом для этого виброизоляционном шве. Возможная схема установки виброизоляторов в виброизоляционном шве представлена на рисунке

Виброизоляторы

Виброизолирующие полиуретановые маты

Виброизолируемое здание

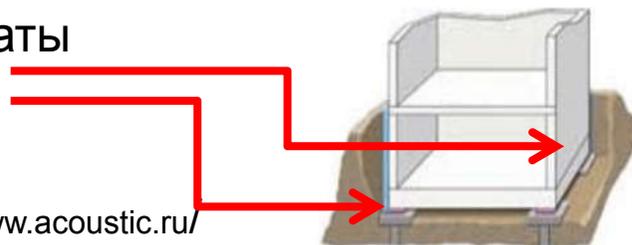
Полиуретановые маты на боковой поверхности здания



Полиуретановые маты под фундаментной плитой (полноплощостная опора)

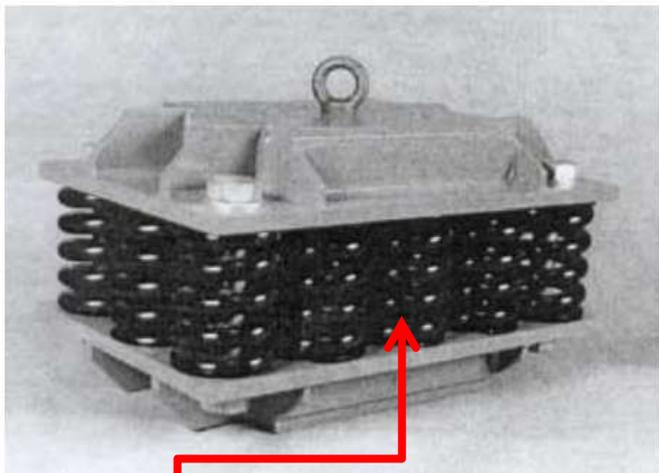
Полиуретановые маты под фундаментами стен (ленточная опора)

Полиуретановые маты (точечная опора)



Пружинные виброизоляторы

Одной из наиболее эффективной системой виброизоляции зданий является использование стальных пружин, размещаемых под зданием в виде отдельных «пружинных сборок».



Пружины находятся в условиях предварительного сжатия (преднапряженный пружинный блок)



Пружины совмещены с демпфирующим устройством, позволяющим производить «успокоение колебаний»



Преимущества и недостатки каждого из методов виброизоляции

Преимущества применения резинометаллических виброизоляторов:

1. Достаточно небольшие габариты виброизоляторов;
2. Возможность установки и замены виброизляторов в процессе эксплуатации здания;
3. Высокая эффективность гашения уровней вибрации;

Недостатки:

1. Необходимость изменения конструкций здания в уровне виброизоляционного шва;

Преимущество полиуретановых матов:

1. Минимальные изменения в конструкциях зданий
2. Большая номенклатура серийно выпускаемых матов

Недостатки:

1. Необходимость точного учета жесткости мата при назначении свойств основания здания, фактически с использованием полиуретановогомата производится замена основания под зданием

Преимущества пружинной виброизоляции:

1. Высокая эффективность виброизоляции в особенности в зоне низких частот воздействий

Недостатки

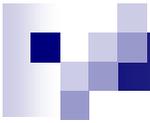
1. Большие габариты пружинных сборок
2. Необходимость существенного изменения конструктивных элементов здания для установки виброизоляторов в поясе виброзащиты

Особенности моделирования многоэтажного здания, с учетом расположения дискретной системы виброзащиты



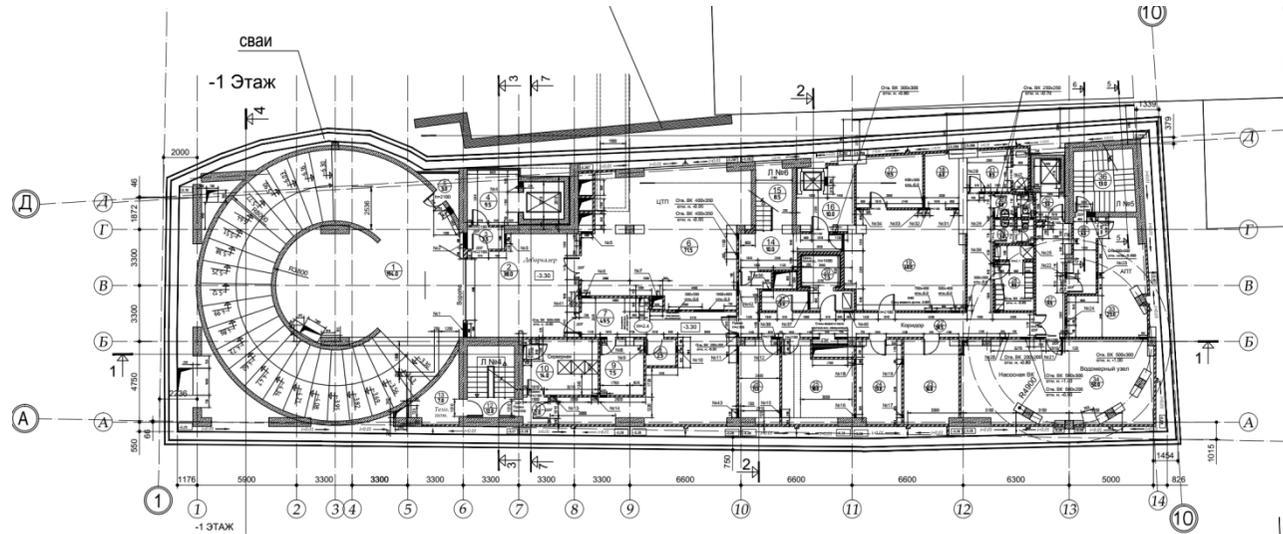
Для построения расчетной модели использовался один из современных программных комплексов, позволяющих создавать пространственные МКЭ модели зданий, основанные на применении оболочечных и стержневых конечных элементов, а также элементов Solid тел.

В качестве первого примера рассмотрим здание, возведенное в непосредственной близости от перегонных тоннелей линии метро неглубокого заложения, по адресу: г. Москва, ул. Волхонка, д. 6

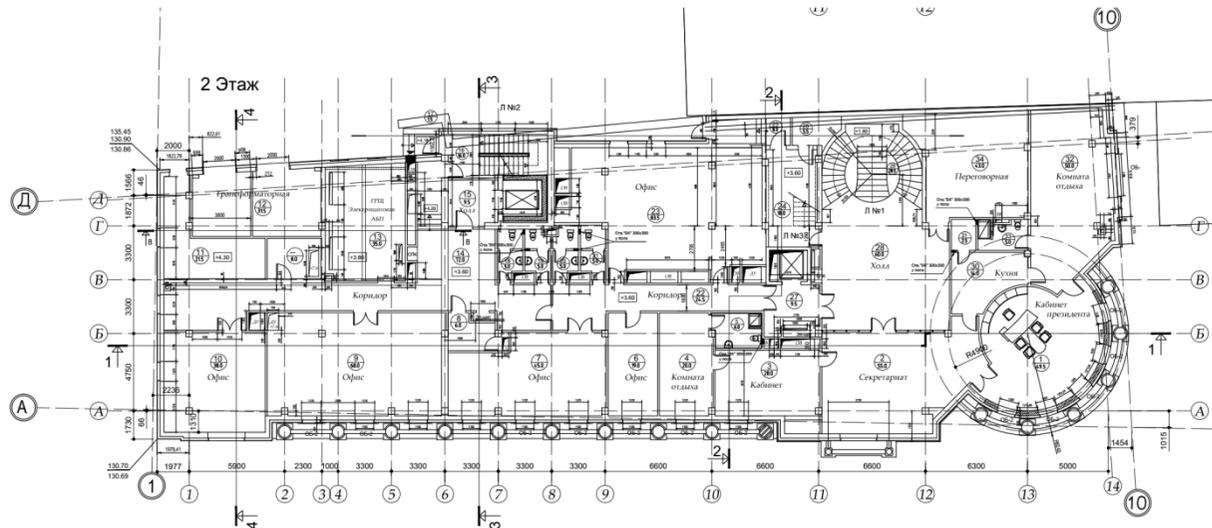


Планы этажей здания

План -1-го этажа здания (подземный ярус)



План 2-го этажа здания

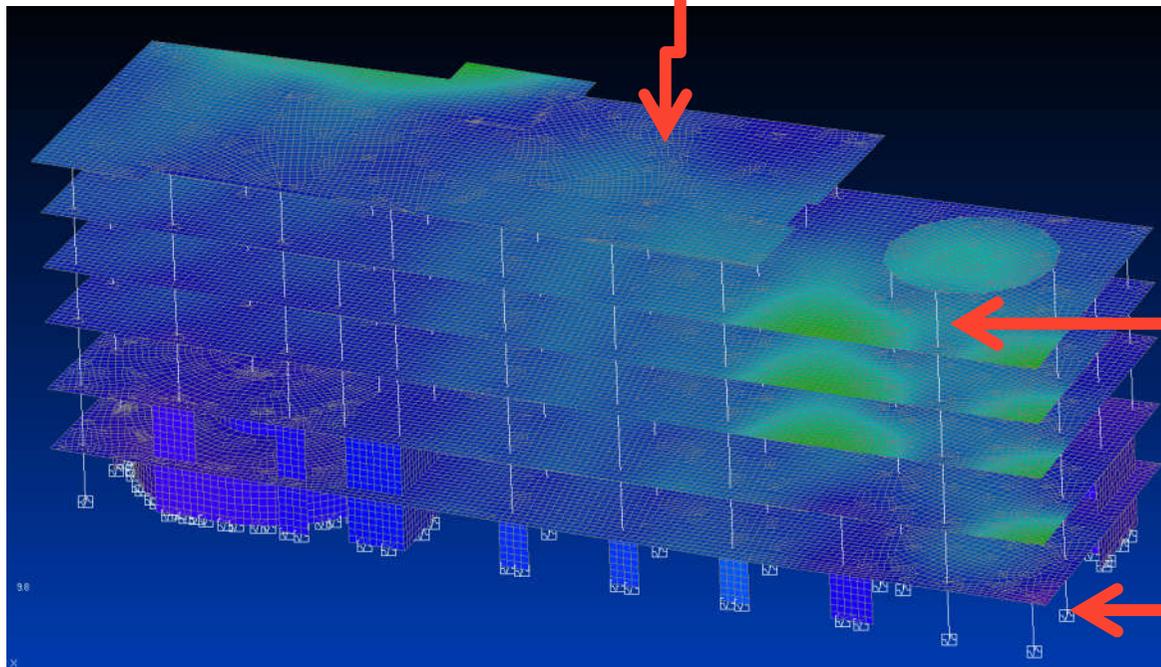


Внешний вид разработанной МКЭ модели

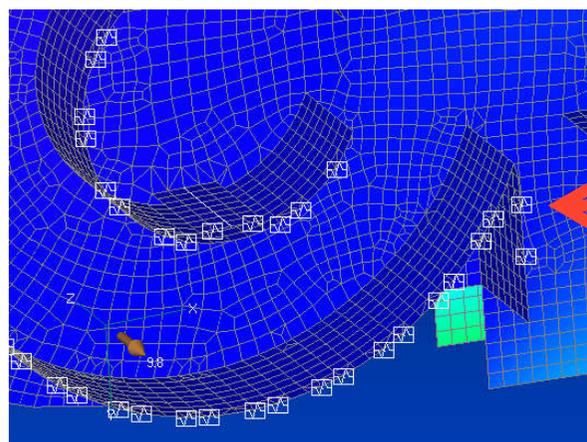
Конечные элементы стен и плит перекрытий (пластина)

МОДЕЛИ

Конечные элементы колонн (стержневые элементы)

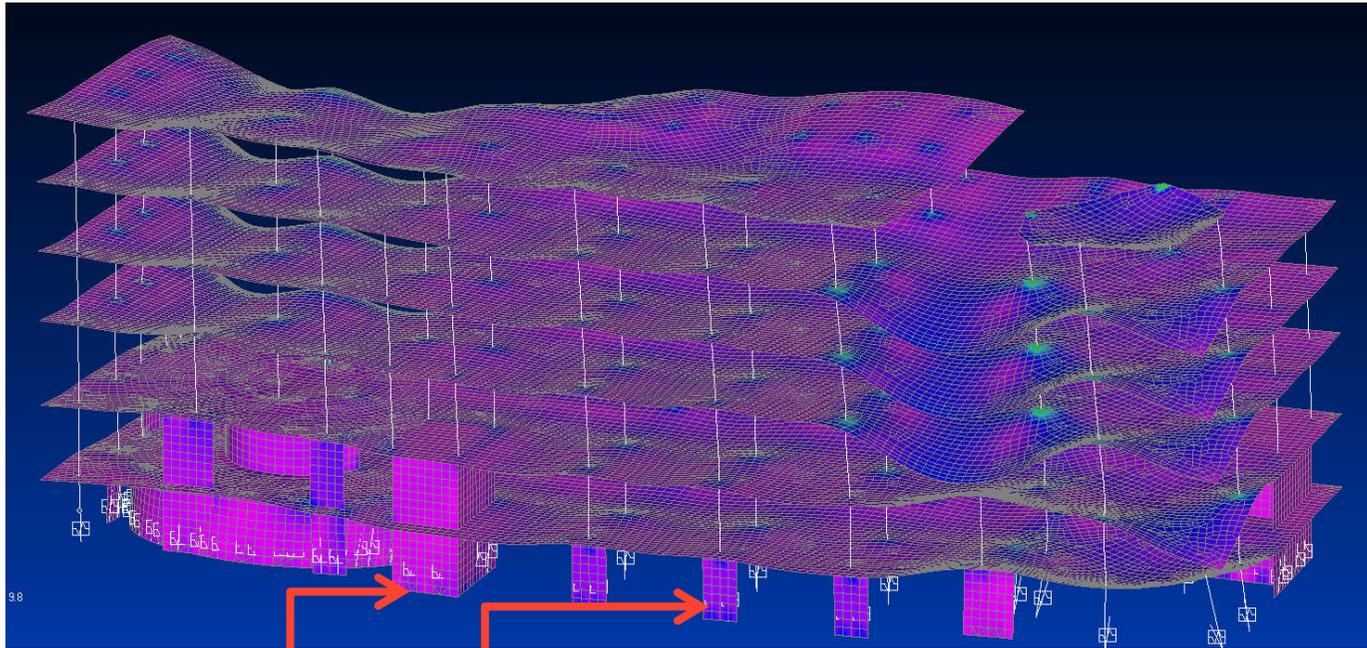


Связи конечной жесткости (линейные упругие элементы), моделируют виброизоляторы в схеме



Результат расчета здания на вертикальные нагрузки

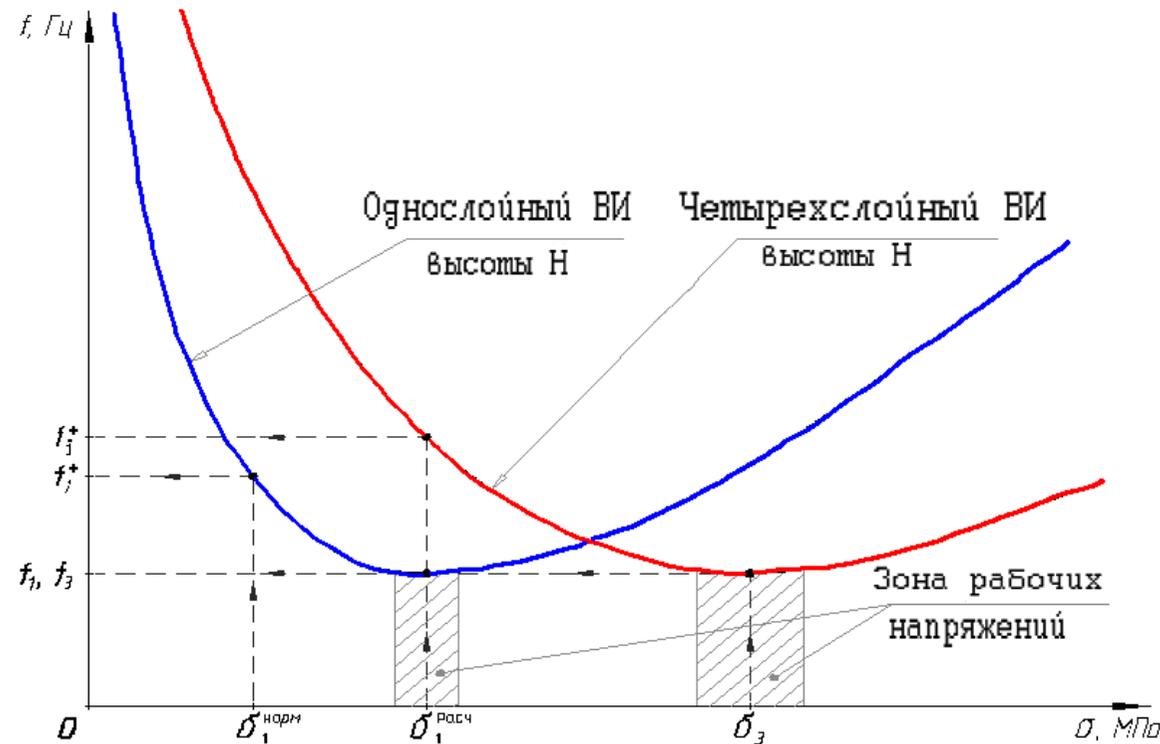
Показана деформированная модель здания, размещенная на связях конечной жесткости, отражающих влияние поля виброизоляторов



Виброизолирующие элементы- связи конечной жесткости. Могут применяться в ряде программных комплексов одноузловые элементы, либо двухузловые элементы (в этом случае возможен учет реальной геометрии связи—её высоты).

Особенности задания нагрузок на виброизолирующие элементы

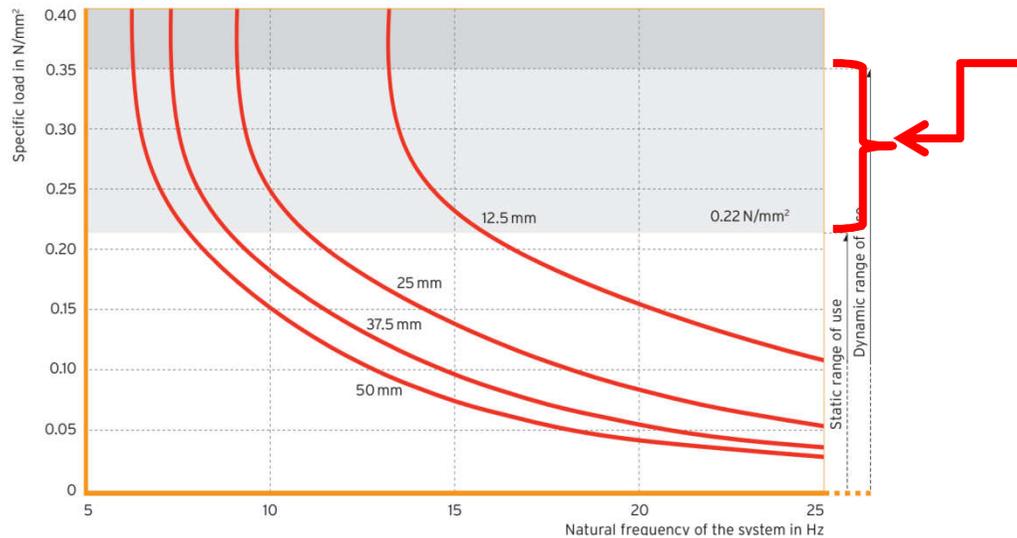
Так как виброизолирующие элементы обладают чаще всего наибольшей эффективностью гашения вибрационного воздействия только в определенном диапазоне нагрузок, то важным является обеспечить нагрузку виброизолирующих элементов не более, но и не менее данного «корридора эффективной работы». Следующий график иллюстрирует оптимальный корридор напряжений



Из опыта эксплуатации виброизолируемых систем наибольшей эффективностью виброзащиты обладали здания, где полезная нагрузка была учтена с коэффициентом 0,5

Особенности задания нагрузок на виброизолирующие элементы

Аналогичными графиками, иллюстрирующими зависимость эффективности работы виброизоляторов от действующих в них напряжений, также существуют графики зависимости эффективности работы пенополиуретановых матов от напряжений.



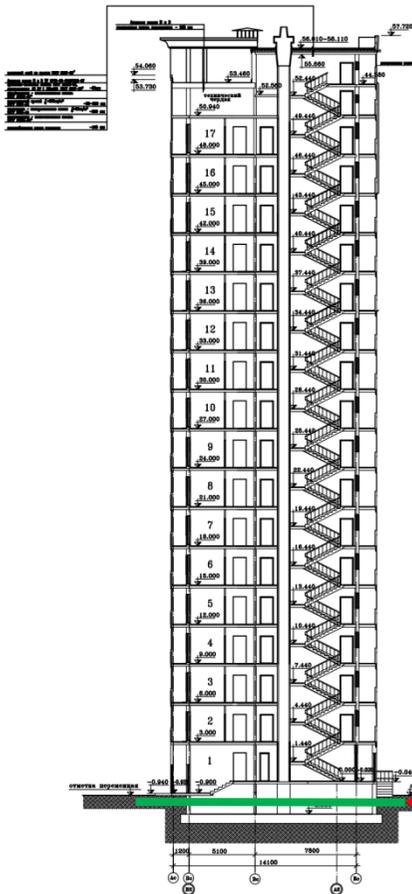
Зона оптимальных «рабочих» напряжений рабочего слоя

Из которых также следует, что наибольшей «мягкостью», то есть наименьшей собственной частотой (в Гц) слои пенополиуретана под зданием обладают только при их оптимальном нагружении. Как превышение нагрузок, так и незагружение виброизолирующих слоев под зданиями приводит к значительному снижению эффективности виброизоляционных мероприятий в зданиях.

Расчет виброизолированных зданий на ветер

Аналогично расчету зданий без виброизоляторов на ветровое воздействие, расчет здания с виброизолирующими упругими элементами на ветер должен производиться с учетом статической и динамической составляющей ветрового воздействия.

В качестве примера рассмотрим 14-17-ти этажный 5-ти секционный жилой дом, в цокольном этаже которого располагаются виброизоляторы



План одной секции

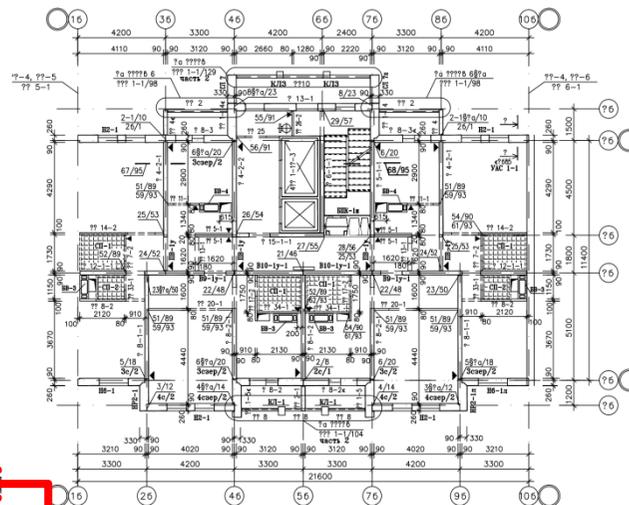
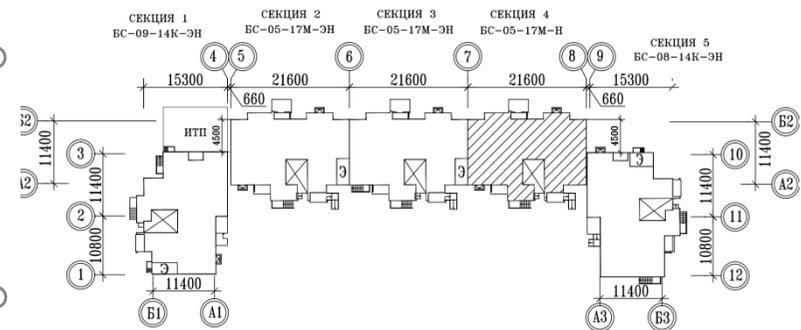


Схема секций



Виброизоляционный шов в здании

Определение требуемой грузоподъемности виброизоляторов

Нагрузки, учитываемые при проектировании системы виброизоляции приведены в следующей таблице

| № | Вид нагрузки | Нормативное значение | Степень учета |
|---|--|-----------------------|---------------|
| 1 | Собственный вес несущих конструкций | - | 100% |
| 2 | Вес наружных панелей (типовой этаж)-рядовые панели | 15,0кН/м | 100% |
| 3 | Вес ограждения на лоджиях | 3,0 кН/м | 100% |
| 4 | Вес перегородок | 2,5 кН/м ² | 100% |
| 5 | Полезная нагрузка в квартирах | 1,5 кН/м ² | 50% |
| | -//- на чердаке | 0,7 кН/м ² | 50% |
| | -//- на лоджиях | 2,0 кН/м ² | 50% |

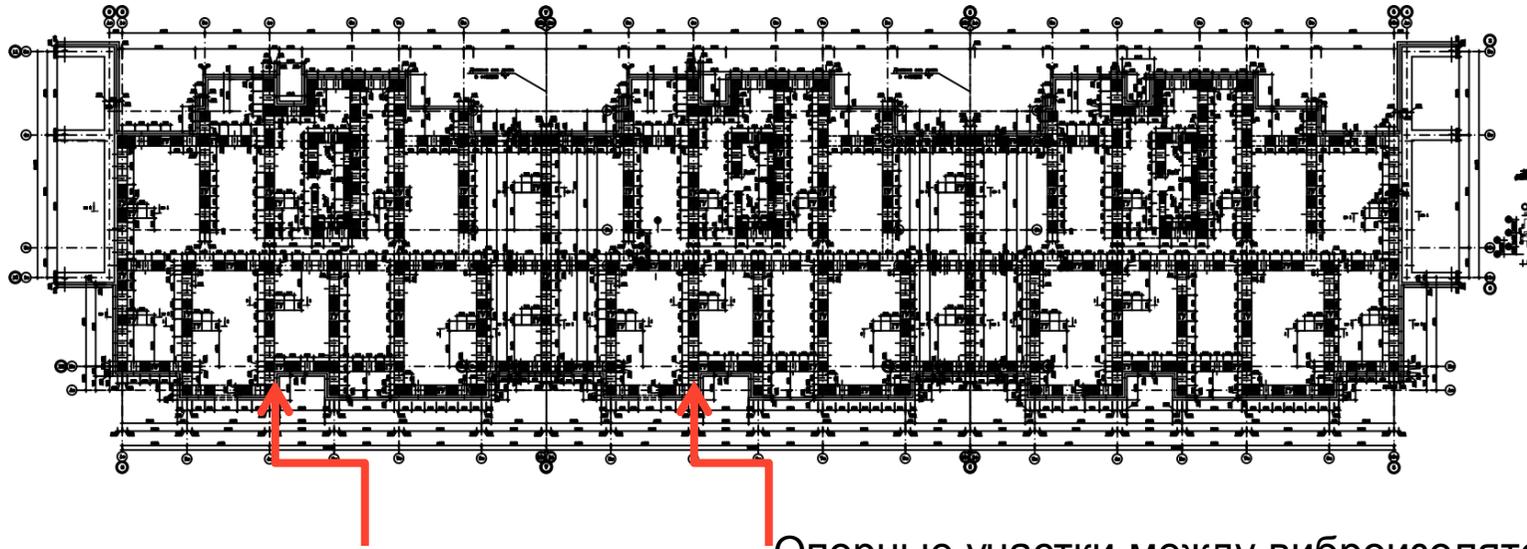
Собственный вес ограждающих конструкций при статическом расчете учитывался в виде нагрузки, равномерно распределенной по линии. Двери и окна в ограждающих конструкциях при расчете не учитывались. Нагрузки от внутренних самонесущих стен и перегородок, а также технологического оборудования на каждом этаже были приняты в виде равномерно распределенной по площади перекрытия нагрузки.

Для предварительной расстановки виброизоляторов был проведен **первый** (предварительный) **расчет** здания, жестко защемленного в уровне вибрационного шва. Тем самым, было получено распределение реактивных усилий в уровне заделки (шва отрезки) от нормативных нагрузок. На основе этого расчета была разработана схема расстановки виброизоляторов, учитывая их размеры в сочетании с конструктивными особенностями здания. При **втором** (проверочном) **расчете** вертикальные виброизоляторы рассматривались как шарнирные опоры, препятствующие перемещениям только в вертикальном направлении. Горизонтальные виброизоляторы рассматривались как шарнирные опоры, препятствующие перемещениям только в горизонтальном направлении.

Поскольку в процессе установки полностью повторяется эпюра нагрузки, характерная для установки на жесткие стержни, уточнение нагрузки, отражающее податливость виброизоляторов, не требуется.

Определение требуемой грузоподъемности виброизоляторов

После определения требуемой нагрузки в виброизоляционном шве была выполнена расстановка несущих виброизолирующих элементов (виброизоляторов) под конструкциями здания в уровне цокольного этажа здания. Схема установки виброизоляторов приводится ниже.



Ниши под виброизоляторы

Опорные участки между виброизоляторами

Определение жесткостных характеристик поля виброизоляторов

Центр тяжести поля виброизоляторов может быть определен по следующим формулам:

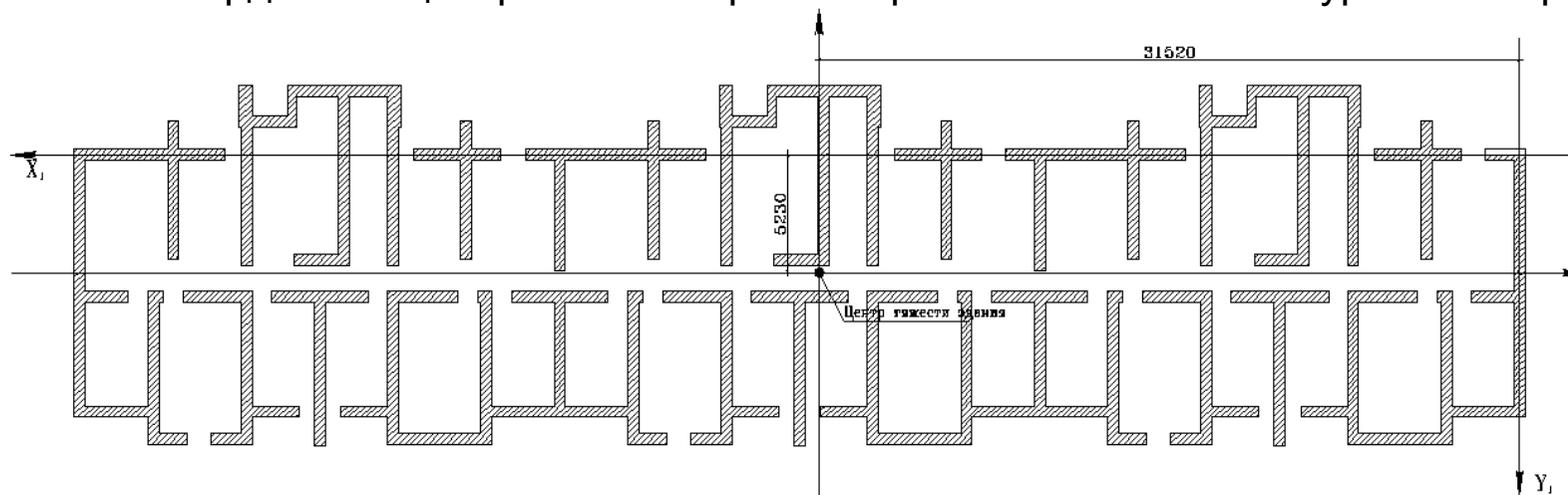
$$X_{ц.т.} = \frac{\sum P_i X_i}{\sum P_i}$$

$$Y_{ц.т.} = \frac{\sum P_i Y_i}{\sum P_i}$$

P_i - грузоподъемность одного виброизолятора
 X_i, Y_i - координаты виброизолятора в принятой системе координат

Суммарная нагрузка от веса здания равна сумме грузоподъемностей от виброизоляторов

Координаты центра тяжести рассматриваемого сечения в уровне виброшва



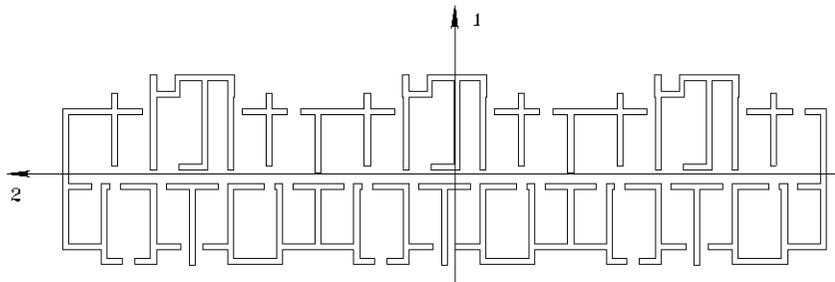
Консольная модель здания

Для модели составного стержня необходимо определить моменты инерции каждого этажа относительно главных осей поперечного сечения, а за длину «ступени» принять высоту соответствующего этажа.

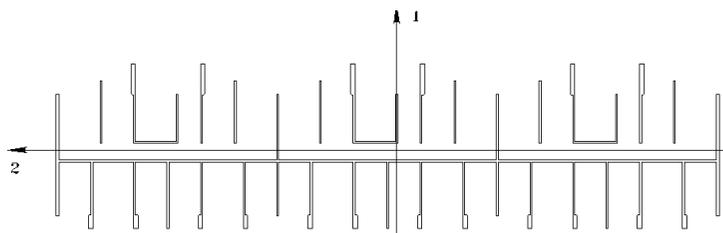
Определение угла наклона главных осей, площади поперечного сечения этажа, моментов инерции относительно главных осей и изгибных жёсткостей выполнено с применением программного комплекса AutoCAD, результаты приводятся в таблице

Инерционные характеристики поперечного сечения здания

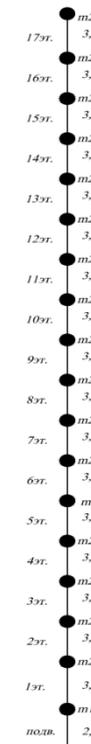
| | α_0 | H, м | $A_{эт}, M^2$ | J_1, M^4 | J_2, M^4 | $C_{изг,1},$ Н·М ⁴ | $C_{изг,2},$ Н·М ⁴ |
|--------------|-------------------|------|---------------|------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Тех. этаж | 90,1 ⁰ | 2,8 | 202,43 | 74809,92 | 4750,00 | $2,24 \cdot 10^{15}$ | $1,425 \cdot 10^{14}$ |
| Типовой этаж | 90,1 ⁰ | 3,0 | 70,53 | 28808,70 | 1295,45 | $8,64 \cdot 10^{14}$ | $3,88 \cdot 10^{13}$ |



Технический этаж



Типовой этаж



Консольная модель здания

Угол наклона главных осей составляет

Необходимая в дальнейших расчётах изгибная жёсткость этажа, рассматриваемого в составе консольного стержня, жёстко заделанного в основание определяется по формуле:

$$C_{изг} = E \cdot J_{изг},$$

где $E=3,0 \times 10^{10}$ Па модуль упругости бетона

Вращательная отпорная жёсткость виброизолированного здания (жёсткость на единичный поворот) характеризуется величиной момента, который необходимо приложить к зданию, чтобы вызвать его единичный поворот, как твёрдого тела относительно главных осей, проходящих через центр тяжести нагрузки на уровне установки виброизоляторов.

Отпорная жёсткость виброизолятора $M_{отп}$ определяется по формуле:

$$M_{отп} = C_{из} \cdot R_i^2$$

Динамическая
жёсткость
виброизолятора

Расстояние от центра тяжести поля
виброизоляторов до каждого из
виброизоляторов

Для данного здания жесткость
всего поля виброизоляторов
вдоль осей X и Y составит:

$$M_{\phi,x} = \sum C_{из} Y_i^2 = 2,107 \times 10^7 \text{ тм};$$

$$M_{\phi,y} = \sum C_{из} X_i^2 = 1,2531 \times 10^6 \text{ тм}.$$

Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района

Все расчёты проведены для случая действия ветра вдоль главной оси «1»-в направлении минимальной изгибной жёсткости и, одновременно, максимальной площади действия ветровой нагрузки. Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте над поверхностью земли определяется по формуле

$$W_m = W_0 k c$$

где 230 кПа ($W_0=23\text{кгс/м}^2$), коэффициенты k и c принимаются в соответствии с 11.1.3, 11.1.5, 11.1.6, 11.1.7 СП 201330.2016

| Ветровые районы (принимаются по карте 2 приложения Е) | Ia | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| w_0 , кПа | 0,17 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,48 | 0,60 | 0,73 | 0,85 |

11.1.6 Коэффициент $k(z_e)$ для высот $z_e \leq 300$ м определяется по таблице 11.2 или по формуле (11.4), в которых принимаются следующие типы местности:

А — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, сельские местности, в том числе с постройками высотой менее 10 м, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

В — городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м;

С — городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м.

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии $30h$ — при высоте сооружения $h < 60$ м и на расстоянии 2 км — при $h > 60$ м.

Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района (продолжение)

Согласно ранее действующему СНИП 2.01.85* «Нагрузки и воздействия» аэродинамические коэффициенты для наветренной и подветренной сторон определялись по данным таблицы:

СХЕМЫ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ c

| Номер схемы | Схемы зданий, сооружений, элементов конструкций и ветровых нагрузок | Определение аэродинамических коэффициентов c | Примечания |
|-------------|---|--|------------|
| 1 | Отдельно стоящие плоские сплошные конструкции. Вертикальные и отклоняющиеся от вертикальных не более чем на 15° поверхности: наветренные подветренные | $c_e = +0,8$ $c_e = -0,6$ | — |

Зависимость коэффициента k от высоты для различных типов местности

| Высота z_e , м | Коэффициент k для типов местности | | |
|------------------|-------------------------------------|------|------|
| | A | B | C |
| ≤5 | 0,75 | 0,5 | 0,4 |
| 10 | 1,0 | 0,65 | 0,4 |
| 20 | 1,25 | 0,85 | 0,55 |
| 40 | 1,5 | 1,1 | 0,8 |
| 60 | 1,7 | 1,3 | 1,0 |
| 80 | 1,85 | 1,45 | 1,15 |
| 100 | 2,0 | 1,6 | 1,25 |
| 150 | 2,25 | 1,9 | 1,55 |
| 200 | 2,45 | 2,1 | 1,8 |
| 250 | 2,65 | 2,3 | 2,0 |
| 300 | 2,75 | 2,5 | 2,2 |

Для территории строительства принимаем тип местности В.

Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района (продолжение)

11.1.8 Нормативное значение пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки w_p на эквивалентной высоте z_e следует определять следующим образом:

а) для сооружений (и их конструктивных элементов), у которых первая частота собственных колебаний f_1 , Гц, больше предельного значения собственной частоты f_{lim} , (см. 11.1.10), — по формуле

$$W_p = W_m \zeta(z_e) v,$$

где w_m — определяется в соответствии с 11.1.3;

$\zeta(z_e)$ — коэффициент пульсации давления ветра, принимаемый по таблице 11.4 или формуле (11.6) для эквивалентной высоты z_e (см. 11.1.5);

v — коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (см. 11.1.11).

11.1.11 Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления v следует определять для расчетной поверхности сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций.

Расчетная поверхность включает в себя те части наветренных и подветренных поверхностей, боковых стен, кровли и подобных конструкций, с которых давление ветра передается на рассчитываемый элемент сооружения.

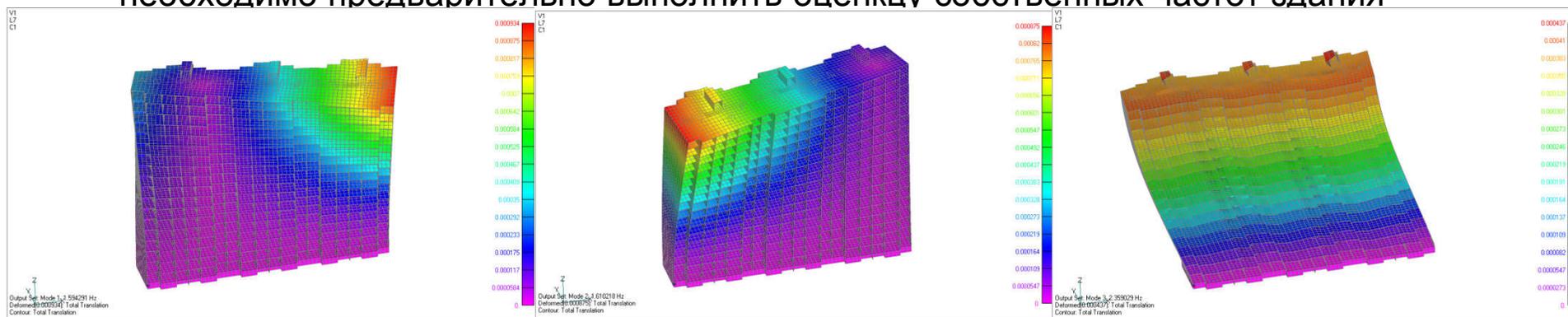
Если расчетная поверхность близка к прямоугольнику, ориентированному так, что его стороны параллельны основным осям (рисунок 11.2), то коэффициент v следует определять по таблице 11.6 в зависимости от параметров ρ и χ , принимаемых по таблице 11.7.

Таблица 11.5

| Ветровые районы (принимаются по карте 3 приложения Е) | f_{lim} , Гц | | Ветровые районы (принимаются по карте 3 приложения Е) | f_{lim} , Гц | |
|---|----------------|-----------------|---|----------------|-----------------|
| | $\delta = 0,3$ | $\delta = 0,15$ | | $\delta = 0,3$ | $\delta = 0,15$ |
| Ia | 0,85 | 2,6 | IV | 1,4 | 4,3 |
| I | 0,95 | 2,9 | V | 1,6 | 5,0 |
| II | 1,1 | 3,4 | VI | 1,7 | 5,6 |
| III | 1,2 | 3,8 | VII | 1,9 | 5,9 |

Определение собственных частот

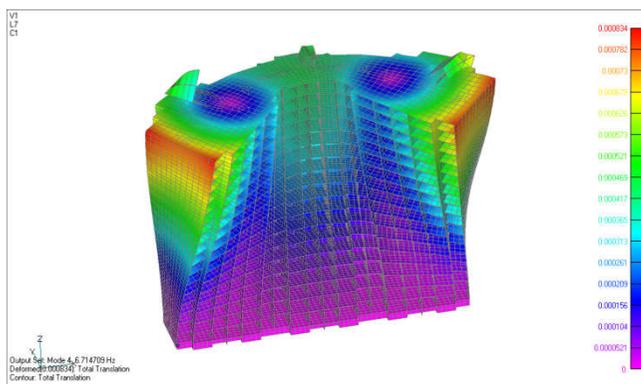
Так как тип проводимого расчета напрямую зависит от жесткости сооружения, то необходимо предварительно выполнить оценку собственных частот здания



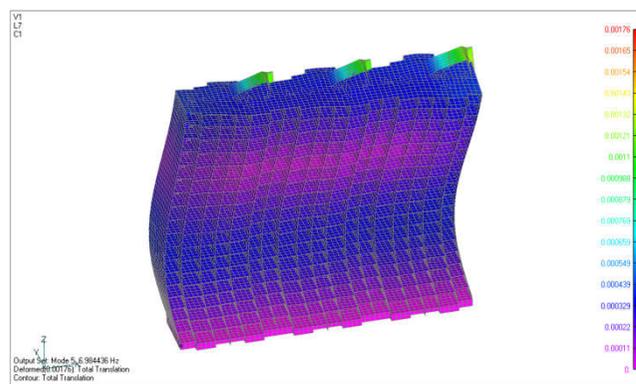
1 собств. частота 1,59 Гц

2 собств. частота 1,61 Гц

3 собств. частота 2,35 Гц



4 собств. частота 6,71 Гц



5 собств. частота 6,98 Гц

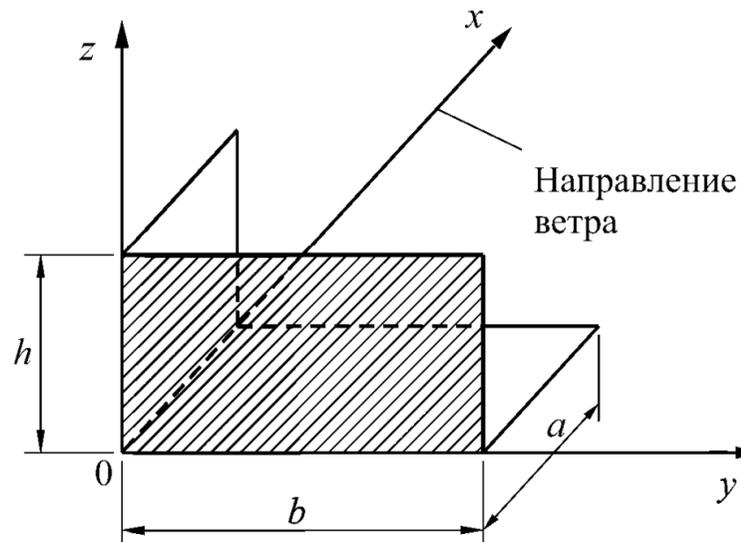
Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района (продолжение)

Определение коэффициента корреляции определяется по таблицам 11,6 и 11,7. Для прямоугольной пластинки $65,3 \times 57,72$ м (по мидделеву сечению) коэффициент пространственной корреляции равен 0,6044

11.1.11 Коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления v следует определять для расчетной поверхности сооружения или отдельной конструкции, для которой учитывается корреляция пульсаций.

Расчетная поверхность включает в себя те части наветренных и подветренных поверхностей, боковых стен, кровли и подобных конструкций, с которых давление ветра передается на рассчитываемый элемент сооружения.

Если расчетная поверхность близка к прямоугольнику, ориентированному так, что его стороны параллельны основным осям (рисунок 11.2), то коэффициент v следует определять по таблице 11.6 в зависимости от параметров ρ и χ , принимаемых по таблице 11.7.



Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района (продолжение)

К определению коэффициента пространственной корреляции

Таблица 11.6

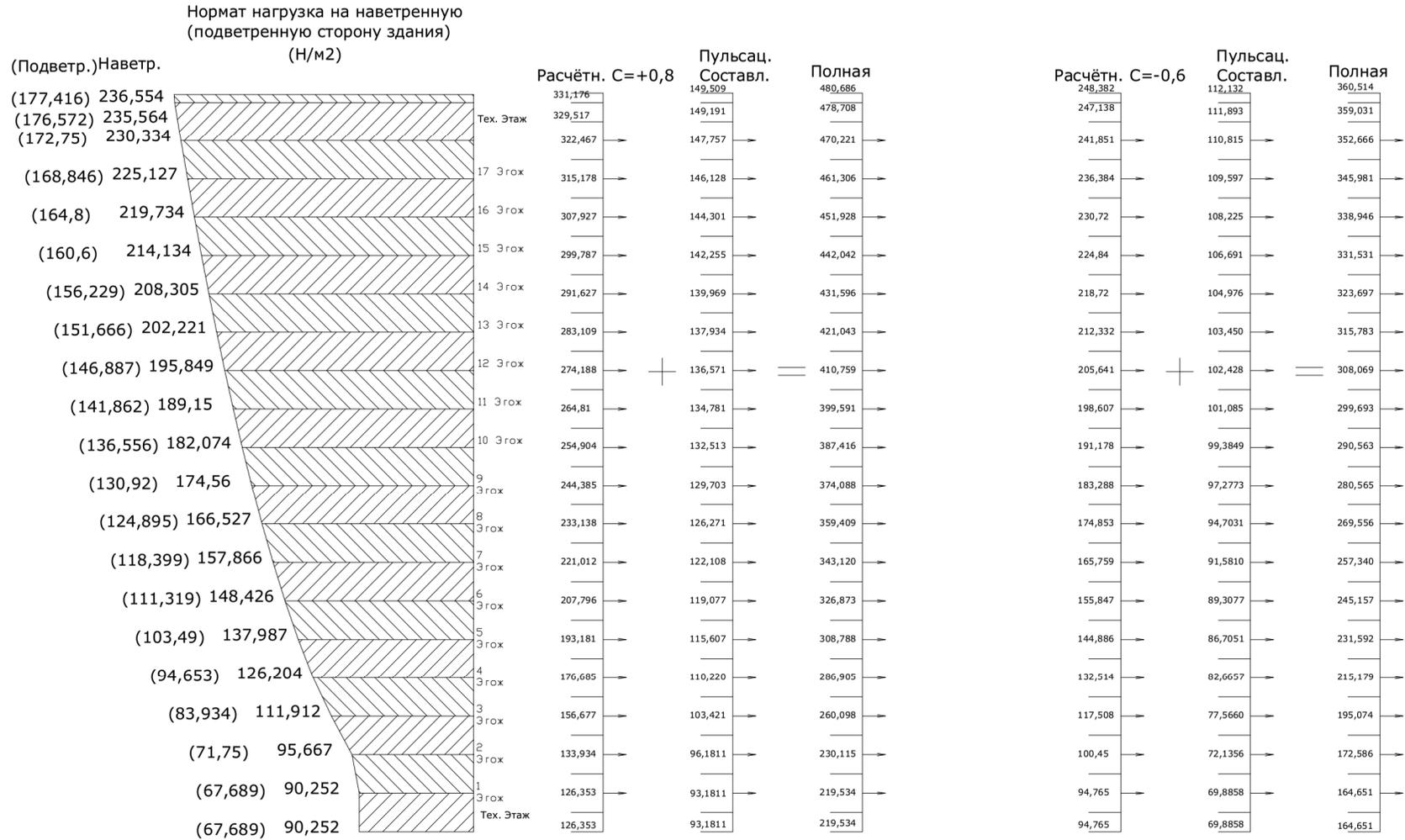
| ρ, м | Коэффициент ν при χ , м, равном | | | | | | |
|------|--|------|------|------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 | 160 | 350 |
| 0,1 | 0,95 | 0,92 | 0,88 | 0,83 | 0,76 | 0,67 | 0,56 |
| 5 | 0,89 | 0,87 | 0,84 | 0,80 | 0,73 | 0,65 | 0,54 |
| 10 | 0,85 | 0,84 | 0,81 | 0,77 | 0,71 | 0,64 | 0,53 |
| 20 | 0,80 | 0,78 | 0,76 | 0,73 | 0,68 | 0,61 | 0,51 |
| 40 | 0,72 | 0,72 | 0,70 | 0,67 | 0,63 | 0,57 | 0,48 |
| 80 | 0,63 | 0,63 | 0,61 | 0,59 | 0,56 | 0,51 | 0,44 |
| 160 | 0,53 | 0,53 | 0,52 | 0,50 | 0,47 | 0,44 | 0,38 |

Таблица 11.7

| Основная координатная плоскость, параллельно которой расположена расчетная поверхность | ρ | χ |
|--|--------|--------|
| zoy | b | h |
| zox | $0,4a$ | hn |
| xoy | b | a |

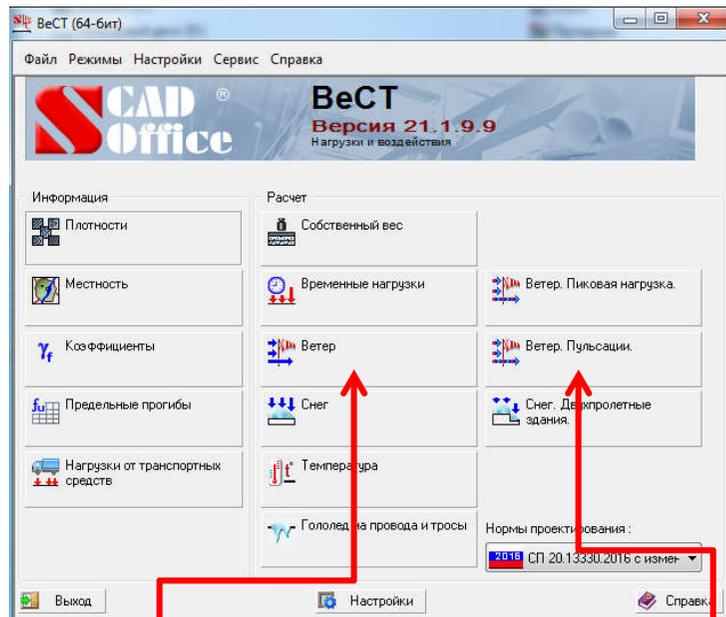
Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района

Ветровая нагрузка на фасад здания



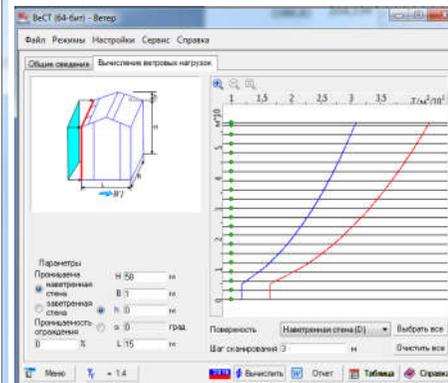
Эпюры ветрового давления для заданного ветрового района

Аналогичных результатов (построения эпюр ветрового воздействия) можно добиться используя программу «Вест», входящую в программный комплекс SCAD

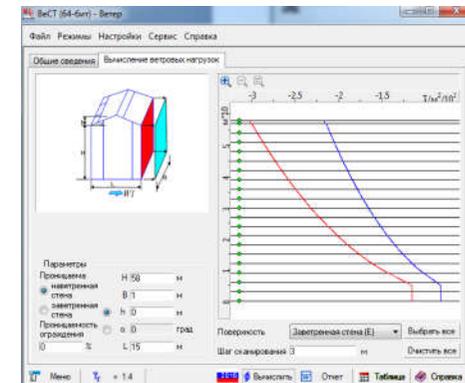


Статическая составляющая ветрового воздействия

Окно для вычисления статической составляющей ветрового воздействия

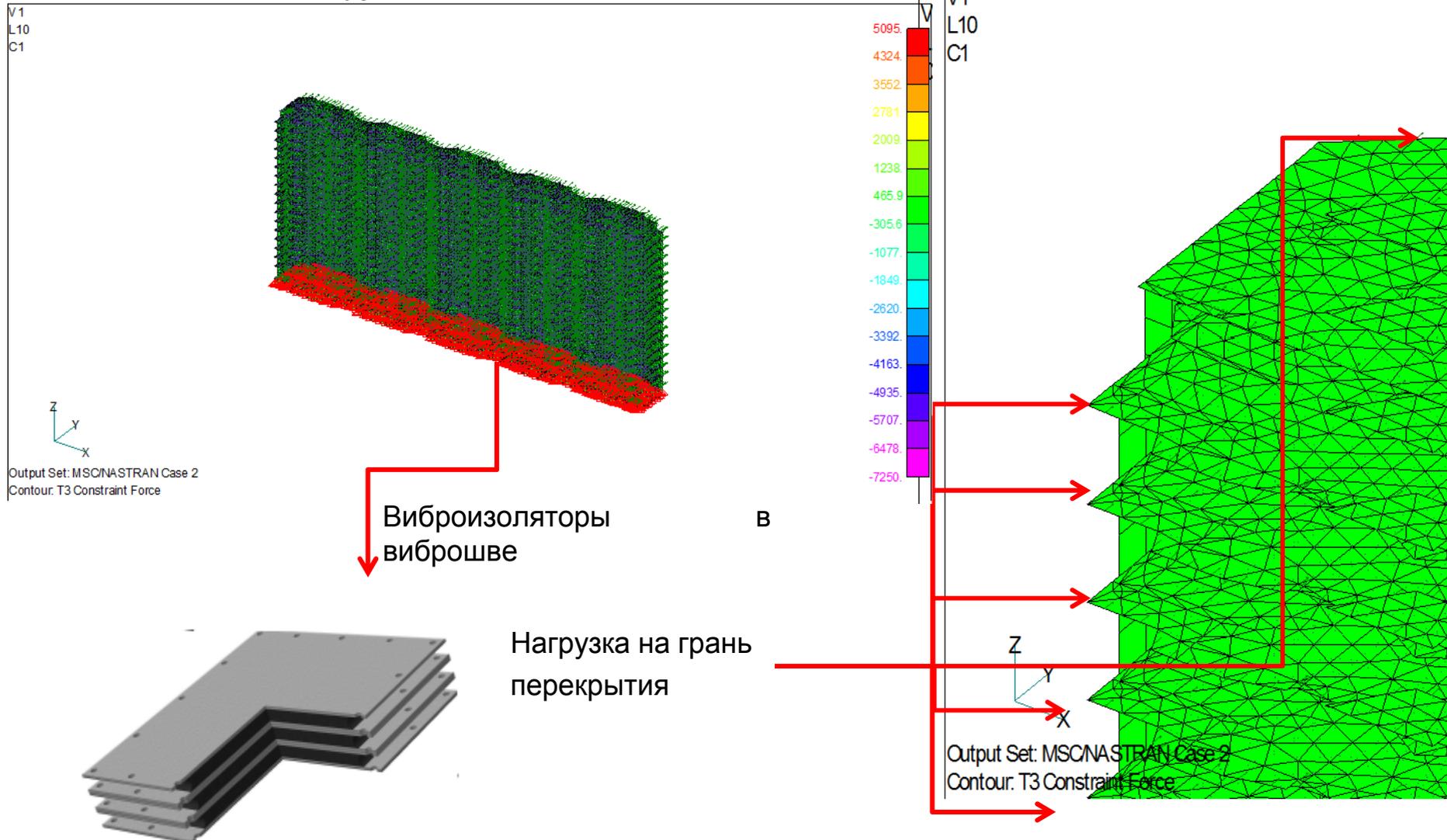


Пульсационная составляющая ветрового воздействия



Здание с приложенными ветровыми нагрузками

Модель здания на пружинах



Определение суммарного перемещения верха здания от ветра

Суммарное статическое усилие от ветра для всего здания составит:

$$\sum P_{ст} = 25421,6 \text{ Н/м}, \quad P_{ст,Л} = 25421,6 \times 64,8 = 1647320 \text{ Н} = 168,093 \text{ тс.}$$

Расстояние от центра тяжести эпюры статической ветровой нагрузки до уровня «вибрационного» шва $H_c = 34,82 \text{ м}$.

Суммарное динамическое усилие от ветра для всего здания составит:

$$\sum P_{дин} = 13420,22 \text{ Н/м}, \quad P_{дин,Л} = 13420,22 \times 64,8 = 88,73 \text{ тс.}$$

Расстояние от центра тяжести эпюры динамической ветровой нагрузки до уровня «вибрационного» шва $H_d = 32,42 \text{ м}$.

Перемещение верха здания как жёсткозаделанного упругого составного стержня под действием статической и динамических составляющих ветровой нагрузки, приложенных в центрах тяжести соответствующих эпюр, определяется по обычным формулам строительной механики и составляет соответственно: $\Delta_{ст} = 1,1932 \text{ мм}$ и $\Delta_{дин} = 0,5561 \text{ мм}$

Суммарное перемещение верха здания составит: $\Delta_g = 1,749 \text{ мм}$.

Статический и динамический изгибающие моменты от ветровой нагрузки относительно главной оси «2» составляет соответственно

$$M_{x, ст} = 5,852 \times 10^3 \text{ тм}, \quad M_{x, дин} = 2,886 \times 10^3 \text{ тм.}$$

Общее результирующее значение горизонтальной ветровой нагрузки на здание составляет

$$P_{гор} = 256,812 \text{ тс};$$

Общий изгибающий момент составляет: $M_{изг} = 8,72 \times 10^3 \text{ тм}$

Определение суммарного перемещения здания от ветра (продолжение)

Перемещение верха здания как жёсткозаделанного упругого составного стержня под действием статической и динамических составляющих ветровой нагрузки, приложенных в центрах тяжести соответствующих эпюр, определяется по обычным формулам строительной механики и составляет соответственно

$$\Delta_{ст} = 1,1932 \text{ мм и } \Delta_{дин} = 0,5561 \text{ мм.}$$

Суммарное перемещение составит: $\Delta_{с} = 1,749 \text{ мм.}$

Угол поворота виброизолированного здания как жёсткого тела при совместном действии статической и динамической составляющих ветровой нагрузки определяется по формуле

$$\phi = \frac{M_{изг}}{M} \quad \varphi_x = \frac{5,85 \times 10^3}{1,25 \times 10^6} = 0,478 \times 10^{-3} \text{ рад.}$$

Тогда полное перемещение здания на высоте 57,8 м составит (от статики):

$$\Delta_{нов} = 4,78 \times 57,72 \times 10^{-3} \text{ м} = 0,266 \text{ мм,}$$

от динамического воздействия ветра $-\Delta_{дин, y} = 0,127 \text{ мм.}$

Перемещение здания от статики + динамика составит:

$$\Delta_{дин} = 0,393 \text{ мм.}$$

Определение суммарного перемещения здания от ветра (продолжение)

Максимальное смещение верха здания при совместном действии горизонтальной статической и динамической составляющих ветровой нагрузки складывается из трёх компонентов: смещения верха здания как жёстко заделанного в основании упругого стержня, смещения верха при повороте здания как жёсткого тела на упругих опорах (виброизоляторах) и горизонтального смещения его как твёрдого тела при обжати упругих упоров. Жёсткость виброизоляторов на сдвиг и влияние сил трения не учитывается и идёт в запас.

Смещение верха здания как упругого защемлённого стержня $\Delta_{cm} = 1,749 \text{ мм}$

Смещение верха здания от поворота $\Delta_{пов} = 0,393 \text{ мм}$

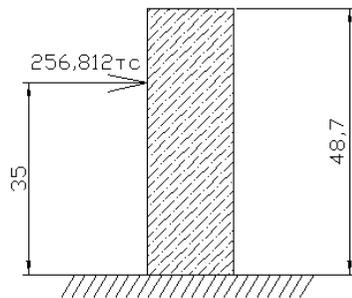
Горизонтальное смещение здания от перемещения горизонтальных упоров $\Delta_{yn} = 0,50 \text{ мм}$

Максимальное суммарное горизонтальное перемещение верха здания при действии расчётной ветровой нагрузки составляет $\Delta_{рез} = \Delta_{cm} + \Delta_{пов} + \Delta_{yn} = 2,642 \text{ мм}$

Расчёт на опрокидывание от действия ветрового момента

В случае установки здания на резиновые виброизоляторы возможна такая ситуация, когда момент от действия ветровой нагрузки относительно одной из боковых стен превысит момент от собственного веса здания относительно той же стены, что может привести к разрушению здания. Расчёт на опрокидывание производится на основе собранной выше нагрузки от ветрового потока и нагрузки от собственного веса здания. В случае, если момент от собственного веса здания не превышает момента от ветровой нагрузки, то опрокидывание здания не происходит.

Нагрузка от ветра прикладывается в центре тяжести эпюры ветровой нагрузки



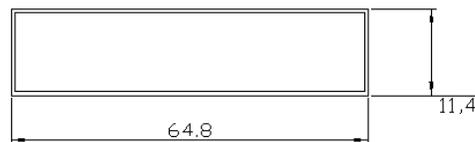
Момент от действия ветровой нагрузки равен

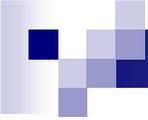
$$M = 256.812 \times 35 = 8988,42 \text{ тм.}$$

Момент от действия собственного веса относительно грани стены:

$$M = 31800 \cdot 11,4 / 2 = 181260$$

Таким образом, $181260 >> 8988,42$ тм. **Опрокидывание здания невозможно.**

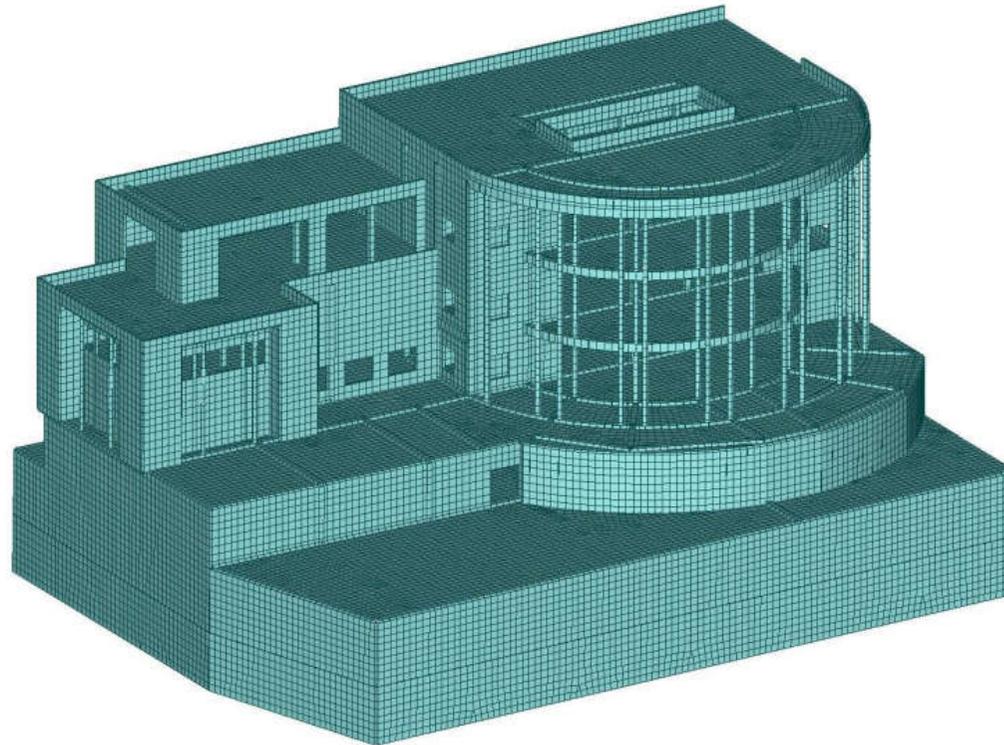




Моделирование поэтапного нагружения виброизоляторов

В качестве примера рассмотрим Модель «Депозитарно-реставрационного комплекса», строительство которого планировалось рядом с Сокольнической линией Московского метрополитена неглубокого заложения. Объект планировалось возвести для хранения экспонатов музеев Московского Кремля. В перечень помещений также входили исследовательские и реставрационные мастерские. Виброизоляторы, устанавливаемые в процессе строительства здания помещались в конструкциях ниш специальной формы Т-образного вида на стальных плитах из инструментальной стали 09Г2С. Вначале все пакеты виброизоляторов поджимаются на 70% расчетной нагрузки, потом на 100%, а на завершающих стадиях – до 120% нагрузки. Такой многоцикловый порядок напряжения виброизоляторов обеспечивает равномерное нагружение виброизоляторов и тем самым гарантирует защиту от перекосов здания в процессе подъёма. При этом в последнем цикле усилия «пережима» виброизоляторов вызывают разгрузку соседних виброизоляторов, то есть их частичное распрямление. Виброизолируемые конструкции здания отрываются от нижележащих конструкций и отжимаются от опорных прокладок на 3-5 мм. Опорные прокладки, уложенные между проёмами, извлекаются и, тем самым, здание «вывешивается» на виброизоляторах. После завершения процесса подъёма устанавливаются горизонтальные упоры и на этом монтаж виброзащиты заканчивается.

Конечно-элементная модель Депозитарно-реставрационного комплекса



Расчетная модель создавалась в соответствии с архитектурно-строительными чертежами, выполненными ГУП «МОСПРОЕКТ-2» им. М.В. Посохина. В расчетную схему были внесены незначительные изменения. В связи с тем, что на техническом этаже на отм. - 7.700 проходит вибрационный шов («шов отрезки»), часть стен этажа, расположенная ниже этого шва, в расчете не учитывалась. Здание рассчитывалось защемленным в уровне «шва отрезки»⁴¹

Принятые допущения расчетной модели

В качестве расчетной модели была выбрана пространственная (трехмерная) статически неопределимая система, в которой стены и перекрытия моделировались преимущественно четырехугольными оболочечными элементами, с шестью степенями свободы в узле, нулевой толщины, расположенными по центрам тяжести конструкций. Колонны и балки моделировались стержневыми элементами. Сопряжения колонн, стен, балок между собой и с перекрытиями были приняты жесткими, т.к. здание возводится из монолитного железобетона.

Материал конструкции условно рассматривается, как сплошная однородная среда. Гипотезы сплошности и однородности позволяют использовать методы математического анализа для изучения поведения деформируемых тел. В работе железобетон моделируется изотропным линейно-упругим (связь между напряжениями и деформациями описывается законом Гука) материалом со следующими характеристиками

Характеристики материала.

| Характеристика | Значение | Ед. изм. |
|-----------------------------|----------------------|------------------|
| Модуль упругости E_x | $3.00 \cdot 10^{10}$ | $\frac{H}{M^2}$ |
| Модуль сдвига G_{xy} | $1.20 \cdot 10^{10}$ | $\frac{H}{M^2}$ |
| Коэффициент Пуассона, ν | 0.2 | - |
| Удельный вес, ρ | $2.50 \cdot 10^3$ | $\frac{KГ}{M^3}$ |

Используемые элементы для моделирования процесса монтажа виброизоляторов

В работе необходимо смоделировать процесс монтажа виброизоляторов. В ходе монтажа здание отрывается от опорных участков и все нагрузки с части здания, расположенной выше шва отрезки, передаются на нижележащую только через резинометаллические виброизоляторы. Основная задача – это при помощи средств программного комплекса реализующего МКЭ задать такие элементы конструкции здания, которые бы соответствовали свойствам виброизоляторов и опорных участков.

Для этого элементы конструкции здания задаются специальными элементами GAP. Он представляет собой нелинейный одномерный элемент, предназначенный для моделирования зазоров или натягов в контактных задачах. Формируется между начальным (А) и конечным (В) узлами (показано на рисунке), определяющими направление X, которое совместно со взаимно-перпендикулярными осями Y (указывается при создании элемента) и Z образует правую систему координат XYZ элемента.

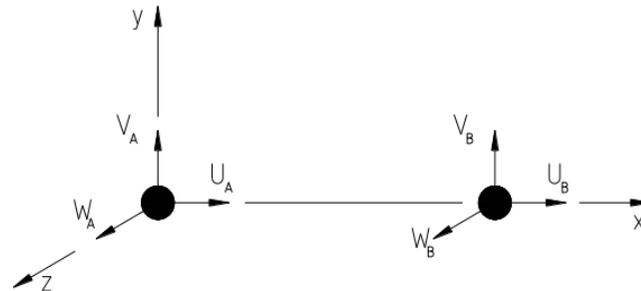
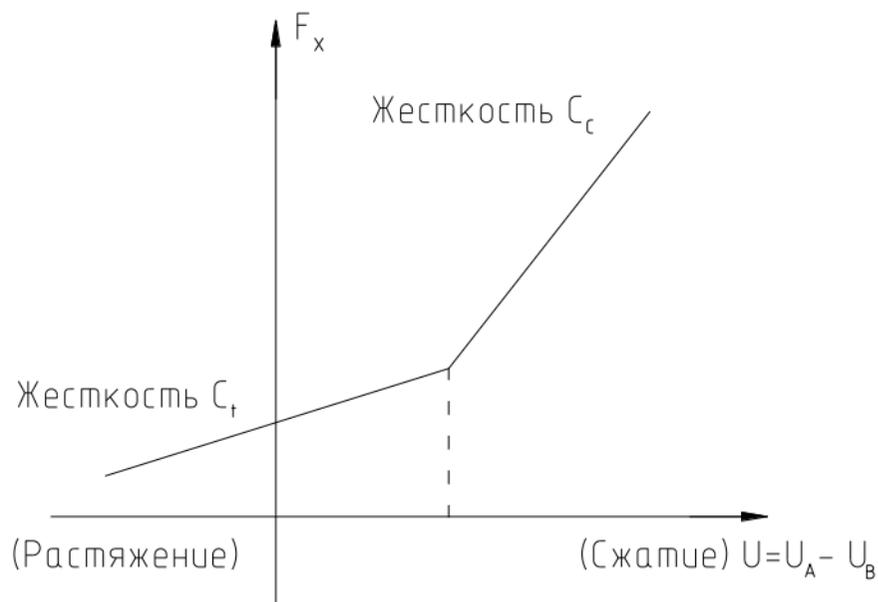
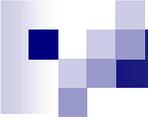


График зависимости реакции в элементе GAP от зазора

В расчетной схеме опорные участки задаются элементами GAP, у которых зазор равен нулю, жесткость на сжатие равна значению для бетона, а на растяжение – малому значению, на несколько порядков меньшему.

Для моделирования виброизоляторов применяется элемент GAP с одинаковыми значениями жесткости на растяжение и сжатие, равными жесткости конкретного виброизолятора.





Описание элемента, моделирующего последовательное сжатие

Элемент представляет собой пружину со ступенчато изменяющейся жесткостью.

На начальном участке деформирования (см. рисунок) до величины Initial Gap (Начальный зазор – нулевой положительный или отрицательный) Δ_0 жесткость имеет значение, заданное в поле Tension Stiffness (Жесткость на растяжение) C_t , а после выбора зазора Initial Gap становится равной приведенной в поле Compression Stiffness (Жесткость на сжатие) C_c .

Характеристика элемента – зависимость сжимающего усилия F_x в нем от величины сжатия $U = U_A - U_B$ (U_A, U_B – смещения узлов А и В вдоль оси X) может быть выражена следующим соотношением

$$F_x = F_{pr} + \begin{cases} C_t \cdot (U - \Delta_0) & \text{при } u < \Delta_0 \\ C_c \cdot (U - \Delta_0) & \text{при } u \geq \Delta_0 \end{cases},$$

где F_{pr} - начальное усилие (Preload Force), $F_{pr} > 0$. Свойства элемента не зависят от его длины.



Моделирование процесса монтажа виброизоляторов

Моделируем монтаж виброизоляторов, состоящий из двух этапов:

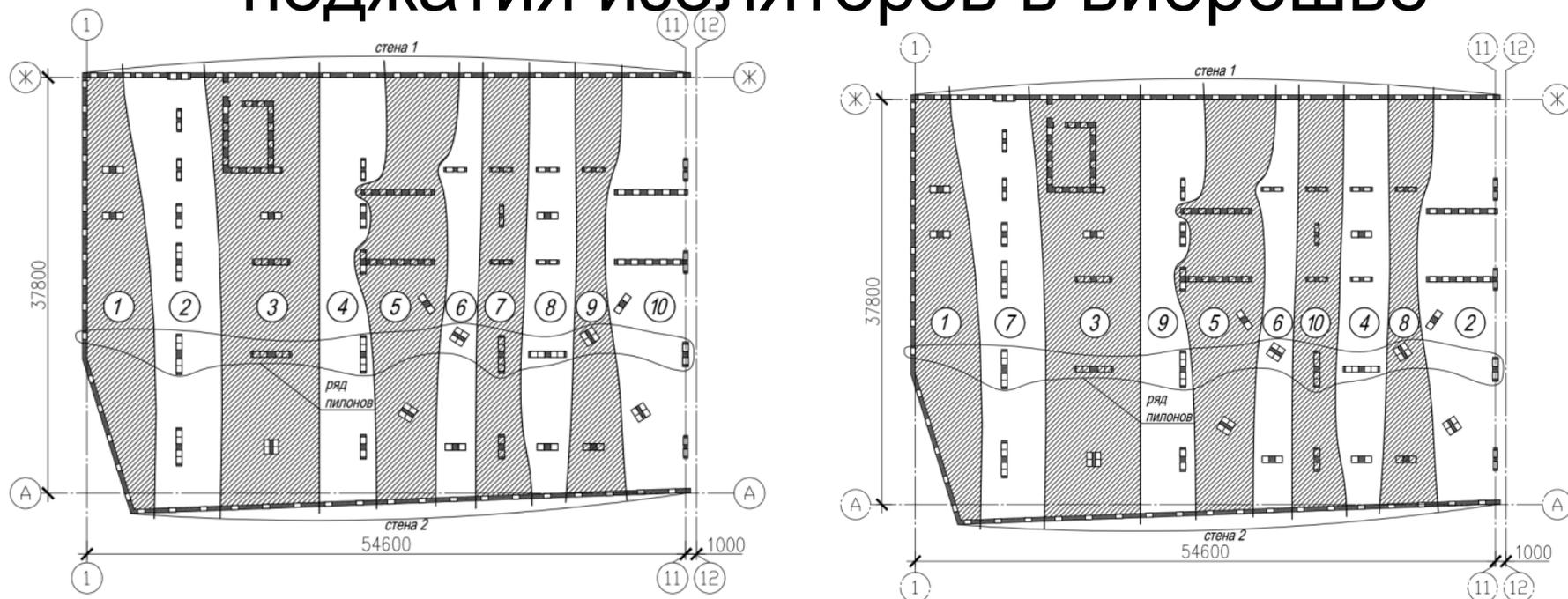
1. Поджатие виброизоляторов на 100% их несущей способности.
2. Поджатие виброизоляторов на 120% несущей способности.

Перед началом монтажа виброизоляторов нагрузка от вышележащей части здания передается на нижележащую через опорные участки стен, пилонов и капителей колонн.

Здание разбивается на секции, монтаж производится по этим секциям путем поджатия виброизоляторов. В программном комплексе это происходит следующим образом: нижним узлам элементов, моделирующим виброизоляторы, задаются перемещения, соответствующие осадке конкретного виброизолятора при использовании 100%, а на следующем этапе монтажа 120% его несущей способности. В ходе выполнения работы будем контролировать

1. перераспределение усилий в элементах конструкций здания (опорных участков)
2. перераспределение усилий в элементах, моделирующих виброизоляторы
3. перемещения элементов конструкций

Моделирование последовательного поджатия изоляторов в виброшве



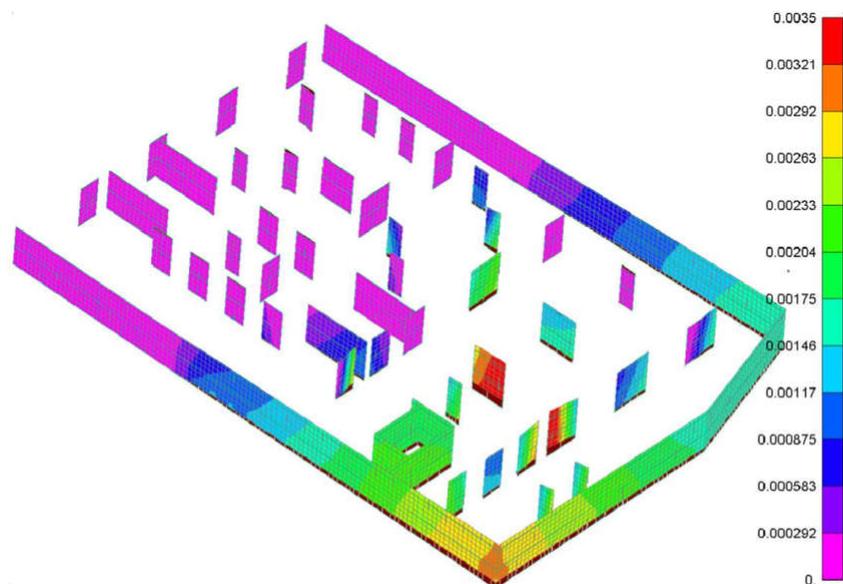
Эти параметры будем отмечать для следующих конструкций: ряд «стена 1», ряд «стена 2» и ряд пилонов, указанных на рисунках. Моделирование монтажа произведено для двух вариантов последовательностей.

Первый – это вариант последовательного от первой крайней секции к следующей, расположенной рядом с первой, и так далее до конечной. Второй вариант более равномерной последовательности, когда монтаж идет с обоих концов здания к центру с пропуском ближних секций, а затем пропущенные секции монтируются в таком же направлении от краев к центру.

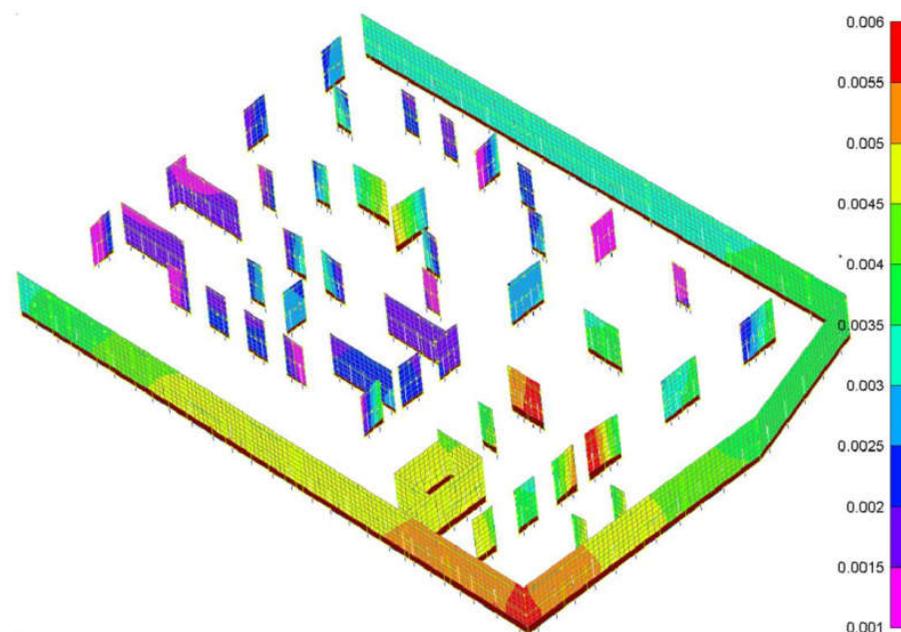
Поджатие виброизоляторов на 100% и 120 %

На слайде приводится перераспределение перемещений в элементах расчетной схемы при различных этапах нагружения отдельных захваток здания

*Поджатие виброизоляторов на 100%
(Секция 6)*



*Поджатие виброизоляторов на 120%
(Секция 3)*

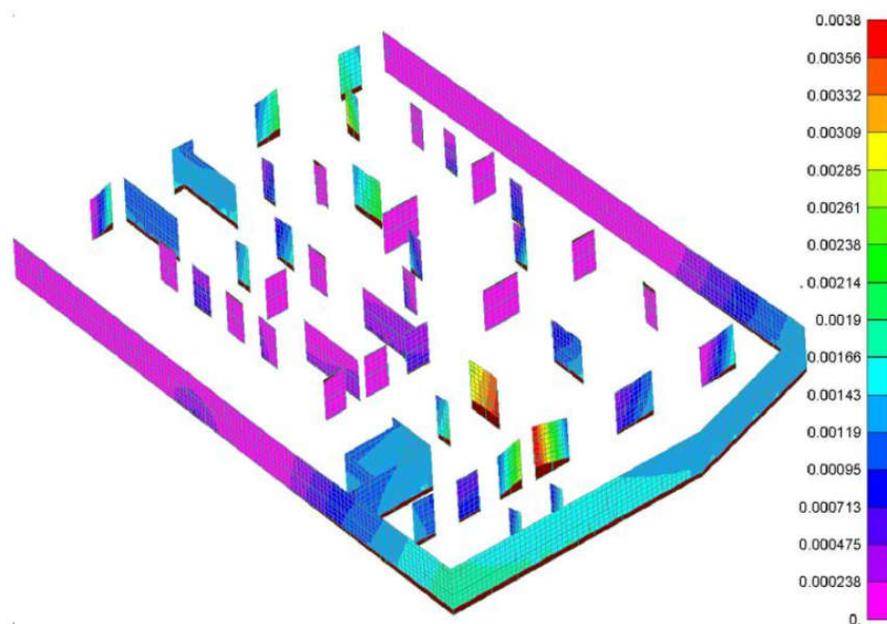


Характерные изополя перемещений для варианта монтажа №1

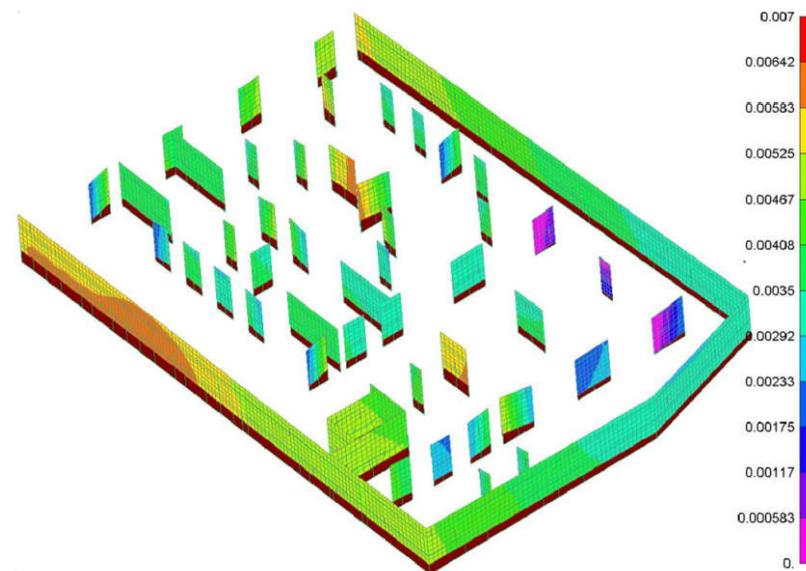
Поджатие виброизоляторов на 100 и 120%

На слайде приводится перераспределение перемещений в элементах расчетной схемы при различных этапах нагружения отдельных захваток здания
меню схема

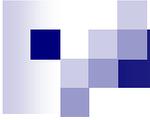
Поджатие виброизоляторов на 100%
(Секция 7)



Поджатие виброизоляторов на 120%
(Секция 6)



Характерные изополя перемещений для варианта монтажа №2



Анализ полученных результатов моделирования последовательного поджатия виброизоляторов

Проанализировав результаты расчета, можно увидеть, что при первой последовательности возникают значительные перегрузки на опорных участках в секциях, наиболее удаленных от начальной (17-50%). Это может приводить к негативным последствиям: от затруднений монтажа, вызванными таким «зажиманием» конструкций, до повреждения конструкций. Наблюдается перегрузка в виброизоляторах в процессе монтажа на границе «поднятой» и еще не смонтированной секций от 5% до 24% по сравнению с рабочими значениями усилий. Также происходит «задирание» начальной секции относительно конечной, что способствует «перетеканию» веса здания в еще не смонтированные секции.

При втором варианте практически исключается возможность перегрузки опорных участков (в рассматриваемом примере максимальное значение перегрузки 2,9%). Также здание поднимается более равномерно, уменьшаются возможность перекосов, которые также могут осложнять монтаж. При этом в процессе монтажа по этой схеме происходит незначительное увеличение усилий в виброизоляторах (6-7%) по сравнению с монтажными усилиями по первой схеме монтажа, но средние значения перегрузок увеличиваются всего на 1,3-1,4%. Очевидно, что второй вариант последовательности значительно лучше первого в плане воздействия на конструкции здания. На опорных участках усилия в процессе монтажа практически не увеличиваются, а виброизоляторы хоть и перегружаются сильнее (так как усилия распределяются только между виброизоляторами, нагрузка на опорные участки в процессе монтажа только уменьшается – здание как бы вывешивается на виброизоляторы), но эти незначительные перегрузки компенсируются отсутствием увеличения усилий на опорных участках и равномерностью подъема. Такой способ подъема здания хоть и обладает большей трудоемкостью, чем первый вариант, но описанные выше преимущества делают его более выгодным.

При монтаже для исключения негативных явлений (описанных выше) необходимо придерживаться оптимальной последовательности монтажа, которая заключается в максимально возможной равномерности поднятия здания.



Литература

1. Карпиловский В.С., Крискунов Э.З., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А., Трофимчук А.Н. SCAD для пользователя. – Киев.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
2. Семенов А.,А., Габитов А.И. Проектно-вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе. Часть 1. Статический расчет : Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2005. 152 с.
3. Шапошников Н.Н., Кристалинский Р.Е., Дарков А.В. Строительная механика. М.2012. - 703 с. Доступ из ЭБС «Лань».
4. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Электронный ресурс]/ Перельмутер А.В., Сливкер В.И.— Электрон. текстовые данные.— М.: ДМК Пресс, 2009.— 456 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/7880>.— ЭБС «IPRbooks».
5. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD.: [учеб.пособие по направлению 653500 «Стр-во» /В.С. Карпиловский и др.] М.: Изд-во Ассоц. Строит. Вузов, 2008