УДК 624.04:519.62

DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-118-124

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Моделирование работы демпфирующих устройств при расчете сейсмической реакции конструкций здания аэровокзала

Симбиркин Валерий Николаевич[1], Панасенко Юрий Вячеславович[1], Курнавин Виктор Владимирович[1]
[1]ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО «НИЦ «Строительство».
Москва, Российская Федерация

Аннотация: Приведен анализ эффективности использования демпфирующих устройств для повышения расчетной сейсмостойкости проектируемого здания одного из аэровокзалов. Применение системы сейсмической защиты в данном случае было единственным способом реализации в проекте архитектурных и объемно-планировочных решений здания на площадке сейсмичностью более 8 баллов. Рассмотрены модели жидкостно-вязкостных демпферов, реактивное усилие в которых нелинейно зависит от скорости перемещения штока, линейно-вязкостных демпферов и упругопластических элементов. Рассмотренные в статье методики реализованы в программном комплексе STARK ES и доступны для практического использования при проектировании и исследовании работы строительных конструкций.

Ключевые слова: динамический расчет, метод конечных элементов (МКЭ), сейсмостойкость, жидкостно-вязкостный демпфер

Для цитирования: Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В. Моделирование работы демпфирующих устройств при расчете сейсмической реакции конструкций здания аэровокзала // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.* 2022. № 2. С. 118-124.
DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-118-124

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

Modelling of damping devices in the seismic analysis of an airport terminal structures

V.N. Simbirkin[1], Yu.V. Panasenko[1], V.V. Kurnavin[1]
[1]TSNIISK named after V.A. Kucherenko, JSC RCC. Moscow, Russian Federation

Abstract: An analysis of the efficiency of using damping devices to increase the design seismic resistance of the projected building of one of the airport terminals is presented. In this case, an anti-seismic system use is the only way to implement architectural and space-planning solutions on a site with a more than 8th seismic intensity level in the design project. Models of hydraulic viscous dampers in which the reactive force depends non-linearly on the velocity of movement of the rod, linear viscous dampers and elastic-perfectly plastic elements are considered.

@ Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В., 2022

The methods considered in the paper are implemented in the STARK ES software and are available for a practical use in structural design and research.

Keywords: dynamic analysis, finite element method (FEM), seismic resistance, hydraulic viscous damper

For citation: Simbirkin V.N., Panasenko Yu.V., Kurnavin V.V. Modelling of damping devices in the seismic analysis of an airport terminal structures *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety.* 2022, no. 2, pp. 118-124 (In Russian).
DOI: **10.37153/2618-9283-2022-2-118-124**

Здание аэровокзала представляет собой круглое в плане здание с внутренним двором, расположенным со смещением относительно центра здания. Здание имеет переменную этажность – 2 и 3 этажа. Размеры внешнего диаметра здания в плане – около 173 м, диаметр внутреннего двора – 88 м. Покрытие здания имеет уклон, высота самой верхней точки кровли составляет 29 м. Деление здания на антисейсмические блоки не предусмотрено.

Жёсткость, геометрическая неизменяемость и устойчивость каркаса здания обеспечивается жёсткостью многопролётных рам, образованных жёстким сопряжением стальных колонн с фундаментами и стальными балками, объединенными дисками монолитных железобетонных плит перекрытий и покрытия по профилированному настилу, а также вертикальными связями жесткости. Фундамент принят плитным на искусственном основании.

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» выполнен проверочный расчет несущих строительных конструкций здания с использованием российского программного комплекса STARK ES (разработчик – ООО «ЕВРОСОФТ, Москва). Общий вид расчетной модели здания показан на рисунке 1.

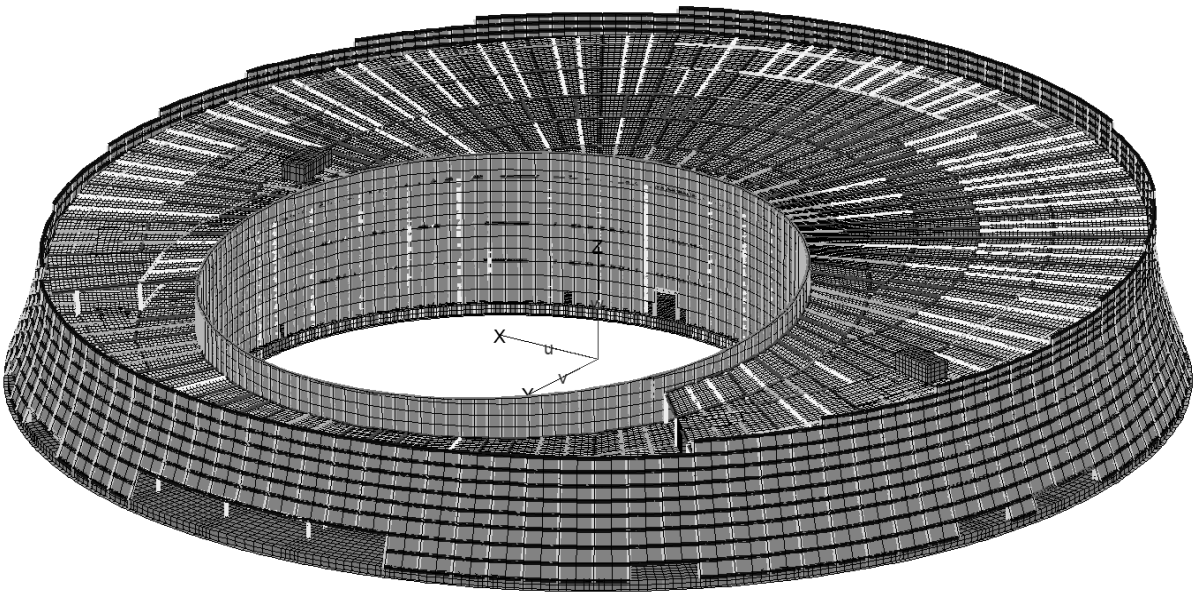

Рисунок 1 – Общий вид конечно-элементной модели здания

Figure 1 – General view of the finite element model of the building

Проверочный расчет конструкций здания при сейсмических воздействиях выполнен во временной области с использованием нескольких наборов акселерограмм. Расчетные акселерограммы были синтезированы по результатам сейсмического микрорайонирования и подготовлены при помощи программы «Одиссей» (разработчик – ООО «ЕВРОСОФТ, Москва).

Методика выполнения динамического расчета, реализованная в программном комплексе STARK ES, описана в статьях [1, 2]. Решение поставленной задачи было получено с использованием метода разложения динамической реакции конструкции по формам ее собственных колебаний. При этом был учтен вклад в динамическую реакцию отброшенных и ненайденных высших форм собственных колебаний по методике [3].

Во второй строке таблицы 1 приведены результаты линейно-упругого динамического расчета модели здания. Расчет без учета неупругой работы демпфирующих устройств показал существенный недостаток несущей способности большого числа элементов конструкции.

Таблица 1 – Результаты динамического расчета модели здания

Table 1 – Results of dynamic calculation of the building model

Модель демпферов	Амплитуда перемещения, мм	Число колонн с недостаточной несущей способностью	Наибольший коэффициент использования прочности колонн
Линейно-упругая	611	235	2.7
Нелинейно-вязкостная	208 (-66%)	0 (-100%)	0.9 (-67%)
Линейно-вязкостная	332 (-46%)	9 (-96%)	1.2 (-56%)
Упругопластическая	514 (-16%)	147 (-37%)	2.0 (-26%)

В качестве мероприятия, повышающего сейсмостойкость сооружения, а также компенсирующего отступления его архитектурной формы от указаний действующих норм, была предусмотрена установка в вертикальных связях жесткости демпфирующих устройств по схеме, показанной на рисунке 2.

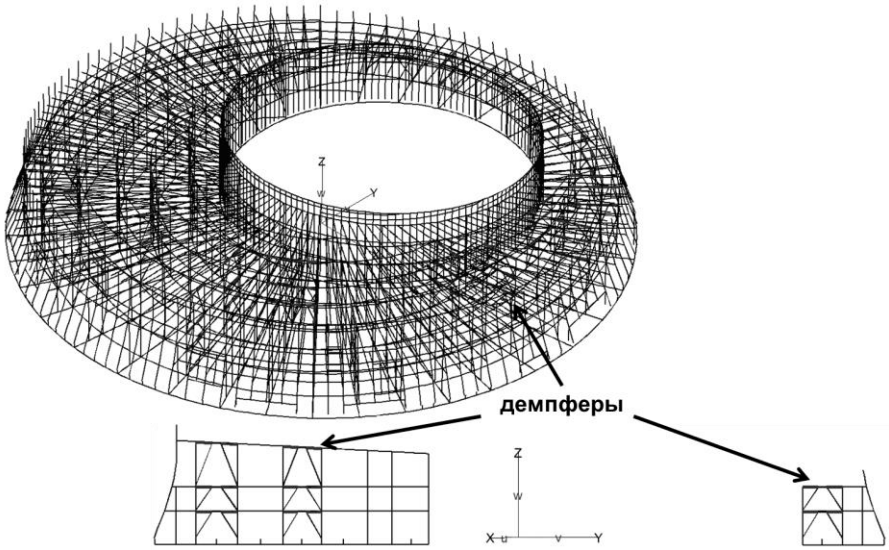

Рисунок 2 – Схема установки демпфирующих устройств

Figure 2 – Installation diagram of damping devices

При решении задачи были рассмотрены разные варианты демпфирующих устройств: нелинейно-вязкостные демпферы, реактивное усилие в которых нелинейно зависит от скорости перемещения штока, линейно-вязкостные демпферы и упругопластические элементы.

Графическая иллюстрация работы демпферов трех рассматриваемых типов в виде зависимости реакции F_d от хода штока x за один цикл гармонических колебаний представлена на рисунке 3.

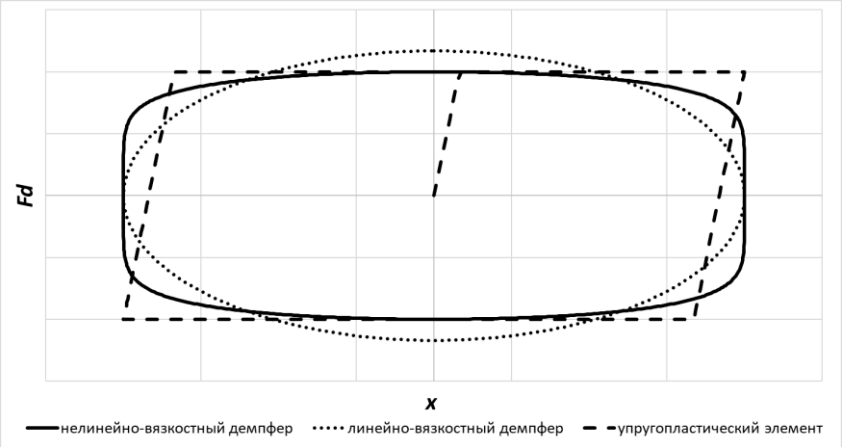

Рисунок 3 – Диаграммы работы демпферов при гармоническом колебании

Figure 3 – Diagrams of the operation of dampers with harmonic oscillation

Реактивное усилие, развиваемое в жидкостно-вязкостных демпферах, нелинейно зависит от скорости перемещения штока и выражается формулой [4]:

$$F_{d,nl}(t) = -C|V(t)|^{\alpha}\text{знак}(V(t)), \tag{1}$$

где: C – коэффициент демпфирования;
α – степенной показатель демпфера;
$V(t)$ – скорость перемещения штока демпфера в момент времени t.

Путем итерационных расчетов были подобраны жидкостно-вязкостные демпферы с максимальным усилием $F_{d,max}$ =2000 кН, C= 2285 кН(с/м)$^{\alpha}$, α =0.3 и наибольшим ходом штока x_{max}=100 мм.

Энергия, поглощаемая в демпфере, составляет:

$$W = |\int F_{d,nl}dx|. \tag{2}$$

Учитывая, что $dx = V(t)dt$, подставив (1) в (2), для одного цикла колебаний с периодом T получим:

$$W = \int_0^T |F_{d,nl}V(t)|dt = C\int_0^T |V(t)|^{\alpha+1}dt. \tag{3}$$

Скорость перемещения штока при гармонических колебаниях равна

$$V(t) = x_{max}\cdot\frac{d}{dt}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi\right) = x_{max}\frac{2\pi}{T}\cos\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi\right). \tag{4}$$

Подставив (4) в (3) и выполнив упрощения, получим:

$$W = C[x_{max}\frac{2\pi}{T}]^{\alpha+1}\int_0^T\left|\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\right|^{\alpha+1}dt. \quad (5)$$

Значение W, вычисленное по формуле (5) при принятых характеристиках демпфера и периоде колебаний T=0.98 с, равном основному периоду собственных колебаний конструкции, составляет 735 кДж.

Как следует из данных таблицы 1, применение жидкостно-вязкостных демпферов оказалось эффективным – перемещения и напряжения в конструкциях здания уменьшились в среднем в 3 раза и не превысили допустимых значений.

Следующий вариант моделирования демпферов, рассмотренный в работе – линейно-вязкостные элементы, реактивное усилие в которых определяется по формуле:

$$F_{d,l}(t) = -C_l \cdot V(t).$$

Характеристику C_l демпфера этого типа можно определить таким образом, чтобы энергия, поглощенная в нем, была равна энергии, поглощенной в нелинейном демпфере (5), за один и тот же период колебаний.

Энергию, поглощенную в линейном демпфере за один цикл гармонических колебаний, определим, приняв α = 1.0 в формуле (5):

$$W_l = C_l[x_{max}\frac{2\pi}{T}]^2\int_0^T\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)^2dt. \quad (6)$$

Значение интеграла в формуле (6) можно определить аналитически. В результате получим:

$$W_l = 2\frac{C_l}{T}(\pi \cdot x_{max})^2. \quad (7)$$

Приравняв правую часть уравнения (7) значению W, получим формулу для определения коэффициента демпфирования C_l:

$$C_l = W\frac{T}{2(\pi \cdot x_{max})^2}. \quad (8)$$

Подставив в (8) полученные ранее значения, получаем C_l =3649 кН·с/м.

Сейсмическая реакция модели здания с линейно-вязкостными элементами (см. четвертую строку таблицы 1) оказалась несколько выше, чем по предыдущему варианту. Прочность небольшого числа колонн каркаса оказалась незначительно превышена. Очевидно, что режим работы демпферов в конструкции при реальном сейсмическом воздействии значительно отличается от гармонических колебаний, при которых была определена характеристика C_l.

В качестве третьего варианта рассмотрим моделирование демпферов с помощью упругопластических элементов. Предельное усилие в таких элементах, как и ранее, примем равным $F_{d,max}$=2000 кН.

Упругопластический элемент за один цикл гармонических колебаний поглощает энергию, равную

$$W_{ep} = 4F_{d,max}(x_{max} - \frac{F_{d,max}}{k}), \quad (9)$$

где k – жесткость упругопластического элемента в упругой стадии его работы.

Значение жесткости k назначим также из условия равенства поглощенной энергии в упругопластическом и вязкостном демпферах:

$$k = \frac{F_{d,max}}{x_{max} - \frac{W}{4F_{d,max}}} = \frac{2000}{0.1 - \frac{735}{4 \cdot 2000}} = 246154 \text{ кН/м.} \quad (10)$$

Как можно видеть (см. пятую строку таблицы 1), данный способ моделирования демпферов в этих условиях оказался неприемлемым. Причина состоит в том, что из-за радиально-тангенциального расположения связей жесткости лишь немногие из демпферов работают в пластической стадии и, соответственно, демпфируют колебания одновременно. Упругопластический элемент показывает нелинейные свойства и поглощает энергию колебаний только при больших деформациях, тогда как вязкостные демпферы эффективно гасят колебания любого уровня. Это хорошо видно из графиков, приведенных на рисунке 4.

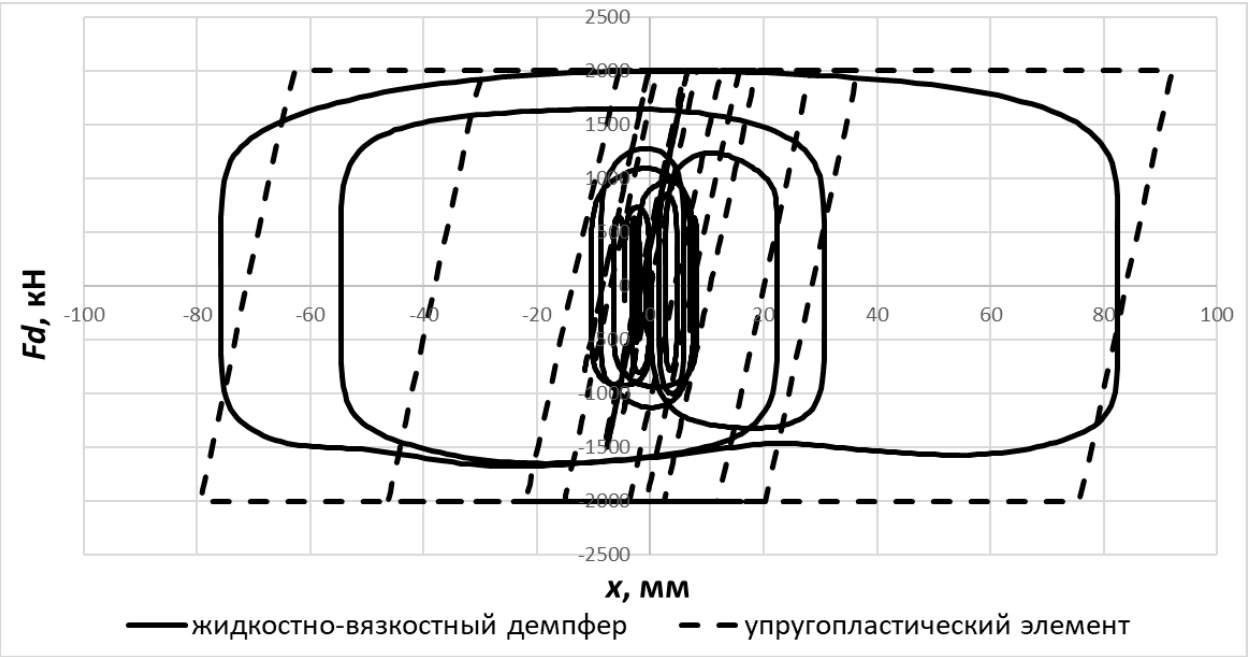

Рисунок 4 – Диаграммы работы вязкостных и упругопластических демпферов при сейсмическом воздействии

Figure 4 – Diagrams of the operation of viscous and elastoplastic dampers under seismic action

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Устройство антисейсмической защиты сооружения путем применения жидкостно-вязкостных демпферов позволило реализовать в проекте сложную, не отвечающую требованиям норм, архитектурную форму сооружения на площадке с высокой расчетной сейсмичностью.
2. Наиболее эффективным оказалось применение нелинейно-вязкостных демпферов. Этот способ сейсмозащиты позволил снизить максимальную сейсмическую реакцию сооружения примерно в 3 раза.
3. Нелинейно-вязкостные демпферы при расчете возможно упрощенно моделировать эквивалентными линейно-вязкостными демпферами, обеспечивая при этом некоторый запас несущей способности конструкций.

Список литературы

1. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Упрощенный нелинейный динамический расчет сооружений при сейсмических воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 5 (274). С. 32-36.
2. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Учет указаний СП 14.13330.2018 при реализации расчета сооружений на сейсмические воздействия в программном комплексе STARK ES // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 2 (21). С. 103-113.
3. Филимонов А.В. Учет ненайденных форм собственных колебаний при расчете реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 2. С. 46-53.
4. ГОСТР 57364-2016 / EN 15129:2010. Устройства антисейсмические. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017.

References

1. Simbirkin V.N., Panasenko Yu.V. Uproshchennyy nelineynyy dinamicheskiy raschet sooruzheniy pri seysmicheskikh vozdeystviyakh. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2017, no. 5 (274), pp. 32-36. (In Russian)
2. Simbirkin V.N., Panasenko Yu.V. Uchet ukazaniy SP 14.13330.2018 pri realizatsii rascheta sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya v programmnom komplekse STARK ES. Vestnik NITs «Stroitel'stvo». 2019, no. 2 (21), pp. 103-113. (In Russian)
3. Filimonov A.V. Uchet nenaydennykh form sobstvennykh kolebaniy pri raschete reaktsii zdaniy i sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2014, no. 2, pp. 46-53. (In Russian)
4. GOSTR 57364-2016 / EN 15129:2010. Ustroystva antiseysmicheskie. Pravila proektirovaniya. M.: Standartinform, 2017. (In Russian)

Сведения об авторах / Information about authors

Симбиркин Валерий Николаевич, к.т.н, зав. сектором ЛАИПС,
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация
e-mail: simbirkin@eurosoft.ru
Valery N. Simbirkin , Ph.D. (Engineering), head of the sector of LAIPS of TSNIISK named after V.A.Kucherenko of JSC RCC. Moscow, Russian Federation
e-mail: simbirkin@eurosoft.ru

Панасенко Юрий Вячеславович, руководитель группы ЛАИПС,
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация
e-mail: panyuriy@eurosoft.ru
Yuriy V. Panasenko, head of the group of LAIPS of TSNIISK named after V.A.Kucherenko of JSC RCC. Moscow, Russian Federation e-mail: panyuriy@eurosoft.ru

Курнавин Виктор Владимирович, заместитель заведующего ЛАИПС, ЦНИИСК
им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация
e-mail: kv@eurosoft.ru
Victor V. Kurnavin, deputy head of LAIPS of TSNIISK named after V.A.Kucherenko of JSC RCC. Moscow, Russian Federation
e-mail: kv@eurosoft.ru