

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE



УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-180-188

Оригинальная статья /Original article

**Оптимизация параметров сейсмоизоляции каркасных зданий
с применением адаптивных методов**

Х.Р. Зайнулабидова

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Цель работы – расчёт каркасных зданий с гибкими связями и с гибкими и выключающимися связями, составление рекомендаций применения способов сейсмоизоляции в зависимости от характеристик сейсмических событий. **Метод.** Разработка алгоритма расчёта каркасных зданий рамной конструктивной системы с сейсмозащитой в зданиях с гибкими связями и с гибкими и выключающимися связями. **Результат.** Разработана методика расчёта каркасных зданий рамной конструктивной системы с сейсмоизоляцией в виде гибких связей и гибких и выключающихся связей. Составлена программа расчёта на ЭВМ сейсмоизолированных и не сейсмоизолированных каркасных зданий в среде программирования «Дельфи 5.0» на языке «Object Pascal» с использованием численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения дифференциальных уравнений. **Вывод.** Определено, что строительство каркасных зданий с рассмотренными в данной работе методами сейсмоизоляции, а именно с гибкими связями; с гибкими связями и выключающимися связями для территорий, где возможны длиннопериодные колебания не целесообразно, в связи с тем, что возникают чрезмерно высокие деформации.

Ключевые слова: каркасные здания, рама, гибкие связи, выключающиеся связи, периоды колебаний, сейсмические воздействия

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова. Оптимизация параметров сейсмоизоляции каркасных зданий с применением адаптивных методов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):180-188. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-180-188

Optimization of seismic insulation parameters of frame buildings using adaptive methods
H.R. Zainulabidova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala, 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to calculate frame buildings with flexible connections and with flexible and switch-off connections, to make recommendations for the use of seismic insulation methods depending on the characteristics of seismic events. **Method.** Development of an algorithm for calculating frame buildings of a frame structural system with seismic protection in buildings with flexible connections and with flexible and switchable connections. **Result.** A method for calculating frame buildings of a frame structural system with seismic insulation in the form of flexible connections and flexible and switchable connections has been developed. A computer calculation program for seismically insulated and non-seismically insulated frame buildings in the Delphi 5.0 programming environment in the Object Pascal language using the Runge-Kutta numerical method of the 4th order for solving differential equations has been compiled. **Conclusion.** It is determined that the construction of frame buildings with the seismic insulation methods considered in this paper, namely with flexible connections and with flexible connections and disconnecting connections, is not impractical for territories where long-period fluctuations are possible, due to the fact that excessively high deformations occur

Keywords: frame buildings, frame, flexible connections, disconnecting connections, periods of oscillation, seismic effects

For citation: H.R. Zainulabidova. Optimization of seismic insulation parameters of frame buildings using adaptive methods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):180-188. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-180-188

Введение. Последствия землетрясений происшедших в 2023 и в 2024 годах в Турции [1], в Японии [2], в Марокко [3] в Афганистане [4] и в других районах мира, показывают, что несмотря на развитие методов сейсмоизоляции, здания всё-таки повреждаются и рушатся, что представлять серьёзную угрозу жизни людей. Хотя перечисленные районы давно известны как сейсмоопасные и, следовательно, здания здесь строились с учётом сейсмической опасности. Почему здания разрушились, унося собой жизни многих людей, в чём причина катастрофических последствий? Это вопросы, над которыми учёным всего мира предстоит ещё работать. К сожалению, надо признать, что землетрясения не повторяют прошлого и не повторяются в таком же виде в будущем.

Землетрясения, это случайные события и лучшую математическую модель сейсмических воздействий даёт теория случайных функций. Понятно только одно, что чем мощнее землетрясение, тем сильнее толчки. Изучив землетрясения прошлого (статистику, параметры колебаний, механизм) можно оценить сейсмическую опасность. Оказалось, что существенное влияние на интенсивность воздействия оказывают геологические условия территорий, в том числе литологический состав грунта, гидрогеологические условия и другие параметры, касающиеся грунтовых условий [5, 6]. Например, при Карпатском землетрясении 4 марта 1977 года [7] здания, стоявшие на пологих склонах, состоящие из скальных пород, прикрытых рыхлыми грунтами разламывались, то есть произошли неравномерные осадки грунта, что и привело к таким последствиям.

При сильных землетрясениях здания могут раскачиваться так сильно, что происходят разрушения связей между конструкциями. Наиболее опасным случаем для зданий при землетрясениях является эффект резонанса (совпадение периодов собственных колебаний зданий с преобладающим периодом колебания грунта), который значительно увеличивает амплитуду колебания здания, что приводит к значительным деформациям и даже к разрушению. Для предупреждения явления резонанса, а также осуществления полноценной оценки и корректного учета действующих на здания нагрузок, при расчёте сейсмостойкости необходимо учитывать динамические характеристики зданий при возможных сейсмических воздействиях, в том числе частоты и формы собственных колебаний, позволяющие осуществить резонансный анализ и сопоставить параметры собственных колебаний с рабочим диапазоном колебаний внешних воздействий. Соответственно при выборе метода сейсмозащиты необходимо учитывать наиболее вероятностные для района строительства количественные параметры колебания грунта и динамические характеристики здания.

В настоящее время существует более сотни запатентованных способов сейсмозащиты зданий. Среди них можно отметить сейсмоизолирующий скользящий пояс [8], кинематические фундаменты [9], выключающиеся связи [10], резинометаллические опоры [11] и др. Но вместе с тем, в нашей стране активнее всего применяют, так называемую, традиционную систему сейсмоизоляции, заключающуюся в увеличении пространственной жесткости зданий за счёт увеличения армирования, площадей поперечных сечений конструкций и т.д.

Надо отметить, что, используя такой метод сейсмостойкость можно увеличить, но не всегда такой метод экономически оправдан, так как при этом увеличивается масса конструкций и здания в целом, а это в свою очередь приводит к увеличению инерционной сейсмической нагрузки. Необходимо активное внедрение новых эффективных методов сейсмозащиты, методов, способствующих изменению жесткостей системы в зависимости от ее перемещений и скоростей. Вопрос заключается в том, как выбрать среди стольких методов сейсмоизоляции оптимальный вариант.

Постановка задачи. В данной работе проведены исследования поведения каркасных зданий при сейсмических воздействиях. Для сравнительного анализа рассмотрены здания с несколькими видами сейсмозащиты: с гибкими связями, с гибкими связями и выключающимися связями, с гибкими связями и выключающимися связями и ограничителями колебаний. Исследования российских и зарубежных учёных [12 - 17] показали, что снизить стоимость строительства можно допустив возникновение неупругих деформаций в конструкциях зданий. Но также определено, что такие деформации допустимы только в горизонтальных несущих конструкциях, таких как ригели, диафрагмы жёсткости, связи, но недопустимы в вертикальных несущих конструкциях – колоннах, так как в этом случае возможны разрушения зданий. Оказалось, эффективным решением вводить дополнительные гибкие связи в диафрагмы жёсткости, так как в этом случае происходит активное поглощение сейсмической энергии.

На рис. 1а, 1б и 1в приведены конструктивные схемы и графики реакций на динамические нагрузки рамных систем с элементами сейсмозащиты. Расчётные модели рамных систем зависят от метода сейсмозащиты, так систему с гибкими связями смоделируем упругопластическим осциллятором, а систему с гибкими связями и с выключающимися связями, а также с упругими ограничителями перемещений – нестационарным упругопластическим осциллятором.

Обозначим через K_1 жесткость рамной системы сейсмоизоляции с гибкими связями. Жесткость системы с выключающимися связями в начальном состоянии обозначим через K_n , а жесткость рамной системы при максимально допустимом перемещении – K_2 . На рис. 1 приняты обозначения: Y_p – максимальные перемещения системы, соответствующий выключению связей, Y_T – перемещение, при котором гибкие связи переходят с стадию неустойчивости; Δ – максимальный зазор.

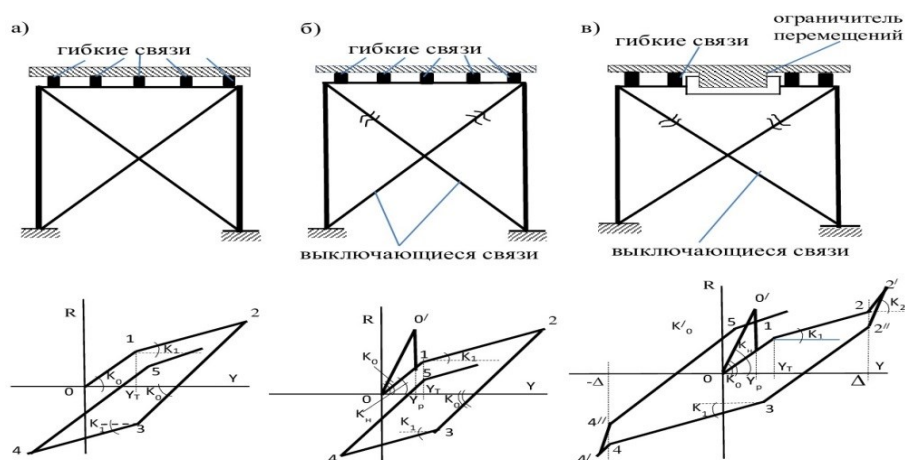


Рис. 1. Конструктивные схемы и соответствующие им графики реакции систем: а) с гибкими связями, б) с гибкими связями и с выключающимися связями, в) с гибкими связями с ограничителем перемещений и с выключающимися связями

Fig. 1. Design diagrams and corresponding graphs of the reaction of the systems: a) with flexible connections, b) with flexible connections and with switchable connections, c) with flexible connections with a displacement limiter and with switchable connections

Коэффициент потери жесткости рамной системой при переходе из гибкой стадии в пластическую $\beta = \frac{K_1}{K_0} \leq 1$. Если $\beta=1$, то рамная система сохраняет гибкую стадию работы. Перемещение Y_T можно определить через максимальные перемещения гибкой рамной системы с жесткостью K_0 , $Y_T = \gamma \cdot Y_Y^{max}$, где γ – коэффициент ($0 < \gamma < 1$), а Y_Y^{max} – максимальное перемещение системы в состоянии гибкой работы пластических элементов.

Методы исследования. Составим алгоритм расчёта исследуемых рамных систем. Рассмотрим график «Y-R», соответствующий рамной системе с выключающимися в начале связями, гибкими элементами и упругими ограничителями перемещений, установлен-

ные с зазором Δ (рис.1в). Меняя параметры характеристик системы K_0 , γ , β , Δ данного графика можно перейти к графикам с разными вариантами сейсмозащиты.

При $\Delta \approx \infty$ получим график, соответствующей рамной системе с выключающимися и гибкими связями. Если принять $Y_p=0$ и $\Delta \approx \infty$, то получим график, соответствующий системе с гибкими связями. При $Y_p=0$, $Y_Y^{max} < \Delta < Y_{Y-n}^{max}$, получим график, определяющий колебания рамной системы ограничителями перемещений. Здесь Y_{Y-n}^{max} – максимальное перемещение рамной системы в уровне верха стоек. Если принять $\beta=1$, то можно определить параметры рамных систем с жёсткими связями между элементами.

Рассмотрим каждый этап движения системы, показанный на рис.1а, 1б и 1в отдельно как участок движения и составим уравнения колебания для каждого участка.

Участок 0-0¹ графика на рис. 1а и 1б соответствует стадии работы до отключения связей. Рама в этом состоянии работает податливо, так как $Y_p < Y_t$, то дифференциальное уравнение колебаний можно записать в виде:

$$\ddot{Y}_0 + \frac{2\pi}{T_n} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_0 + \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 \cdot Y_0 = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (1)$$

Где: $\ddot{Y}_i$, $\dot{Y}_i$, Y_i ($i=0, 1, 2, \dots$) – ускорение, скорость и перемещение соответственно;
 T_n – период колебаний рамы в начальный период с выключающимися элементами;
 α – коэффициент затухания рамы.

В момент времени t_p , когда перемещение $|Y_0|$ достигает максимального значения Y_p , связи выключаються, снижается жесткость и рама переходит на участок 0-1 графика, сохраняя при этом начальные условия.

Уравнение колебания рамы на участке 0-1 имеет вид

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_1 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot Y_1 = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (2)$$

где T – период колебаний рамы в состоянии гибкой работы податливых элементов.
 $T = 2 \cdot \frac{\pi}{\omega}$, $\omega = \sqrt{K_0/m}$

В момент времени t_1 перемещение Y_1 достигает Y_Y^{max} , рама получает новую жесткость и переходит на участок 1-2. При этом состояние рамы можно описать дифференциальным уравнением:

$$\ddot{Y}_2 + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{\beta \cdot \alpha} \cdot \dot{Y}_2 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot Y_2 = \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \beta [Y_2 - Y_1(t_1)] = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (3)$$

$t \geq 1$

Из участка 1-2 рама переходит на участок 2-2¹, если выполнится условие $Y_2 > \Delta$, или на участок 2-3 (рис.1б), т.е. в стадию разгрузки, если $Y_2 \leq \Delta$ и изменится знак скорости колебания, $\dot{Y}_{2,t} / \dot{Y}_{2,t+1} < 0$.

Если обнаруживается изменения знака скорости в интервале времени $(t+1)-t$, то в программе расчета происходит возврат к времени t и дробление шага, пока разность между новым шагом и предыдущим не будет равна заданной величине.

В стадии разгрузки уравнение движения системы принимает вид

$$\ddot{Y}_3 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_3 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_3 - Y_2(t_2) + \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_2(t_2) - Y_1(t_1)]\} = \ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_2 \quad (4)$$

Где: t_2 – момент времени изменения знака скорости рамы.

При переходе на участок 2-2¹ система получает новую жесткость, и уравнение движения принимает вид

$$\ddot{Y}_{2^1} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q} \cdot \dot{Y}_{2^1} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] + Q \cdot [Y_{2^1} - \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (5)$$

Где $\Theta = K_2/K_0$, где K_2 – жесткость рамы в состоянии упора об ограничитель перемещений на рассматриваемом участке, $K_2=K_1+K_{ог}$, где $K_{ог}$ жесткость ограничителя перемещений.

Из участка 2-2^I в момент времени $t_2^I > t_2$, соответствующий изменению знака скорости $\dot{Y}_{2^I}$, рама переходит в стадию разгрузки (участок 2^I-2^{II}), которую можно описать дифференциальным уравнением колебаний:

$$\ddot{Y}_1^{11} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q + (1 - \beta)} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_2^{11} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] + [Q + (1 - \beta) \cdot [Y_{2^{11}} - Y_{2^I}(t_{2^I})] + Q \cdot [Y_{2^I}(t_{2^I}) - \Delta]]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_{2^I} \quad (6)$$

Когда перемещение $Y_{2^{11}}$ становится равным Δ , то исследуемая система переходит на участок разгрузки 2^{II}-3

$$\ddot{Y}_3 + \frac{2\pi}{T} \cdot \dot{Y}_3 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] - [Y_{2^I}(t_{2^I}) - \Delta] \cdot (1 - \beta)\} = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (7)$$

Переход рамной системы в состояние обратное состояние податливости (участок 3-4) произойдет, когда перемещение Y_3 достигнет величины:

$$Y_3 = \Delta - 2\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot (\Delta - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max}) + [Y_{2^I}(t_{2^I}) - \Delta] \cdot (1 - \beta) \quad (8)$$

Если происходит разгрузка без упора об ограничитель помещений ($Y_2 \leq \Delta$), то будет переход на участок 3-4, если выполняются условия

$$Y_3 = Y_2(t_2) - 2\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot (Y_2(t_2) - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max}) \quad (9)$$

Обозначим момент времени выполнения условия (8) или (9) через t_3 .

Уравнение движения системы при условном «усилении» в направлении 3-4 имеет вид

$$\ddot{Y}_4 + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_4 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_4 - Y_3(t_3)]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_3 \quad (10)$$

Если при этом перемещение рамной системы не превысит зазора до ограничителя $|Y_4| \leq \Delta$ и скорость изменит знак $\frac{\dot{Y}_{4,t}}{\dot{Y}_{4,t+1}} < 0$, то с момента t_4 изменения знака скорости начинается второе нагружение 4-5 (второй цикл), где уравнение движения принимает вид:

$$\ddot{Y}_5 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_5 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_5 - Y_4(t_4) - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_4(t_4) - Y_3(t_3)]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_4 \quad (11)$$

В момент времени $t=t_5$, когда перемещение Y_5 достигает значения

$$Y_5 = Y_4(t_4) + 2 \cdot \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot [Y_4(t_4) - Y_3(t_3)] \quad (12)$$

уравнение (11) преобразуется в уравнение (13).

Если на участке 3-4 рассматриваемой диаграммы перемещение Y_4 превысит зазор до ограничителя, $|Y_4| > \Delta$, то система переходит на участок 4-4^I, описываемый уравнением движения

$$\ddot{Y}_{4^I} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_{4^I} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot (-\Delta - Y_3(t_3) + Q(Y_{4^I} + \Delta))\} = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (13)$$

При этом, в стадию разгрузки рама перейдет в момент времени t_4 , соответствующий изменению знака скорости $\dot{Y}_{4^I}$. Уравнение движения рамы на участке 4^I-4^{II} получим в виде

$$\ddot{Y}_{4^{II}} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q + (1 + \beta)} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_{4^{II}} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta[-\Delta - Y_3(t_3)] + [Q + (1 - \beta) \cdot [Y_{4^{II}} - Y_{4^I}(t_{4^I}) + \Delta]]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_{4^I} \quad (14)$$

Как только перемещение $Y_{4^{II}}$ станет равным $-\Delta$, рамная система перейдет на следующий участок разгрузки 4^{II}-5, дифференциальное уравнение движения для которого имеет вид

$$\ddot{Y}_5 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_5 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_5 + \Delta - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [-\Delta - Y_3(t_3)] - (1 - \beta) \cdot [Y_{4^I}(t_{4^I}) + \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (15)$$

Здесь также, как и в случае колебания системы без упора об ограничитель перемещений, в момент $t=t_5$, когда перемещение Y_5 достигнет значения

$$Y_5 = -\Delta - 2 \cdot \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta[-\Delta - Y_3(t_3)] + (1 - \beta) \cdot [Y_{4^I}(t_{4^I}) + \Delta], \quad \text{уравнение} \quad (15)$$

преобразуется в уравнение (3).

Если принять, что жёсткость системы при сейсмических воздействиях на этапах деформации не меняется, то закономерности деформации системы не зависят от времени t . Тогда перемещение Y_5 переходит в Y_2 , а Y_2 , в Y_3 и т.д. Так, каждый этап перемещения системы будет проходить по закону движения, согласно уравнениям (3) - (7), (10), (11) (13) – (15) вплоть до окончания сейсмического воздействия, заданного в виде функции $\ddot{Y}_{гр}(t)$. Для расчёта исследуемых систем разработана программа расчёта по приведённой выше методике на ЭВМ в среде программирования «Дельфи 5.0» на языке «Object Pascal». При этом, использовался численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка для решения дифференциальных уравнений.

Рассчитывались максимальные ускорения W_Y^{max} и перемещения Y_Y^{max} гибкой рамной системы с периодом собственных колебаний T , а также максимального ускорения W_{Y-n}^{max} , перемещения Y_{Y-n}^{max} и остаточной деформации $Y_{ост}$ гибкой системы без элементов сейсмозащиты и с элементами сейсмозащиты при разных значениях коэффициентов γ и β . А также определялись отношения W_{Y-n}^{max}/W_Y^{max} , Y_{Y-n}^{max}/Y_Y^{max} , число циклов колебаний, число упора системы об ограничитель перемещений, момент времени выключения хрупких элементов t_p и момент времени реализации максимального ускорения системы.

Обсуждение результатов. Известно, что на реакцию системы при сейсмических воздействиях существенно влияет частота колебаний грунтов, колебания могут быть короткопериодными и длиннопериодными. В данной работе изучено влияние этого фактора и получено, что максимальные перемещения рамных систем с гибкими связями при длиннопериодных воздействиях получают недопустимо большие перемещения. Исправить такую ситуацию можно, если включить в систему ограничители колебаний.

В ходе исследования выполнены расчёты рамных систем при сейсмических воздействиях с системами со следующими методами сейсмоизоляции: с гибкими связями; с гибкими и выключающимися связями; с гибкими и выключающимися связями и с ограничителями перемещений, установленных с зазором $\Delta = 1,2 \cdot \gamma \cdot Y_Y^{max}$.

Жёсткость ограничителя перемещений принята равной жёсткости гибкой системы с периодом собственных колебаний $T=0,3$ сек. Расчёты проведены по алгоритму, соответствующему зависимости «Y-R», показанной на рис. 1в, исключив из неё участок $0-0^I$. Некоторые результаты расчёта в виде спектров максимальных ускорений и максимальных перемещений, приведены на рис. 2 и 3.

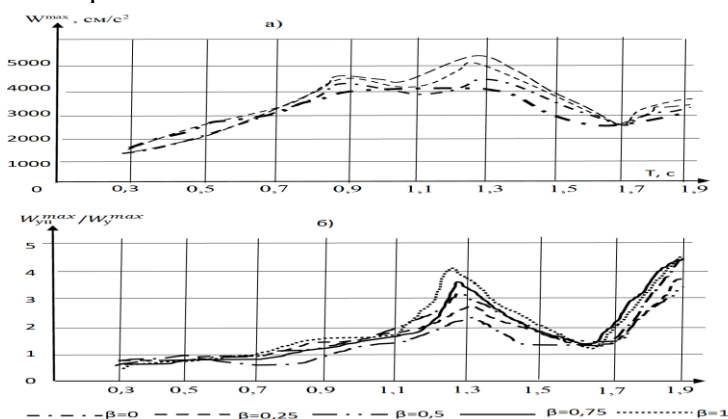


Рис. 2. Спектры максимальных абсолютных ускорений систем с гибкими связями и с ограничителем перемещений (а); графики отношения $\frac{W_{Y-n}^{max}}{W_Y^{max}}$ (б) при преобладающем периоде сейсмического воздействия $T_j=1,2$ сек

Fig. 2. Spectra of maximum absolute accelerations of an elastoplastic system with a displacement limiter (a); graphs of the ratio $\frac{W_{Y-n}^{max}}{W_Y^{max}}$ (b) with a predominant period of seismic action $T_j=1.2$ sec

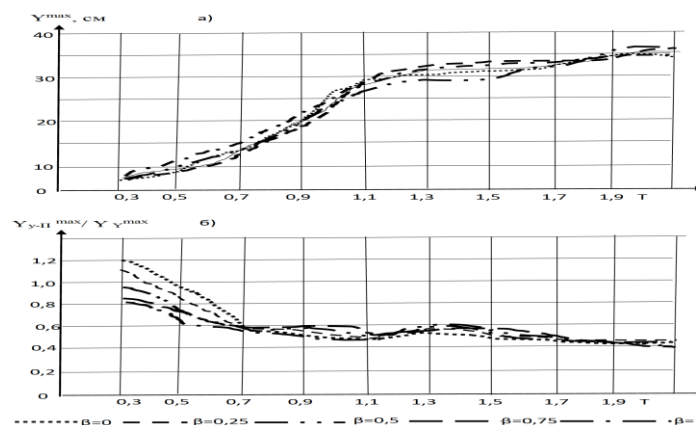


Рис. 3. Спектры максимальных перемещений системы с гибкими связями с ограничителем перемещений (а); графики отношения y_{y-p}^{max}/y_y^{max} (б) при преобладающем периоде сейсмического воздействия $T_j=1,2$ сек

Fig. 3. Spectra of maximum displacements of an elastoplastic system with a displacement limiter (a); graphs of the ratio y_{y-p}^{max}/y_y^{max} (b) with a predominant period of seismic action $T_j=1.2$ sec

Там же приведены графики отношений выше названных максимальных параметров к соответствующим параметрам реакций упругой системы без ограничителей перемещений.

Анализ результатов расчёта показал, что при принятых параметрах ограничителя, максимальные перемещения упругих и упругопластических систем при начальных периодах собственных колебаний $0,5 \text{ сек} \leq T \leq 1,9 \text{ сек}$ снижаются в 1,5-2 раза.

Влияние коэффициента β на максимальные перемещения систем здесь особо не заметно. Только в случае резонансных пиков с уменьшением β перемещения незначительно снижаются.

При периодах $T < 0,6 \text{ сек.}$, максимальные перемещения систем возрастают при уменьшении коэффициента β и уменьшении периодов T и T_j .

При периодах $T=0,5 \text{ сек}$, $T_j \leq 0,9 \text{ сек.}$ и значениях β , равных 0,25 и 0,3 максимальные перемещения с гибкими связями и ограничителями получаются близкими или равными максимальным перемещениям системы с гибкими связями.

Причиной этому является односторонний снос перемещений, характерный для систем с гибкими связями при малых значениях коэффициента β . Здесь, по мере увеличения циклов колебаний, зазор между системой и ограничителем с одной стороны постепенно уменьшается и в один момент, как бы прилипнув друг к другу, они начинают совершать совместные колебания. При этом дальнейший рост сноса перемещений почти приостанавливается.

Ограничители перемещений в системах с гибкими связями снижают максимальные остаточные перемещения при $\beta=0$ в 7-9 раз, а при $\beta=0,5$ и $\gamma=0,25$ – в среднем в 5 раза. Более значительна роль ограничителей колебаний в снижении остаточных перемещений систем с гибкими связями. Например, при периодах $0,6 \text{ сек} \leq T \leq 0,9 \text{ сек}$ максимальные остаточные перемещения систем с коэффициентом $\beta=0$ не превышают 0,5-4 см, тогда как для таких же систем без ограничителей из-за сноса перемещений они достигают в среднем 25 см. Известно, что колебания систем с гибкими связями упором об жёсткие ограничители перемещений вызывают значительное увеличение инерционных сил в конструкциях, представляющих опасность для вышележащих этажей.

Вывод. Исследования показывают, что работа элементов нижнего этажа не приводит к значительному снижению данной опасности, хотя резонансные пики абсолютных ускорений, как видно на рис. 2, снижаются в 1,5-1,8 раза при значениях $\beta \leq 0,5$. Только при периодах $T \leq 0,9 \text{ сек}$ отношение максимального абсолютного ускорения системы с ограничителем перемещений к такому же ускорению упругой системы без ограничителя не превышает 2-х.

Исследования показали, что для каркасных зданий с периодом собственных колебаний $T \geq 0,8 \text{ сек}$ при строительстве в районах с длиннопериодными сейсмическими воз-

действиями рационально введение гибких связей с параметрами $0,25 \leq \gamma \leq 0,5$; $\varphi = 0,75 - \gamma$; $0,2c. \leq T \leq 0,9 c.$

При этих параметрах введение элементов сейсмозащиты в виде ограничителей перемещения нецелесообразно, так как при сейсмических воздействиях удары системы об ограничители вызывают значительное увеличение инерционных сил. Но дополнительно введенные жёсткие не выключающиеся связи увеличивают сейсмостойкость зданий.

Библиографический список:

1. Свалова В.Б. Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона //Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023;(3):28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>
2. "M 7.5 - 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake". United States Geological Survey. 1 January 2024. Archived from the original on 1 January 2024. Retrieved 1 January 2024.
3. Timoulali, Youssef; Nacer, Jabour; Youssef, Hahou; Mimoun, Chourak (2015). "Lithospheric structure in NW of Africa: Case of the Moroccan Atlas Mountains". *Geodesy and Geodynamics*. **6** (6): 397 — 408. Bibcode:2015G&G.....6..397 T. doi:10.1016/j.geog. 2015. 12.003
4. National Earthquake Information Center. M 6.3 – 35 km NNE of Zindah Jān, Afghanistan. U.S. Geological Survey (October 7, 2023)
5. Уздин А.М., Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В., Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Прокопович С.В. Статистическое моделирование сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Без-опасность сооружений. - 2019. - № 5. - С. 19-27
6. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Курбанов И.Б. Модель сейсмического воздействия для г. Ма-хачкалы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2011. - № 3 (22). - С. 109-117
7. Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия: [Сб. статей] / АН СССР, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР; [Отв. ред. А.В. Друмя]. - М.: Наука, 1980. - 271 с.
8. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Оценка областей рационального применения системы сейсмо-изоляции зданий со скользящим фундаментальным поясом // Вестник Дагестанского государствен-ного технического университета. Технические науки. - 2016. - Т. 40. - № 1. - С. 77-84
9. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Сейсмическая реакция нелинейной системы сейсмозащиты с кинематическими опорами // Вестник Дагестанского государственного технического университе-та. Технические науки. - 2018. - Т. 45. - № 3. - С. 134-14
10. Чернов, Ю.Т. К расчету систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов // Строительная механи-ка и расчет сооружений. – 2010. – № 4 – С. 53–57
11. Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Analiz effektivnosti rezinometallicheskich opor pri stroitel'stve vysotnykh zdaniy v seysmicheskikh rayonakh [Efficiency Analysis of Rubber-metal Bearings in the Course of Construction of High-rise Buildings in Earthquake Areas]. Vestnik NITs "Stroitel'stvo" [Proceedings of Research Centre for Construction]. 2010, no. 2 (XXVII), pp. 126—137
12. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Влияние коэффициента трения-скольжения опорных элементов и параметров сейсмического воздействия на реакцию и надежность сооружений с сейсмозащитой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2021. - № 2. - С. 12-23
13. Кузнецова И.О., Ваничева С.С., Фрезе М.В., Долгая А.А., Азаев Т.М., Зайнулабидова Х.Р. Примене-ние фрикционно-подвижных болтовых соединений для обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций мостов и других сооружений // Известия Петербургского университета путей сообще-ния. - 2016. - Т. 13. - № 3 (48). - С. 353-360
14. Зайнулабидова Х.Р. Исследование влияния жесткости этажей на сейсмическую реакцию и надеж-ность //Академический вестник УралНИИПроект РААСН. - 2019. - № 4 (43). - С. 83-88
15. Воробьева К.В., Зайнулабидова Х.Р., Фрезе М.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмо-стойкости зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического универ-ситета. Технические науки. - 2016. - Т. 40. - № 1. С. 108-118
16. Бородин, Л.А. О расчете упругопластических систем при сейсмическом воздействии [Текст] / Л.А. Бородин // Строительная механика и расчет сооружений - 1982.- №1. - С.68-72.
17. Хачиян Э.Е. Амбарцумян В.А. Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости - М.: Наука, 1981 - 204 с.

References:

1. Svalova V.B. Earthquakes in Turkey and Syria in 2023 and geodynamics of the Caucasian-Anatolian re-gion. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2023;(3):28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41> (In Russ)

2. M 7.5 - 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake". United States Geological Survey. 1 January 2024. Archived from the original on 1 January 2024. Retrieved 1 January 2024.
3. Timoulali, Youssef; Nacer, Jabour; Youssef, Hahou; Mimoun, Chourak (2015). "Lithospheric structure in NW of Africa: Case of the Moroccan Atlas Mountains". *Geodesy and Geodynamics*. 2015; 6 (6):397 — 408. Bibcode:2015G&G.....6..397 T. doi:10.1016/j.geog. 2015. 12.003
4. National Earthquake Information Center. M 6.3 – 35 km NNE of Zindah Jān, Afghanistan. U.S. Geological Survey (October 7, 2023)
5. Uzdin A.M., Smirnova L.N., Sorokina G.V., Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Prokopovich S.V. Statistical modeling of seismic impacts. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2019;5:19-27 (In Russ)
6. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Kurbanov I.B. Seismic impact model for Makhachkala. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2011;3(22):109-117(In Russ)
7. The Carpathian earthquake of March 4, 1977 and its consequences: [Collection of articles] USSR Academy of Sciences, Inter-Ved. Council on Seismology and Earthquake-resistant Construction under the Presidium of the USSR Academy of Sciences; [Ed. by A.V. Drumya]. *M.: Nauka*, 1980;271.(In Russ)
8. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Assessment of the areas of rational application of the seismic insulation system of buildings with a sliding fundamental belt. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 40(1):77-84 (In Russ)
9. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Seismic reaction of a nonlinear seismic protection system with kinematic supports. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(3): 134-14 (In Russ)
10. Chernov, Yu.T. To the calculation of systems with switching connections. *Construction mechanics and calculation of structures*. 2010; 4:53-57 (In Russ)
11. Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Analiz effektivnosti rezinometallicheskih opor pri stroitel'stve vysotnykh zdaniy v seysmicheskikh rayonakh [Efficiency Analysis of Rubber-metal Bearings in the Course of Construction of High-rise Buildings in Earthquake Areas]. *Vestnik NITs "Stroitel'stvo"* [Proceedings of Research Centre for Construction]. 2010; 2 (XXVII):126—137
12. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Influence of the coefficient of friction-sliding of support elements and parameters of seismic impact on the reaction and reliability of structures with seismic protection. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 202;2:12-23 (In Russ)
13. Kuznetsova I.O., Vanicheva S.S., Freze M.V., Dolgaya A.A., Azaev T.M., Zainulabidova H.R. The use of friction-movable bolted joints to ensure earthquake resistance of building structures of bridges and other structures. *Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2016;13(3 (48)):353-360 (In Russ)
14. Zainulabidova H.R. Investigation of the effect of floor stiffness on seismic response and reliability. *Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN*. 2019;4 (43): 83-88 (In Russ)
15. Vorobyova K.V., Zainulabidova H.R., Freze M.V. Accounting for damping in the tasks of assessing the seismic resistance of buildings and structures. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 40(1):108-118 (In Russ)
16. Borodin, L.A. On the calculation of elastoplastic systems under seismic action [Text] *Construction mechanics and calculation of structures* 1982;1:68-72. (In Russ)
17. Khachiyan E.E. Ambartsumyan V.A. Dynamic models of structures in the theory of seismic resistance - M.: Nauka, 1981;204. (In Russ)

Сведения об авторе:

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Архитектура»; hanzada1@mail.ru

Information about the author:

Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof, Head Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 15.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 21.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 21.07.2024.