

# Защита Зданий от Сейсмических Волн с Помощью Сухого Трения и Демпферов

Мирзаев И., Турдиев М.С.\* и Рахматов Н.Б.

## Аннотация

В представленной научной работе исследуется проблема сейсмоизоляции девятиэтажного здания при воздействии четырёх различных реальных записей сейсмических волн. Для защиты конструкции применяется комбинированная система, включающая сейсмоизоляторы с сухим трением и резинометаллические демпферы (резинометаллические опоры с демпфирующими свойствами). В ходе исследования подробно анализируется влияние различных сейсмических воздействий на величину максимальной сдвиговой (срезающей) силы, возникающей в элементах здания. Особое внимание уделено тому, как изменяется этот показатель при увеличении и уменьшении количества используемых изолирующих и демпфирующих устройств в системе сейсмоизоляции. Полученные результаты позволяют оценить эффективность совместного применения указанных типов устройств, а также выявить оптимальные конфигурации их размещения и количества для минимизации сейсмических нагрузок на несущие конструкции многоэтажного здания.

*Ключевые слова:* сухое трение; сейсмоизоляция; резинометаллический демпфер.

*Предметная классификация AMS (2020):* Основная: 74-XX; Дополнительная: 74Jxx; 74Kxx; 74K10; 70F35; 74Pxx; 86A15.

## Введение

В современном мире всё большее внимание уделяется разработке и внедрению передовых технологий строительства, обеспечивающих повышенную сейсмостойкость зданий и сооружений. Особый акцент делается на применении специальных сейсмозащитных устройств и систем, которые позволяют существенно снизить уровень динамических нагрузок, передаваемых на несущие конструкции во время сильных землетрясений, тем самым повышая общую надёжность, безопасность и долговечность объектов. В настоящее время в странах с высоким уровнем сейсмической активности и развитой инженерной практикой — таких как США, Япония, Германия, Россия, Италия и Китай — активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования, направленные на создание новых, более эффективных типов сейсмоизолирующих и демпфирующих устройств. Эти разработки ориентированы на использование в различных элементах несущих систем зданий и сооружений (фундаменты, колонны, перекрытия, связи), с широким применением местных сырьевых материалов и учётом требований к длительной безотказной эксплуатации в жёстких климатических и сейсмических условиях [1–3]. В рамках настоящей исследовательской работы рассматривается актуальная инженерная задача сейсмоизоляции девятиэтажного жилого или общественного здания при одновременном воздействии четырёх различных реальных акселерограмм (записей) сильных землетрясений. Для достижения требуемого уровня защиты применяется

комбинированная (гибридная) система сейсмоизоляции, основанная на совместном использовании двух типов устройств:

сейсмоизоляторов с сухим трением (трибологических изоляторов, работающих за счёт сил сухого трения между поверхностями скольжения), резинометаллических демпферов (эластомерных опор с металлическими армирующими слоями, обеспечивающих упругую податливость и дополнительное рассеивание энергии).

В ходе численного моделирования и параметрического анализа подробно изучено влияние характера и интенсивности выбранных сейсмических воздействий на величину максимальной сдвиговой (срезающей) силы (base shear), возникающей в уровне основания здания. Особое внимание уделено количественной оценке того, как изменяется данный ключевой показатель сейсмической нагрузки при систематическом увеличении и уменьшении количества одновременно применяемых изолирующих и демпфирующих элементов в составе гибридной системы. Полученные результаты позволяют глубже понять механизмы совместной работы указанных устройств, выявить диапазоны рационального варьирования их числа и размещения, а также оценить реальную эффективность комбинированного подхода к сейсмоизоляции для снижения уровня сдвиговых усилий в несущих конструкциях многоэтажного здания при различных сценариях сейсмического воздействия. В работе [7] проведена оценка эффективности оптимальных систем TLCD и TMD для снижения сейсмического отклика зданий с учетом взаимодействия «сооружение–грунт». Используется численное моделирование и оптимизационные алгоритмы. Показано, что учет SSI существенно влияет на выбор и эффективность демпфирующих устройств. Статья [8] посвящена базовой сейсмоизоляции зданий с использованием свободно катящихся стержней под фундаментом. Рассмотрена динамика конструкции при землетрясениях и особенности снижения передаваемых инерционных сил. Показана перспективность роликовых систем как простой формы изоляции. Авторы исследуют [9] наклонные многороликовые сейсмоизоляционные устройства для защиты оборудования и сооружений. Представлены экспериментальные и численные результаты, подтверждающие стабильность и самовосстанавливающие свойства системы. Показано значительное снижение сейсмических перемещений и усилий. В статье [10] выполнено численное моделирование взаимодействия здания с основанием при сейсмических воздействиях. Рассматриваются различные условия контакта и скольжения фундамента. Полученные результаты демонстрируют влияние модели основания на динамический отклик сооружения. Отчет посвящен [11] разработке и валидации системы сейсмоизоляции для легких жилых зданий. Представлены результаты экспериментальных испытаний и аналитического моделирования. Доказана надежность и практическая применимость предложенной изоляционной системы.

## 1. Метод

Пусть горизонтальное движение основания конструкции задано в виде акселерограммы действительного землетрясения. Здание представим одномерной сдвиговой моделью с сосредоточенными массами и безынерционными упругими связями. Расчетная схема многоэтажного здания с учетом сейсмоизоляции с сухим трением по нормативному документу принимает следующий вид (рис. 1).

Для данной конструкции применяем конечные элементы смещения, в результате чего приходим к следующей системе простых дифференциальных уравнений [4, 5]:

$$\begin{aligned} [M] \cdot \{\ddot{U}\} + [C] \cdot \{\dot{U}\} + [K] \cdot \{U\} &= \{Q(t)\}, \\ \{U\} &= 0, \quad \{\dot{U}\} = 0 \quad \text{при } t = 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $[M]$  – диагональная матрица масс,  $[K]$  – матрица жесткостей;  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$  – матрица вязкости,  $\{U\}$  – вектор перемещений. Для сейсмоизолятора сухого трения условие взаимосвязи массы ростверка  $M_0$  и скользящего фундамента принимает следующий вид:

$$u_0 = u_g - u_r, \quad \text{если } |F_0| < |F_{fr}|, \quad \text{т.е. при совместном движении,} \quad (1.2)$$

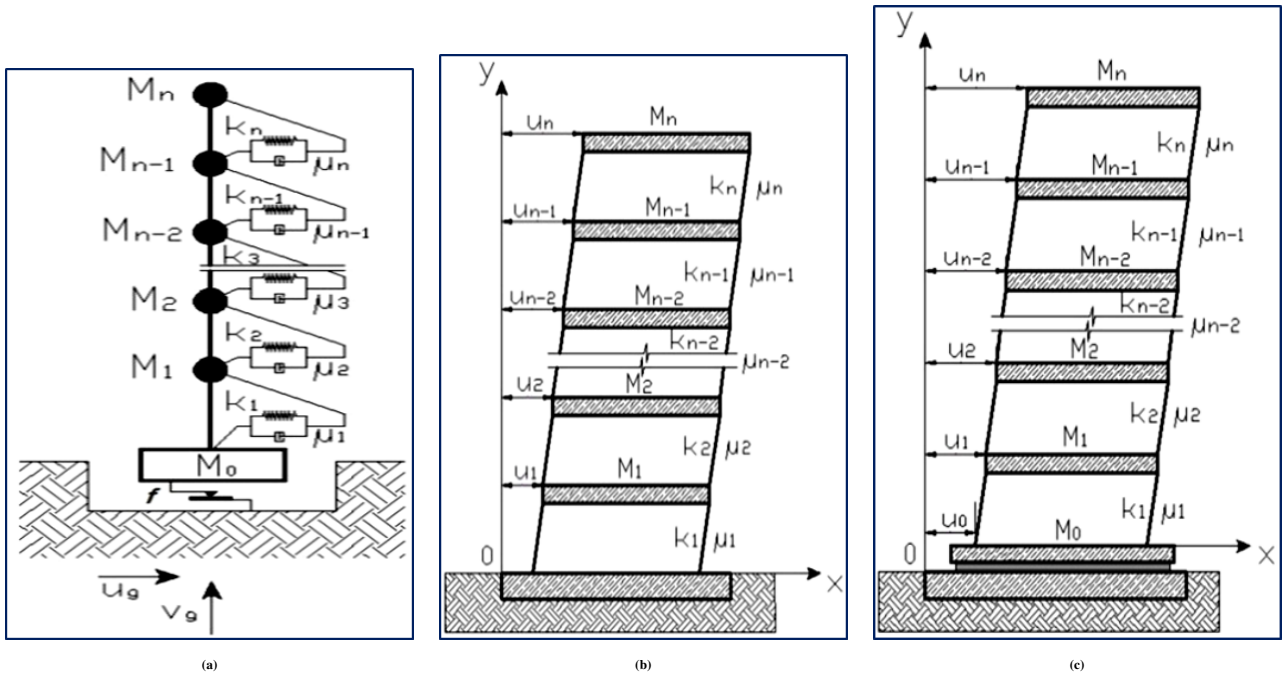


Рис. 1. Консольная расчетная схема в виде упругого стержня с сосредоточенными массами (а), расчетная схема многоэтажного здания в плоскости с жестким защемлением основания (б) и с сейсмоизоляцией (с)

$$F_0 = F_{fr}, \text{ при скольжении,} \quad (1.3)$$

где  $u_0$  — горизонтальное перемещение ростверка,  $u_g$  — перемещение фундамента,  $u_r$  — величина сдвига в момент времени в начале текущего совместного движения без скольжения нижней части фундамента и движения ростверка, т.е. разность между значениями перемещений нижней части фундамента и ростверка (в начальный момент времени  $u_r = 0$ ),  $F_0$  — неизвестное значение силы сцепления между верхним и нижним фундаментами;

$$F_{fr} = \text{sign}(\dot{u}_g - \dot{u}_0) \cdot f \cdot P. \quad (1.4)$$

$F_{fr}$  — значение силы сухого трения,  $f$  — коэффициент сухого трения;  $P$  — вес здания. Если сухое трение скольжения осуществляется на основе материала фторопласта-4, то  $f = 0.05$ . При совместном движении перемещение  $u_0$  определяется по равенству (1.2) и уравнение движения массы  $M_1$  имеет вид [4],[5]:

$$M_1 \ddot{u}_1 + k u_1 + c_1 \dot{u}_1 - k_2(u_2 - u_1) - c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0 \quad (1.5)$$

В этом случае  $Q_1 = k_1 u_0 + c_1 \dot{u}_0$ , остальные элементы вектора  $\{Q\}$ , соответствующие горизонтальным перемещениям сосредоточенных масс, равны нулю.

Скольжение с сухим трением наступает только тогда, когда выполняется условие (1.3). В этом случае демпферная сила имеет вид  $F_{dm} = k_0 u_r + c_0 \dot{u}_r$ . Рассматриваемая задача (1.1), (1.2), (1.3) является нелинейной задачей, при этом отсутствуют условия вычисления неизвестной функции  $F_0$ , а также во время динамического процесса изменяются размерности матриц  $[M]$  и  $[K]$ . При скольжении имеет место уравнение для массы  $[M_0]$  [4, 5]:

$$M_0 \ddot{u}_0 + k_0 u_0 - k_1(u_1 - u_0) + c_0 \dot{u}_0 - c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_0) = F_{fr} + k_0 u_g + c_0 \dot{u}_g, \quad (1.6)$$

где  $Q_0 = F_{fr} + k_0 u_g + c_0 \dot{u}_g$ ;  $k_0$ ,  $c_0$  — жесткость и вязкость резинометаллического изолятора, дополнительно размещенного между фундаментом и ростверком. Для решения задачи в целом воспользуемся следующим алгоритмом. На каждом шаге по времени решаем задачи в трех постановках:

1. Уравнение (1.1) решаем с условием (1.2);

2. Уравнение (1.1) решаем с условием (1.3), при  $F_0 = f \cdot P$ ;

3. Уравнение (1.1) решаем с условием (1.3), при  $F_0 = -f \cdot P$ .

При этом матрицы  $[M]$  и  $[K]$  в первой постановке имеют размер  $m \times m$  (здесь  $m$  количество этажей здания), а во второй и третьей постановках  $(m + 1) \times (m + 1)$ . Выбор действительного решения из этих трех решений осуществляется следующим образом. Если относительные скорости  $\dot{u}_g - \dot{u}_0$  во втором и третьем условиях задачи имеют разные знаки, правильное решение является решением задачи в первом условии, поскольку сила сухого трения приводит фундамент в движение в разных направлениях, и поэтому неизвестная сила меньше порогового значения силы сухого трения, то есть скольжения нет. Если относительные скорости во втором и третьем условиях задачи имеют одинаковый знак, то решение при условии наименьшего абсолютного значения относительной скорости является действительным, так как сила сухого трения всегда направлена против относительного движения. Все три задачи решаются методом Ньюмарка [4, 5].

### 1.1. Результат.

Проанализируем результаты вычислений с помощью следующих примеров. Даны характеристики 9-этажного здания, а также действительные сейсмографические записи следующих землетрясений. Приближенное сопоставление расчетов проведено с использованием результатов воздействия 4 типов землетрясений:

- №1. Абхарское землетрясение (Иран 20.06.1990) 8 баллов по шкале MSK-64: ускорение – 1.93 м/с<sup>2</sup>; скорость – 0.19 м/с; перемещение – 0.0641 м, продолжительность – 36 сек.
- №2. Газлинское землетрясение (Узбекистан 17.05.1978) более 9 баллов по шкале MSK-64: ускорение – 7.22 м/с<sup>2</sup>; скорость – 0.62 м/с; перемещение – 0.18 м; продолжительность – 28 сек.
- №3. Землетрясение Duzce (Турция 17.08.1999) магнитудой 9 по шкале MSK-64: ускорение – 3.66 м/с<sup>2</sup>, скорость – 0.45 м/с; перемещение – 0.1065 м, продолжительность – 36 сек.
- №4. Табасское (Иран) землетрясение 16.09.1978 баллов выше 9 по шкале MSK-64: ускорение – 10.17 м/с<sup>2</sup>; скорость – 0.88 м/с; перемещение – 0.3446 м; продолжительность – 78.398 сек.

Таблица 1. Землетрясение №1

Этаж	Без скольжения $q_{\max}(\text{кН})$	При скольжении $f = 0.05$ и числе резинометаллических демпферов $q_{1 \max}(\text{кН})$					
		27 та	23 та	19 та	15 та	9 та	0 та
1	13200	11400	13000	12200	14300	13100	2350
2	11700	12800	14100	11200	13700	14200	2680
3	10700	11600	12500	10900	13800	13600	2910
4	9510	12200	13300	11400	13100	12900	3000
5	8140	12600	14000	11400	13600	12200	2900
6	6640	11700	11600	11800	13300	11700	2650
7	5040	11800	11700	12600	12000	11600	2310
8	3350	11000	10800	11800	13000	11300	1710
9	1600	7050	6850	7150	8960	7560	876

Существующие записи сильных землетрясений взяты из европейской базы данных [6].

Девятиэтажное здание серии 76-017СП/53 имеет следующие характеристики: крупнопанельное здание размером

Таблица 2. Землетрясение №2

Этаж	Без скольжения $q_{\max}(\text{кН})$	При скольжении $f = 0.05$ и числе резинометаллических демпферов $q_{1 \max}(\text{кН})$					
		27 та	23 та	19 та	15 та	9 та	0 та
1	68100	14800	15900	20300	18400	16100	12300
2	61000	11300	13000	12100	11500	13800	11000
3	56300	12100	12700	13400	12100	13900	10400
4	50700	12200	14700	15300	11200	13500	10200
5	44000	11300	13900	15300	10600	14000	10000
6	36400	12200	13000	13400	12300	14700	9800
7	28700	12800	13400	12400	13000	12900	9200
8	19800	10400	13200	12500	11300	12800	7150
9	9640	6760	8390	7560	7410	8020	6400

Таблица 3. Землетрясение №3

Этаж	Без скольжения $q_{\max}(\text{кН})$	При скольжении $f = 0.05$ и числе резинометаллических демпферов $q_{1 \max}(\text{кН})$					
		27	23	19	15	9	0
1	19400	15700	13900	15200	14600	15700	2210
2	18100	11300	9470	10000	11600	11300	2450
3	16500	11900	9310	12000	9890	11900	2670
4	14600	11400	8500	10900	8900	11400	2850
5	12500	10800	8380	10700	9280	10800	2950
6	10200	11500	7450	11600	10500	11500	2890
7	7770	9600	7330	10100	10700	14900	2580
8	5150	9070	8620	10000	9990	15000	1950
9	2460	5740	5470	7020	5980	9310	1000

в плане  $291.6 \text{ м}^2$ ; сосредоточенные массы в уровнях верхней части фундамента и этажей  $M_0 = 449000 \text{ кг}$ ,  $M_1 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_2 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_3 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_4 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_5 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_6 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_7 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_8 = 379500 \text{ кг}$ ,  $M_9 = 341000 \text{ кг}$ , при этом общий вес здания, давящий на нижнюю часть фундамента, равен  $P = 37494800 \text{ Н}$ ; сдвиговые жесткости по этажам одинаковы  $k = 32.357 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ ; вязкость материала здания по этажам одинакова  $\mu_i = 10.58 \cdot 10^6 \text{ Нс/м}$ . Значения частот собственных колебаний с жесткой заделкой фундамента:  $\omega_1 = 79 \text{ Гц}$ ,  $\omega_2 = 160 \text{ Гц}$ ,  $\omega_3 = 239 \text{ Гц}$ ,  $\omega_4 = 314 \text{ Гц}$ ,  $\omega_5 = 380 \text{ Гц}$ . Для защиты рассматриваемого 9 этажного здания от сейсмических волн, наряду с сухим трением, мы используем 27 резинометаллических демпферов. Демпферы производства компании FIR. Жесткость одного демпфера в серии SI-S 600/152 равна  $k_0 = 0.74 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$  [2]. Проанализируем результаты, уменьшив количество демпферов соответственно до 27 ( $k_0 = 19.98 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ), 23 ( $k_0 = 17.02 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ), 19 ( $k_0 = 14.06 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ), 15 ( $k_0 = 11.1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ) и 9 ( $k_0 = 6.66 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ), а

Таблица 4. Землетрясение №4

Этаж	Без скольжения $q_{\max}$ (кН)	При скольжении $f = 0.05$ и числе резинометаллических демпферов $q_{1\max}$ (кН)					
		27 та	23 та	19 та	15 та	9 та	0 та
1	131000	18700	14800	20900	19900	19300	21000
2	124000	13600	12200	13100	15300	13400	12800
3	115000	12700	13000	13300	14900	15200	14200
4	104000	12500	12700	12900	13900	15500	14300
5	90800	13200	13600	13000	13200	15300	12600
6	74900	11700	15200	13500	12500	15100	13200
7	57200	11300	15200	15400	14100	16400	13300
8	38200	11300	12700	15400	15300	15000	13100
9	18300	7510	7710	10000	10000	9380	8180

также рассчитаем вариант без резинометаллического демпфера. При численном решении задач с сухим трением, не зависимо от выбора явной или неявной конечно-разностной схемы, шаг по времени необходимо подбирать для обеспечения достаточной точности. В наших примерах расч етов шаг по времени был равен 0.0001.

## Заключение.

В данной исследовательской работе на основе различных записей реальных сейсмических волн показано, что сейсмическая изоляция с совместным использованием сухого трения и резинометаллических изоляторов в 6 раз менее эффективна, чем сейсмическая изоляция только с сухим трением (табл. 1-4). Использование демпферов компании FIP для сейсмоизоляции зданий обходится дорого. Использование фторопласта, материала, обеспечивающего скольжение, значительно дешевле, чем демпферы.

## Список литературы

- [1] Hiroki, A., Kotaro, K., Kohei, F., Izuru, T.: *Critical Response of Nonlinear Base-Isolated Building Considering Soil-Structure Interaction Under Double Impulse as Substitute for Near-Fault Ground Motion*. Front. Built Environ. **4**, 1-13 (2018).
- [2] FIP Industriale: *Резинометаллические Изоляторы серии SI S02*. (2014).
- [3] *Curved Surface Sliders*. Homepage. Available at: <https://docplayer.net/133188454-Curved-surface-sliders.html>.
- [4] Mirzaev, I., Turdiev, M. S.: *Vibrations of buildings with a sliding foundation having lateral yielding contact under real seismic impacts*. AIP Conf. Proc. **2432**, 030050, 1-6 (2022).
- [5] Мирзаев, И., Турдиев, М. С.: *Колебания зданий с подвижным фундаментом при реальных сейсмических воздействиях разного спектра частот*. Transportda resurs tejankor texnologiyalar, 502-506 (2023).
- [6] Ambraseys, N. N., et al.: *Internet site for European strong-motion data*. Boll. Geof. Teor. Appl. **45** (3), 113-129 (2004). Available at: [http://www.isesd.hi.is/ESD\\_local/frameset.htm](http://www.isesd.hi.is/ESD_local/frameset.htm).
- [7] Roozbahan, M., Masnata, Ch., Turan, G. and Pirrotta, A.: *Efficiency evaluation of optimal TLCD and TMD for the seismic response reduction of buildings considering soil structure interaction effect*. Meccanica. **11012-025-01981-9** (2025). Available at: <https://doi.org/10.1007/s11012-025-01981-9>.
- [8] Lin, T. W. and Hone, Ch. Ch.: *Base Isolation by Free Rolling Rods Under Basement*. Earthquake engineering and structural dynamics **22**, 261-273 (1993). Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220502>.
- [9] Wang, S. J., Hwang, J. S., Chang, K. C., Shiau, C. Y., Lin, W. C., Tsai, M. S., Hong, J. X. and Yang, Y. H.: *Sloped multi-roller isolation devices for seismic protection of equipment and facilities*. Earthquake Engineering Structural Dynamics **43**(10), 1443-1461 (2014). Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.2404>.

- [10] Nizomov, D. N. and Sanginov, A. M.: *Simulation of the interaction of the structure with the foundation under seismic impacts*. Bulletin of Science and Research Center of Construction **3**(38), 143–154 (2023). Available at: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-29-37>.
- [11] Cilsalar, H. and Constantinou, M. C.: *Development and Validation of a Seismic Isolation System for Lightweight Residential Construction*. Technical Report MCEER-19-0001, 566 p (2019).

## Protection of Buildings From Seismic Waves Using Dry Fracture and Dampers

Mirzayev I., Turdiyev M.S. and Raxmatov N.B.

### Abstract

**In this research work, the problem of seismic isolation of a nine-story building under the influence of 4 different real seismic waves through the joint use of dry friction isolators and rubber-metal dampers is considered. The influence of seismic waves on the magnitude of the shear force in the building as a result of their increase and decrease was studied.**

### Keywords

**dry friction; seismic isolation; rubber-metal damper.**

### Affiliations

Mirzayev I.

**Address:** Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan.

**e-mail:** [ibrakhim.mir@mail.ru](mailto:ibrakhim.mir@mail.ru)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-8616-9717>

Turdiyev M.S.

**Address:** Associate Professor of the Department of Applied Mechanics, Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan.

**e-mail:** [malikjon.ts@mail.ru](mailto:malikjon.ts@mail.ru)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2499-0243>

Raxmatov N.B.

**Address:** Assistant of the Department of Differential Equations and Mathematical Physics, National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan.

**e-mail:** [nodirbekrakhmatov0@gmail.com](mailto:nodirbekrakhmatov0@gmail.com)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>