**СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПОДУШКИ: ОТ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ИДЕЙ ДО СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФОНОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

**С.В. Кузнецов**, д-р физ. –мат. наук, проф.

(Институт Проблем Механики РАН)

**Аннотация.** В докладе анализируются системы сейсмозащиты на основе сейсмических подушек, располагаемых под фундаментом сооружения. Указанные системы применяются для защиты сооружений от сейсмических волн, как продольных, так и поперечных. Рассматриваются исторические аналоги, в том числе здание the Imperial Hotel в Токио. Отмечаются перспективы применения сейсмических подушек, обеспечивающих высокие защитные свойства и долговечность.

**Ключевые слова:** сейсмические подушки, сейсмические волны, метаматериалы, гранулированные среды.

**1.Введение**. Сейсмические подушки, располагаемые под фундаментом сооружения, предназначены для защиты всего сооружения, включая фундаментные конструкции, от объемных сейсмических S и P волн. Обеспечением защиты фундаментных конструкций объясняется одно из основных преимуществ систем, создаваемых на основе сейсмических подушек, от сейсмоизоляторов различных типов, - последние оставляют фундаментные конструкции, фактически без защиты, что может приводить к нерасчетным усилиям в фундаментных плитах и, в итоге, вызвать разрушения фундаментных плит и всего сооружения в целом. Еще одно неоспоримое преимущество большинства систем на основе сейсмических подушек, - их долговечность, сопоставимая со сроком службы всего сооружения, в отличие от наиболее распространенных резинометаллических сейсмоизоляторов, срок службы которых, как правило, ограничен 20 – 25 годами.

Термин «сейсмическая подушка» в литературе по сейсмической защите, по-видимому, впервые появился в связи со строительством Императорского отеля в г. Токио (Япония) в 1923 г. Отель сооружен на относительно плотных грунтах, однако ниже отметки 6 м вплоть до глубин 10 – 12 м находились слабые илистые грунты, обусловленные находившимся когда-то на этом месте болотом. В сентябре 1923 г. в Токио произошло одно из самых разрушительных землетрясений магнитудой Мw 7.9 – 8.2, однако отель не пострадал.

В дальнейшем идея использования слабых грунтов под подошвой сооружения, названная впоследствии основанием с «плавающим фундаментом» или «сейсмической подушкой» нашла свое отражение в исследованиях [2 – 4]. В этих исследованиях было отмечено, что наряду с положительными факторами, способствующими рассеиванию сейсмической энергии, слабые грунты, расположенные на некоторой глубине под основанием сооружения, в особенности, если их мощность превышает несколько метров (более 2м) способны при динамических воздействиях вызвать значительную и, возможно, неравномерную осадку сооружения. Кроме того, такие массивы слабых грунтов при сейсмических воздействиях способны вызвать разжижение и потерю их несущей способности. Для исключения этих негативных факторов рекомендовано уменьшать толщину подушки, до значений менее одного метра [5, 6] и выполнять подушку из материалов сохраняющих свои диссипативные свойства при значительных давлениях. На практике, требование уменьшения толщины подушки при сохранении хороших диссипативных свойств в отношении энергии сейсмических волн, означает отказ от применения естественных гравийно-песочных материалов. Вместо естественных гравийно-песчаных материалов рекомендовано применение искусственных материалов, обладающих свойствами диссипации волновой энергии в широком диапазоне частот. Далее, следуя [7] такие материалы будут называться сейсмическими метаматериалами.

В сейсмодинамике такого рода метаматериалы, обеспечивающие стабильную диссипацию энергии сейсмических волн в широком диапазоне частот, часто именуют метаматериалами, обладающими свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов [8], поскольку позволяют поглощать энергию сейсмических волн в широком диапазоне частот. Для строительных сооружений общего назначения диапазон частот, на которых требуется поглощение энергии, обычно составляет 2 – 15 Гц, а для специальных сооружений соответствующий частотный диапазон 1 – 35 Гц.

Сейсмические подушки применяются при защите мостовых опор, включая опоры самого протяженного вантового моста Рион-Антирион через Коринфский залив (Греция).

**2. Конструктивные решения, применяемые для сейсмозащиты на основе сейсмических подушек**. В настоящее время проектные решения, основанные на использовании сейсмических подушек, осуществляются рядом компаний, среди них надо отметить Marathon Alliance (Австралия), FIP Industriale (Италия), BridgeStone (Япония), MM Systems Corp (США), Kawakin Core Tech (Япония).

Ниже дается ориентировочная стоимость сейсмических подушек по данным [9]:

Защита высотного здания Брукфилд-Биэчпи в г. Перт (Австралия) с помощью сейсмической подушки. Площадь основания небоскреба с торговым комплексом и подземным паркингом – 20 тыс. кв. м, расчетное давление под подошвой фундамента 35 КПа, толщина сейсмической подушки, выполненной из метаматериалов, обладающих свойствами широкодиапазонных фононных кристаллов – 0.25м. Стоимость всего здания 600 млн. USD, сейсмической защиты – 15 млн. USD (2.5% от стоимости всего сооружения) , расчетное снижение амплитуд ускорений 2.4 раза (более чем на балл).

Защита центрального госпиталя в г. Веллингтон (Новая Зеландия) с помощью сейсмических подушек под опорами здания. Площадь основания госпиталя и подземного паркинга – 14тыс. кв. м, расчетное давление под опорами фундамента 33 КПа, толщина сейсмической подушки – 0.2м. Стоимость всего комплекса 350 млн. USD, сейсмической защиты – 7 млн. USD (2% от стоимости всего сооружения), расчетное снижение амплитуд ускорений 4.2 раза (более чем на два балла).

Защита женского госпиталя в г. Кристчёрч (Новая Зеландия) с помощью сейсмической подушки под основанием здания. Площадь защищаемой территории – 2.5тыс. кв. м, расчетное давление под фундаментом 35 КПа, толщина сейсмической подушки – 0.4м. Стоимость больничного комплекса 120 млн. USD, сейсмической защиты – 2.1 млн. USD (1.8% от стоимости всего сооружения), расчетное снижение амплитуд ускорений 2.3 раза (более чем на балл).

**3. Выводы**. В заключение надо отметить, что у анализируемой системы сейсмической защиты имеется несколько неоспоримых преимуществ:

(1) *стоимость* сейсмических подушек не превышает стоимости сейсмоизоляторов и лежит в диапазоне 1.8 – 2.5% от стоимости сооружения;

(2) *обеспечение защиты фундаментных конструкций*, тогда как при применении других методов сейсмической защиты фундаментные конструкции остаются незащищенными;

(3) *долговечность* сейсмических подушек, срок службы которых соизмерим со сроком службы защищаемого объекта;

(4) *диапазон демпфируемых частот* сейсмические подушки обладают способностью рассеивать энергию сейсмических волн в широком диапазоне частот. Для основных типов гражданских и промышленных зданий - это 2 – 15 Гц; в случае сооружений атомной энергетики диапазон частот может быть расширен до 1 – 35 Гц.

***Литература***

1. *Secrest M*. Frank Lloyd Wright: A Biography. University of Chicago Press. 1998. 652 p.
2. *Barkan D.D*. Dynamics of Bases and Foundations. N.Y., McGraw Hill, 1962. 434 p.
3. *Wolf J.P*. Dynamic Soil-Structure Interaction (Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics). Prentice-Hall, 1985. 466 p.
4. *Buhler M.M*. Soil Dynamics and Foundation Modeling: Experimental and Numerical Investigation of Soil-Foundation-Structure Interaction during Monotonic, Alternating and Dynamic Loading. Independently published. 304 p.
5. *Kaleem A*. Dynamic Soil-Structure Interaction. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 100 p.
6. Soil-Structure Interaction (Developments in Geotechnical Engineering). Elsevier. 2014, 384 p.
7. *Grima J.N, Caruana-Gauci R.* Mechanical metamaterials: Materials that push back // Nature Materials, 2012, V. 11. P. 565-566.
8. *Antonakakis T., Craster R.V., and Guenneau S.* Homogenisation for elastic photonic crystals and metamaterials // J. Mech. Phys. Solids, 2014. V. 71. P. 84 – 96.
9. I*nformation from Marathon Alliance Co*. Booklet on Metamaterials for seismic pads and seismic barriers; Perth, Australia, 2017. http://www.marathonalliance.com.au/metamaterials

**SEISMIC PADS: FROM HEURISTIC IDEAS TO MODERN SOLUTIONS BASED ON PHONONIC CRYSTALS**

***S.V. Kuznetsov***, DSc, Prof

Institute for Problems in Mechanics, RAS

**Abstract.** The questions of application of seismic pads for buildings and constructions protection from bulk seismic P and S waves are analyzed. The historical analogues are considered, including the famous building of the Imperial Hotel in Tokyo. Prospects for the use of seismic pads providing high protective properties and durability comparable to the life of the entire structure are noted.

**Keywords**: seismic pads, seismic waves, metamaterials, granular media