

УДК 69.04

**СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ В БУХАРСКОЙ  
ОБЛАСТИ ПРИ НЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

*Соискатель **А.Н. Дускараев** БухИУПР,  
к.т.н. доц. **Н.А. Дускараев** БухИУПР, к.т.н. (PhD)  
и.о. доц. **Т.О. Жураев** БухИУПР*

**АННОТАЦИЯ**

Под воздействием динамических и статических нагрузок происходит изменение объёмов слабых грунтов в основании за счёт уменьшения пористости. В связи с этим проведены исследования устойчивости здания при сейсмических воздействиях, основаниями которых являются упругопластические слои. В результате получено уравнение движения грунта для определения общего угла наклона здания с учётом сейсмического воздействия, характерного для строительной площадки, и характеристик самого здания. Показано увеличение риска вследствие потери устойчивости основания за счёт возможного наклона здания. Показаны параметры, влияющие на кинематические характеристики зданий и сооружений. Определено, что упругая система, состоящая из здания и основания, имеет односторонние связи между фундаментом и основанием, которые удаляются под воздействием сейсмических сил на отдельных участках подошвы фундамента, где статическая нагрузка незначительна. Удаление связей вызывает изменение жёсткости системы. Центр тяжести и центр масс смещаются на некоторое расстояние, следовательно, возникают изменяющиеся колебания. Диапазон колебаний при этом зависит от соотношения собственных частот зданий и сейсмических волн.

Результаты исследований можно применить для расчётов многоэтажных и высотных зданий, строящихся на слабых деформируемых грунтах, наряду с другими расчётами, позволяющими увеличить сейсмоустойчивость.

**Ключевые слова:** сейсмическая волна, физико-механические свойства грунтов, толщина рыхлого слоя грунта, сейсмическая нагрузка, момент инерции, потеря устойчивости.

**Введение.** Сильнейшие землетрясения, оказывающие разрушительное воздействие, происходят на земле каждый месяц, иногда чаще раза в месяц. Значительная часть сильных землетрясений приходится на дно морей и океанов, поэтому мы их не всегда ощущаем. Сейсмологами отмечается, что во всем мире происходит активизация глобальной сейсмичности [1].

Поведение зданий при землетрясениях зависит от многих факторов—параметров самого здания (геометрических размеров в плане, высоты, конструктивного решения и др.), основания (физико-механических качеств грунтов, слагающих основание здания), характеристик очаговой зоны. Задача учёных—комплексно оценить сейсмическую опасность, определить уязвимость тех или иных конструктивных и объёмно-планировочных решений зданий и сооружений [2]. Расчёт зданий в сейсмоопасных районах проводится по методике, основанной на линейно-спектральном подходе. Применяемый метод не позволяет оценить вероятность отклонений расчётных значений от действительных, связанных с нелинейными свойствами грунтов, проявляющихся при динамическом нагружении. Проблема состоит в том, что возможен эффект резонанса, который усиливает сейсмические колебания рыхлых грунтов. Параметры колебаний грунтов зависят от физико-механических характеристик и мощности. В зависимости от этих характеристик колебания одних частотных интервалов усиливаются, а других практически полностью поглощаются.

Собственные же периоды колебаний многих разрушенных 3–4-этажных домов составляли 0,2–0,3 с. При землетрясении 1985 г. с магнитудой  $M=8,1$  в Мехико, расположенном в 300 км от эпицентра, по данным Геологической службы США [3 13], разрушилась значительная часть города. На отдельных территориях города резонансное усиление сейсмических воздействий с периодами около 2 с, достигло 50 раз, что привело к разрушению 12–20-этажных зданий с близкими резонансными периодами. Приведённые примеры последствий землетрясений требуют от нас исследований в области вынужденных колебаний сооружений на тех или иных грунтах, т.е. определения и учёта при расчётах сооружений таких характеристик грунтов, как модуль деформации, коэффициент затухания, неизотропность, слоистость и др. Есть ещё один очень важный фактор—изменчивость механических свойств грунтов при прохождении через них сейсмических волн, особенно это касается рыхлых увлажненных грунтов (песков, глин, суглинков). Дело в том, что такие грунты состоят из мельчайших частиц, в порах между которыми находятся вода и газы. Прочность таких грунтов при восприятии нагрузок обеспечивается за счёт большого числа связей между частицами, но многие из этих связей очень слабы. При сейсмическом воздействии часть связей разрывается. В итоге прочность грунта значительно снижается, а построенное на нем здание может опрокинуться. Весьма ярким примером такого поведения грунтов являются последствия землетрясения в городе Ниигату с магнитудой  $M = 7,5$ , эпицентр которого находился на расстоянии 60 км на острове Хонсю (Япония). К. Абе писало последствиях этого землетрясения, а также дал оценку количественных

параметров [4]. В результате этого землетрясения сейсмостойкие жилые дома средней этажности 4, 5 внезапно опрокинулись, потеряв устойчивость, повернувшись вокруг продольной оси и заняли почти горизонтальное положение. По мнению специалистов, исследовавших этот случай, потеря устойчивости произошла в результате увлажнения песчаного основания, уменьшения его несущей способности и неравномерной осадки основания. Всё вышесказанное обосновывает необходимость развития существующих методик для расчёта сейсмостойкости зданий и сооружений и более детального анализа поведения здания в целом и его конструкций.

**Цель исследования:** По мере продвижения под фундамент здания волна оказывает на него давление, представляющее собой подвижную несимметричную нагрузку. Вертикальная составляющая этой нагрузки создаёт момент относительно горизонтальной оси здания. Этот внешний момент с течением времени изменяется и вызывает раскачивание здания. Отражение волн от границ слоя усиливает этот эффект. Деформация перестает быть линейной. Вслед за ударными сейсмическими волнами, если среда упругая до некоторого предела, возникают пластические волны, распространяющиеся с меньшей скоростью. Поэтому при сильных землетрясениях в осадочном слое основную часть сейсмического эффекта передают зданиям именно пластические волны. Для оценки сейсмостойкости зданий это обстоятельство является важным, так как именно пластические волны раскачивают здание. Пластичные волны возникают в рыхлых, пористых грунтах, поэтому, учитывая физико-механические характеристики грунтов, можно оценить надёжность зданий.

Целью исследование являются— разработать методику расчёта зданий с учётом характеристик грунтов, позволяющей учитывать грунтово-геологические условия местности (мощность рыхлого слоя грунта, преобладающий период колебаний, продолжительность интенсивной фазы землетрясения, максимальные ускорения колебаний грунта и др.), которые, в свою очередь, влияют на спектры реакции акселерограмм грунтов. Применимость синтезированных акселерограмм, полученных в работе для расчётов на сейсмические воздействия, оценивались на основе сопоставления параметров синтезированных акселерограмм с параметрами зарегистрированных записей землетрясений. При этом сравнивались записи, грунтово-геологические условия которых сопоставимы.

Сравнительный анализ представленных записей показывает, что при сходных исходных данных отклик сопоставим.

И так как основным фактором, влияющим на поведение грунта при сейсмических воздействиях, являются грунтово-геологические характеристики, которые, в свою очередь, в значительной степени могут отличаться в

зависимости от региона, представляется целесообразным применение представленного метода расчёта зданий, учитывающего региональный характер воздействия.

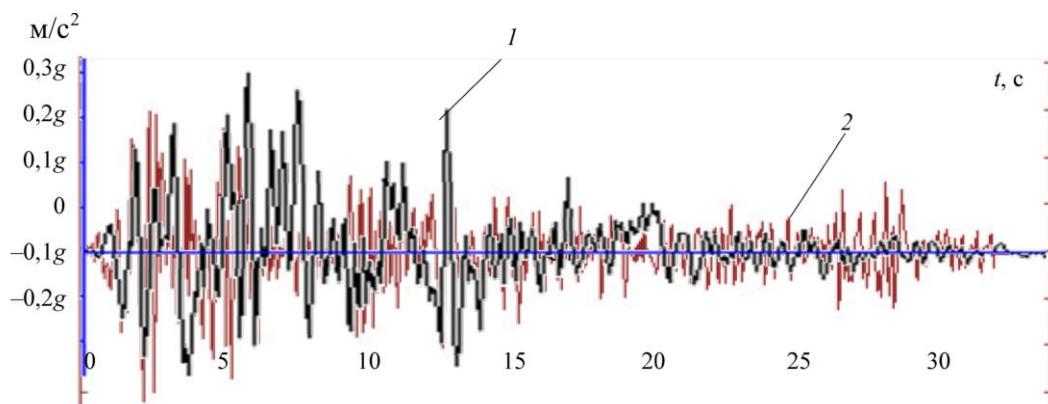


Рис. 1. Акселерограммы: 1 – синтезированная акселерограмма при сейсмическом воздействии с параметрами  $a_{\max} = 0,3g$ ,  $T_j = 0,4$ ,  $\Delta t = 0,01$ ,  $\xi = 0,05$ ; 2 – запись акселерограммы землетрясения с магнитудой  $M = 6,7$

**Крутящий момент здания:** Многоэтажные здания относятся к особо ответственным, поэтому при проектировании таких зданий в сейсмоопасных районах необходимо выполнять расчёты на динамические воздействия с применением имеющихся записей сейсмических воздействий. При отсутствии таких записей расчёты выполняют с применением синтезированных акселерограмм, количественные параметры которых (максимальные и расчётные ускорения колебаний, преобладающие периоды и др.) соответствуют данной территории.

Под воздействием сейсмической волны здание получает горизонтальные и вертикальные линейные смещения, а также крутящий момент. Эти перемещения связаны, и даже в простейшем случае для их определения необходимо решить три совместных дифференциальных уравнения движения в частных производных. Но эту задачу можно упростить, если разложить бегущую волну на две составляющие – симметричную и обратно симметричную. Тогда от симметричной волны будут возникать только поступательные вертикальные смещения здания, а от обратно симметричной – только повороты здания, т.е. произойдёт разделение связанных уравнений движения.

Дифференциальное уравнение вращательного движения в матричной форме для единичного воздействия можно записать в виде уравнения (1), предложенного А.А. Яворским и Б.М. Детлаф в работе [5]:

$$[I_0] \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} + [r_{11}] \bar{\gamma} = \left[ 1 \left( \frac{b}{2} - V_t \right) \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  – матрица моментов;  $r_{11}$  – матрица единичных реакций;  $\gamma$  – угол

поворота здания;  $b$ -ширина здания; скорость распространения сейсмической волны.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{I_0 * \omega_i^2} * \left[ b * \left( \frac{1 - \cos 2\omega_i t}{2} \right) - V * \left( t - \frac{\sin \omega_i t}{\omega_i} \right) \right], \quad (2)$$

$\omega_i$  -  $i$ -ая частота свободных вращательных колебаний здания;  $t$  – время сейсмического воздействия;  $V$  – скорость перемещения сейсмических волн под зданием.

Уравнение (2) определяет угол поворота здания. В интегральной форме формулу (2) можно представить в виде:

$$\bar{\gamma}_i = \int_0^t \frac{1}{I * \omega_i^2} \left[ \frac{b(1 - \cos \omega_i t)}{2} - V \left( t - \frac{\sin \omega_i t}{\omega_i} \right) \right] \ddot{\gamma}(t_1 - t) dt \quad (3)$$

Решение уравнения (3) позволит оценить последствия динамических воздействий, возможных при землетрясениях различной интенсивности, с учётом грунтово-геологических условий.

Сейсмическое воздействие здесь описывается синтезированными акселерограммами, полученными при помощи компьютерной программы, описанной в работе [6], в основе которой лежит модель сейсмических колебаний, воздействие которых произведено в виде нестационарных случайных процессов. Преимущество метода случайных колебаний состоит в возможности получить аналитические оценки реакции систем в зависимости от параметров воздействия, а по ним оценить надёжность того или иного конструктивного решения здания. Наибольший интерес в данном случае представляют параметры откликов при сильных землетрясениях с заданными параметрами (максимальным ускорением колебания грунта, соответствующим 8-балльному землетрясению по шкале Медведева [7], преобладающим периодом колебаний, продолжительностью интенсивной фазы землетрясения и др.). Случайный нестационарный процесс в программе задан с корреляционной функцией:

$$K(\tau) = e^{-\alpha_i |\tau|} * \cos \omega_i \tau, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – параметр, характеризующий быстроту убывания корреляционной связи между ординатами случайного процесса при увеличении разности аргументов этих ординат  $\tau$ .

Математическое построение модели сейсмического воздействия здесь произведено на основе модели сейсмического движения грунта, предложенной в виде множества нестационарных гауссовских мультипликативных случайных процессов [8]:

$$Y = (t, \omega, \omega_j) = A(t, \omega_j) * \sigma(\omega_j) * \varphi(t, \omega_j), \quad (5)$$

где  $A(t, \omega_j) = A_j t e^{-\varepsilon_i t}$  – огибающая функция, задаваемая при фиксированных  $\omega_j$  в виде импульса Берлаге и нормированная так, что

$$|A_{\max}| = 1;$$

$\sigma(\omega_j)$  – среднеквадратическое значение ускорения колебания грунтов;

$\varepsilon_i$  – параметр, определяющий форму временной огибающей генерируемого воздействия,  $\varphi(t, \omega_j)$  – нормированный (единичный) стационарный гауссовский процесс, характеризуемый корреляционной функцией (4).

На рис. 2 показана усреднённая акселерограмма по 20 реализациям.

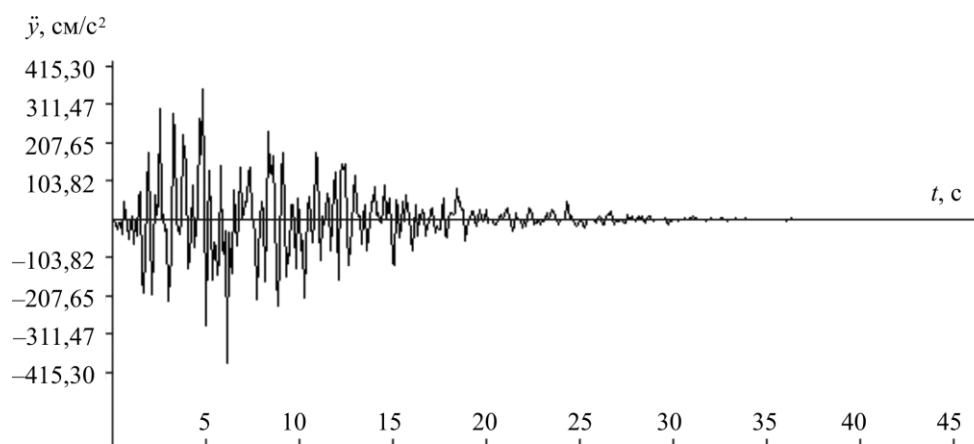


Рис. 2. Усреднённая псевдоакселлерограмма с заданными  
характеристиками:

$$\ddot{y} = \frac{300 \text{ см}}{\text{с}^2}, \quad \omega_j = 20,93 \text{ Гц}$$

Для определения влияния скорости колебаний грунтов на угол вращения здания были проведены расчёты на сейсмические воздействия с использованием зависимости (3) при заданных максимальных ускорениях колебаний грунтов 100, 200, 300, 400 и 500 см/с<sup>2</sup> с преобладающими частотами колебаний  $\omega_j = 20,93$  и  $12,56$  Гц. Результаты расчётов приведены на рис. 3, *a, б*.

Графики на рис. 3 получены при воздействии простых волн с ускорениями  $\ddot{y} = \ddot{y}_0 \frac{T}{b}$  при заданных размерах здания.

$\ddot{y}$  – ускорение волны, с которым она пройдёт под всем зданием за время, равное основному периоду  $T$  колебаний.

Величина кручения здания зависит от физико-механических характеристик грунтов, которые учитываются через коэффициент  $\varepsilon_i$ . При увеличении ускорений колебаний грунтов увеличивается момент кручения здания, при этом уменьшается угол вращения. Большие скорости сейсмических волн, характерные скальным основаниям, уменьшают углы вращения здания. Так, при ускорениях  $\ddot{y} = 500 \text{ см/с}^2 \frac{T}{b} = 2,8$  а при  $\ddot{y} = 100 \text{ см/с}^2 \frac{T}{b} = 6,2$ , т.е. угол

наклона здания с увеличением ускорений в 5 раз уменьшается почти в 2,5 раза. Исследование влияния преобладающего периода колебаний грунтов на кинематические характеристики здания (см. рис. 3) показал, что смещение колебаний в область длиннопериодных приводит к затяжному смещению, что увеличивает вероятность опрокидывания.

Проектирование с учётом общей устойчивости и записей сейсмических воздействий может дать целостную картину поведения зданий при сейсмических воздействиях, что обеспечит большую надёжность.

**Общая устойчивость зданий:** Потеря общей устойчивости здания может произойти по двум формам. Если начальный угол наклона здания  $\gamma_0$  равен нулю, то наибольшая вертикальная нагрузка, вызывающая потерю устойчивости, будет определяться как для прямолинейного стержня.

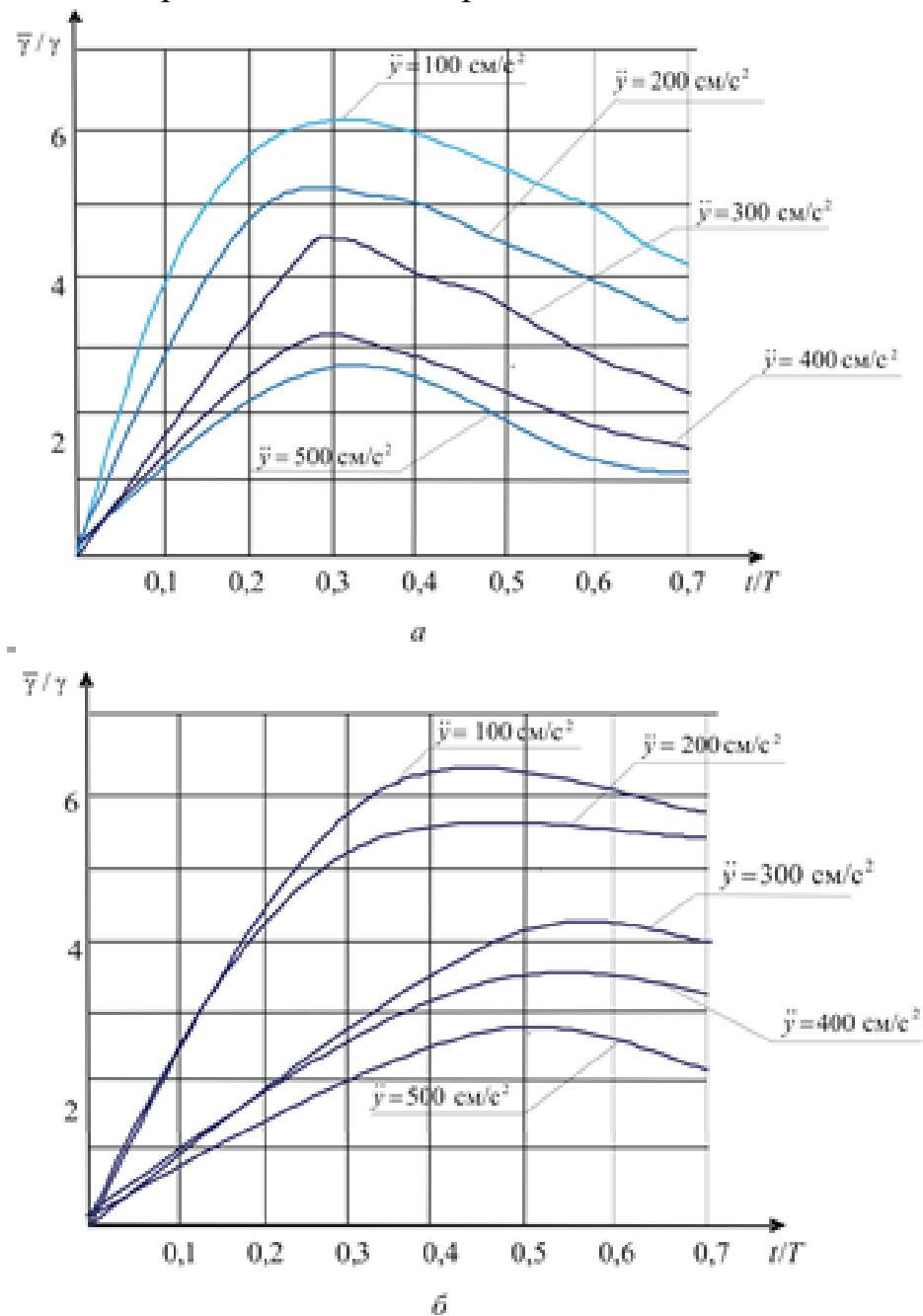


Рис. 3 График изменения угла наклона здания при сейсмических воздействиях:

$$a - \omega_j = 20,93 \text{ Гц}; b - \omega_j 12,56 \text{ Гц}$$

Вводя в расчёт упругое основание, получим другую форму потери устойчивости (рис. 3, б).

Для определения нагрузки, при которой теряется устойчивость системы «здание –упругое основание», рассмотрим два возможных условия равновесия [9]. Первое уравнение равновесия соответствует прямолинейной форме и записывается как проекция всех сил на вертикаль:

$$\sum P_i = \int_{-b/2}^{b/2} pdx, \quad (6)$$

где  $p$  – реакция основания на 1 п.м. ширины фундамента.

Второе уравнение соответствует второй форме потери устойчивости, когда вертикальная ось здания имеет отклонение на угол  $\gamma$  и выражает равенство нулю моментов всех сил, приложенных к системе:

$$\sum P_i = (\gamma + \gamma_0)H_i + \int_{-b/2}^{b/2} pxdx = \beta H \alpha^2, \quad (7)$$

где  $\beta H \alpha^2$  -момент, характеризующий устойчивость системы, возникающий в основании при отклонении оси здания на угол  $\gamma$  в результате потери устойчивости.

При некоторых преобразованиях уравнения (5) можно получить ряд в виде:

$$P = P_0 \sqrt{1 - \left( \frac{4\beta}{Eb} * \frac{H}{b} \gamma \right) + \dots}, \quad (8)$$

$P$  – нагрузка с учётом потери устойчивости системы;  $P_0$  – нагрузка без учёта раскачивания здания, вызванного сейсмическими волнами;  $E$  – модуль деформации основания;  $\beta$  – характеристика восстановливающего момента [10].

Формула (6) позволяет оценить влияние угла  $\gamma$  наклона здания, возникающего в результате бегущей сейсмической волны на снижение той нагрузки, при которой произойдёт потеря устойчивости здания. В данном случае такой нагрузкой является собственный вес здания. Потеря устойчивости зависит от многих параметров. Рассмотрим влияние каждого из них в отдельности.

На рис. 4 показано снижение  $P$  в зависимости от угла наклона системы  $\gamma$  высотой 30 м, что соответствует 8-этажному зданию. Из графика видно, что в результате раскачивания здания под воздействием сейсмических волн величина критической нагрузки, при которой наступает потеря устойчивости здания, снижается до 1,5 раз при  $E = 100 \text{ кгс/см}^2$  и в 10 раз при  $E = 10 \text{ кгс/см}^2$ .

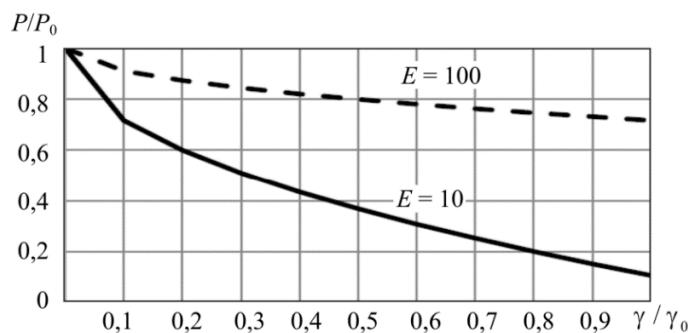


Рис. 4. Графики зависимости снижения критической нагрузки от угла наклона здания и модуля деформации  $E$ .

На рис. 5 показаны графики зависимости критической нагрузки от высоты здания и модуля деформации грунта. Так, сравнение показателей снижения критической нагрузки при высотах здания 60 м (16 этажей) при  $E = 100$  кгс/см<sup>2</sup> показало, что при увеличении высоты здания на 55 м нагрузка возрастает в 1,3 раза. Но если модуль упругости грунта составляет примерно 10 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует пористым глинам, суглинкам, пылеватым пескам, то при высоте 50 м и более нагрузка стремится к нулю.

На рис. 5 показан график изменения коэффициента соотношения  $P/P_0$  в зависимости от отношения высоты здания  $H_k$  ширине его фундамента  $b$ .

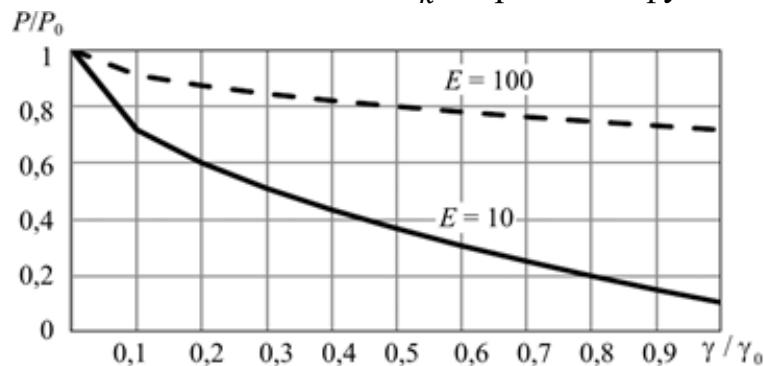


Рис. 5. Графики снижения нагрузки в зависимости от угла наклона

На рис. 6 показаны графики, соответствующие углам раскачивания здания начиная от малого угла раскачивания  $\gamma = 0,001$  до большого угла  $\gamma = 0,01$ . С увеличением угла наклона здания происходит существенное снижение нагрузки  $P$ .

Например, при  $H/h = 7$  это соответствует 7–8-этажному зданию, коэффициент устойчивости при  $\gamma = 0,001$  снижается почти в 10 раз.

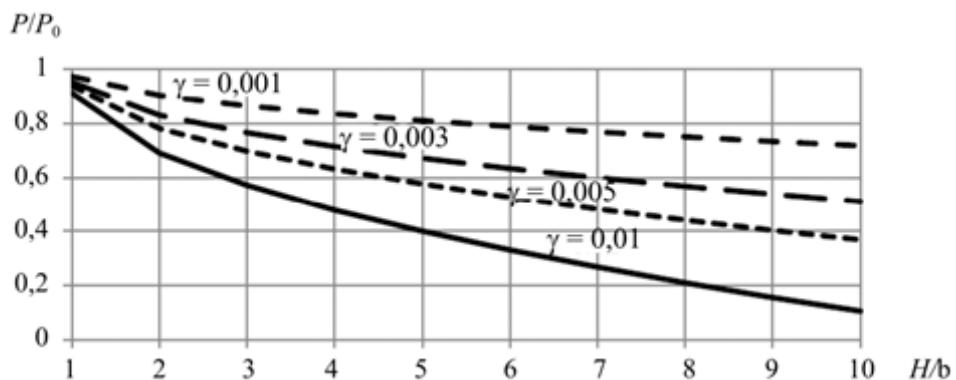


Рис. 6. Графики снижения нагрузки в зависимости от угла наклона  
Другим очень важным параметром является  $E$  – модуль деформации грунта. С увеличением  $E$  коэффициент  $P$  возрастает. На рис. 7 построены графики изменения  $P$  в зависимости от величины модуля при угле  $\gamma = 0,001$ .

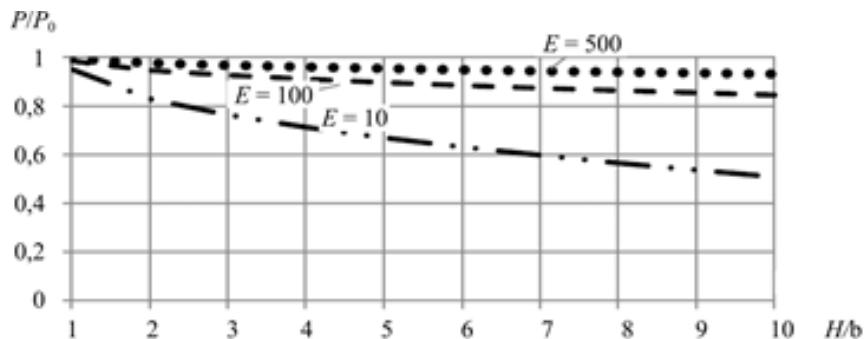


Рис. 7. График зависимости увеличения нагрузки на здание при сейсмических воздействиях в зависимости от величины модуля упругости грунта  $E$

При модуле деформации  $E=500$  кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует скальному основанию, почти не происходит снижения коэффициента запаса. Но при  $E = 10$  кгс/см<sup>2</sup> (водонасыщенный мелкий песок) коэффициент запаса уменьшается в 2 раза.

Таким образом, высота здания и модуль деформации грунта являются основными параметрами, от которых зависит снижение потери устойчивости здания.

**Выводы:** Сложное поведение грунтов при землетрясениях связано с их неоднородным строением, пористостью, водонасыщенностью и другими физико-механическими характеристиками. Структура среды определяет характер деформации грунтов, а также нелинейный характер поведения при сейсмических воздействиях. Разрушение сейсмостойких зданий при землетрясениях чаще всего связано с неблагоприятным поведением рыхлых грунтов и основания, которые вызывают такие эффекты, как усиление колебаний грунтов на определённых

частотах, внезапная частичная потеря прочности, разжижение. Поэтому аналитическое рассмотрение особенностей взаимодействия здания и основания является важной задачей, которую необходимо развивать.

Научная новизна работы заключается в разработке методики расчёта зданий с применением компьютерной программы на сейсмические воздействия с учётом мощности рыхлого слоя, а также его физико-механических характеристик.

Для наглядности в исследованиях реализована предложенная методика на примере расчёта здания высотой 50 м. Показано, каким образом и какие параметры оказываются существенными при расчётах зданий на слабых деформируемых грунтах.

### Литературы:

- 1 Atico, Peru Mw8.4 Earthquake on June 23, 2001 / Ed. Curtis L. Edwards. – Reston, Vir- ginia: ASCE, TCLEE. – 2002.
2. Баньковский Л. В. 1 // Опасные ситуации природного характера: Учебно-методическое пособие. — 2-е. — Соликамск: РИО ГОУ ВПО «СГПИ», 2008. — С. 49—55. — 230 с. — ISBN 5-89469-002-1.
3. Cucci L., Alfonsi L., Villani F. A new photographic dataset of the co seismic geological effects originated by the Mw 5.9 Visso and Mw 6.5 Norcia earthquakes (26th and 30th October 2016, Central Italy) // Emergeo Working Group, Technical Report. – October 2017. – № 38. DOI: 10.13140/RG.2.2.36418.07368.
4. Strong ground motion from the Mochoacan, Mexico, Earthquake / J.G. Anderon, J.N. Brune, J. Prince, S.K. Singh, R. Quaas, M. Onate // Science (American Association for the Advancement of Science). – 1986. – № 233 (4768): 1043. DOI: 10.1126/science.233.4768.1043.
5. Татевося Р.Э., Мокрушина Н.Г. Использование современного сейсмического со- бытия для оценки магнитуды исторического землетрясения: глубокофокусное Карпатское землетрясение 26 октября 1802 года // Физика Земли. – 2004. – № 6. – С. 14–25.
6. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов Б.В. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 31–42.
7. Тяпин А.Г., Топорков А.С., Михайлов В.С. Применение комбинированного асим- птотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: результаты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – №4. – С. 32–43.
8. Мкртычев О.В., Джинчвелашивили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М.: МГСУ, 2012. – 192 с.
9. Озмидов О.Р. Оценка риска сейсмического разжижения грунтов

геологического основания объектов олимпийского строительства в г. Сочи // Вестник Российской академии естественных наук. – 2014. – № 1. – С. 48–54.

10. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. – 2nd ed. – University Science Books, 2002.

11. Abe K. Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980 // Earth Planet. Inter. – 1981. – Vol. 27. – P. 72–92.

12. Safarov N.M. M. Kabulov Matematical model of the process of vertical drying of raw cotton in the hot airflow. The Elektrochemikal Society 234rd ECS Meeting with SOFC –XVIII Boston, MA\*May 28-june 2, 2023 Abstract Submission Extended Deadiine: December 16. ETESD 2022 IOP Publishing IOP Conf. Series. Earth and Environmental Science <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2388/1/012028>.

13. Nazirjon Safarov, Akbar Abrorov, and Laziz Abdullaev Dynamik analiysis of physical and mechanical forces of acting on the needle of a shoe sewing mashine in the process of sewing leather. AAPM-2023 Journal of Phvsics: Conference Series. 2573 012036 View the article online for updates and enhancements 244<sup>th</sup> ECS Meeting Gothenburg, Sweden. Oct.8-12.2023 Register and join us in advancing science 2573(2023) 012036 doi 10.1099/1742-6596/2573/1/012036.