

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ДВУХЭТАЖНОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА ДЛЯ СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНОВ

И. В. Ненахова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Информация о статье      обзор

## Аннотация

*В северных районах РФ (Томская, Новосибирская и др. области) разработан и реализован проект энергоэффективного двухэтажного здания с металлическим каркасом. Во многих регионах Кыргызской Республики подобная энергоэффективность особенно актуальна. Однако внедрение в практику строительства зданий подобного типа в условиях горной местности требует дополнительных исследований по оценке прочности и деформационных характеристик с позиции сейсмобезопасности. 1. Разработана и реализована в натурном виде в рамках теории подобия и размерности модель энергоэффективного каркасного здания, пригодная для испытаний на сейсмоплатформе. 2. Составлена схема загрузки с учетом статического приложения нагрузок и сейсмического воздействия. 3. Получены конкретные численные результаты. Показано, что каркас здания удовлетворяет требованиям сейсмобезопасности. Рассмотрена задача моделирования и расчета двухэтажного энергоэффективного жилого здания для сейсмоопасных районов. Представлена спроектированная и выполненная в металле модель исследуемого здания, проведена проверка устойчивости сооружения на различные виды нагрузок. Результаты исследования подтверждают возможность реализации проекта для строительства в сейсмоопасных районах.*

Ключевые слова:            модель, сейсмика, разрушение, устойчивость, каркас.

## Содержание

1.	Введение	54
2.	Постановка задачи	54
3.	Критериальность сейсмических воздействий	55
4.	Заключение	57

## 1. Введение

Ежедневно в разных точках мира происходят катаклизмы техногенного и природного характера, одними из которых являются землетрясения. Уровень сейсмического риска возрастает наряду с появлением новых строительных технологий. Рост и развитие населенных пунктов сопровождается повышением их уязвимости к воздействию стихийных бедствий и техногенных катастроф. Повреждения зданий, сооружений и систем жизнеобеспечения могут привести к резкому увеличению социальных и экономических потерь. Поэтому проектирование сейсмостойких зданий и сооружений должно проводиться [1] на основе ожидаемых сейсмических воздействий, выраженных в параметрах сейсмического движения грунта [2–5].

Концепция сейсмоустойчивого строительства заключается в повышении несущей способности конструкции, использование материалов, обеспечивающих минимизацию их расходов. Масса сооружения оказывает существенное влияние – чем она меньше, тем объект является более устойчивым. Кроме этого, исходя из опыта предыдущих землетрясений, специалистами сделан ряд выводов [1]:

- каркасные и каркасно-монолитные здания обладают значительной сейсмостойкостью;
- монолитные и крупнопанельные ограждающие конструкции на порядок выше по сейсмостойкости блочной или кирпичной кладки.

## 2. Постановка задачи

Рассматривается задача моделирования энергоэффективного двухэтажного каркасного здания для сейсмоопасных районов с расчетом несущего каркаса на сейсмическое воздействие.

При моделировании объекта (рисунок 1) [6] составлялись критерии подобия, равенство которых обеспечивало подобие модели и натуре.

При проектировании модели были использованы следующие критерии механического подобия [7, 8]:

- 1) условие равенства максимальных относительных деформаций без ограничения жесткости системы:

$$\varepsilon_M \max = \varepsilon_H \max, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_M \max$  и  $\varepsilon_H \max$  – наибольшие относительные деформации в подобных точках модели и реального элемента конструкции.

- 2) условие одинаковой жесткости без ограничения величин максимальных относительных перемещений:

$$\frac{f_M}{I_M} = \frac{f_H}{I_H}, \quad (2)$$

где  $f_M$  и  $f_H$  – прогибы в подобных точках;  $I_M$  и  $I_H$  – пролеты модели и реальной конструкции.

Уравнение (2) дает возможность определить характеристику жесткости реальной конструкции по результатам исследования жесткости модели.



Рисунок 1. Модель металлического каркаса

В связи с тем, что конечной задачей эксперимента является изучение работы модели в процессе испытания на сейсмоплатформе, то в качестве основного критерия механического подобия было принято равенство относительных деформаций на нижней поверхности модели и реальной конструкции [6]. Погрешность между максимальными относительными деформациями (3) на нижней грани реальной конструкции и модели, которые определены по формулам (4), составляет 2,5%.

Относительная погрешность по условию равенства прогибов реальной конструкции и опытной модели составляет 7,5%.

### 3. Критериальность сейсмических воздействий

Сложные конструктивные решения современных зданий и сооружений, вызванные архитектурно-планировочными требованиями, необходимостью размещать тяжелое оборудование, высотой зданий, большими пролетами, изменяющимся по высоте объемом зданий и т. д., требуют формирования расчетных схем, отвечающих их реальной работе при сейсмических воздействиях.

В таких случаях создаются расчетные схемы, обладающие значительным числом степеней свободы даже при принимаемых упрощениях и, следовательно, формируются разрешающие системы уравнений с колоссальным числом неизвестных. В решении таких систем уравнений нельзя обойтись без применения современной вычислительной техники и специализированных программ. В настоящее время при решении строительных задач с помощью компьютерной техники наиболее распространен метод конечных элементов.

Сказанным предполагается введение в рассмотрение скоростей  $\frac{dZ}{dt}$  и ускорений  $\frac{d^2Z}{dt^2}$  перемещений.

Возникающие при этом инерционные силы будут определяться следующим образом:

$$I(t) = m \frac{d^2Z}{dt^2}, \quad (6)$$

где  $m$  – масса,  $Z$  – перемещение.

Очевидно, что силы инерции не могут считаться пренебрежимо малыми по сравнению с нагрузками на систему и силами упругости, поэтому их следует учитывать при составлении условий равновесия, которые принимают вид дифференциальных уравнений в частных производных.

Для расчета сейсмостойкости рассматриваемой модели каркасного здания был привлечен метод конечных элементов в программном комплексе SCAD, который реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, подбор арматуры железобетонных конструкций, проверку несущей способности стальных конструкций [9]. Ниже приведены лишь фактически использованные возможности комплекса SCAD при проверке рассматриваемой конструкции.

Для исследований на динамические нагрузки были подготовлены данные о вариантах динамических нагрузений и заданы для каждого из этих нагружений набор характеристик соответствующего воздействия, порождающего колебания системы. Учет инерционных сил связан с узловыми сосредоточенными массами и массами, расположенными на элементах системы. Направление действия инерционных сил должно соответствовать поступательным динамическим степеням свободы, отвечающим граничным условиям и признаку схемы. Допускается использование различных инерционных характеристик в разных нагружениях (например, исследуется движение системы с временными нагрузками и без).

При анализе инерционных свойств узлов в соответствующем окне задавалась масса и направление, в котором учитывались создаваемые ею силы инерции. Учет масс в элементах дает возможность принять во внимание распределенные и сосредоточенные массы; указывались значения массы и ее привязка путем ссылки на статическое нагружение. При этом все местные нагрузки интерпретируются как значения масс, расположенные на элементах. Может показаться, что присоединенные нагружения будут участвовать в расчете дважды – и как статические, и как динамические, но это не так, поскольку в динамическом нагружении они только формируют инерционные силы, не действуя на конструкцию непосредственно.

Характеристики динамических воздействий назначались в группе динамических нагрузок, где сейсмическое воздействие выбиралось по СП 14.13330.2011 [10] (рисунок 2), поскольку СП 14.13330.2014 пока не вступил в силу.

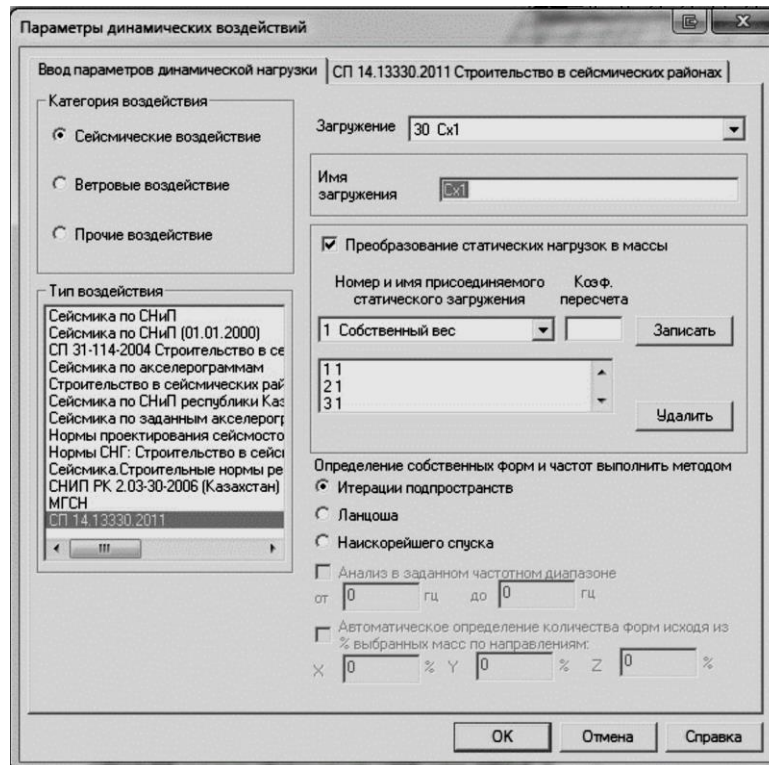


Рисунок 2. Окно «параметры динамических воздействий»

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещений и поворотов узлов расчетной схемы. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода – система представлена в виде набора тел стандартного типа (стержней, пластин, оболочек и т.д.), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам.

Тип конечного элемента определялся его геометрической формой, правилами, определяющими зависимость между перемещениями узлов конечного элемента и узлов системы, физическим законом, связывающим внутренние усилия и внутренние перемещения, и набором параметров (жесткостей), входящих в описание этого закона и др.

Следующим этапом является преобразование имеющихся нагрузок с учетом коэффициента пересчета.

Преобразование статических нагрузок в массы здесь осуществляется следующим образом:

- все местные нагрузки на элементы приводятся к узловым;
- из полученных приведенных узловых сил остаются только узловые нагрузки по направлению  $Z$ ;
- знак вычисленной нагрузки игнорируется.

Основная система метода перемещений выбирается путем наложения в каждом узле всех связей, запрещающих любые узловые перемещения. Условия равенства нулю усилий в этих связях представляют собой разрешающие уравнения равновесия, а смещения указанных связей – основные неизвестные метода перемещений.

Непосредственно для сейсмических нагружений во вкладке «СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах» задаются следующие данные (рисунок 3).

1. Число учитываемых форм собственных колебаний. Выбор числа учитываемых форм зависит от конкретной задачи. Необходимо учесть наиболее опасные формы, например, крутильные, которые могут вызвать обрушение сооружения. Имеется эмпирическое правило – для системы с  $n$  динамическими степенями свободы надежно вычисляются примерно  $n/2$  первых частот и форм собственных колебаний. Бывают случаи, когда первые собственные частоты связаны с формами колебаний, которые не возбуждаются действующей нагрузкой. Это заставляет увеличивать  $n$ .

2. Направление вектора сейсмического воздействия. Указываются косинусы углов с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Например, при  $x = 1$ ,  $y = 0$  и  $z = 0$  сейсмическое воздействие будет направлено вдоль оси  $x$ .

3. Коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (согласно табл. 3 СП 14.13330.2011). Выбирается тип сооружения из всплывающего списка.

4. Коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения – в соответствии с табл. 5 СП 14.13330.2011.

5. Коэффициент, зависящий от района строительства – согласно табл. 4 СП 14.13330.2011. Выбирается из всплывающего списка.

6. Коэффициент, учитывающий рассеивание энергии колебаний – в соответствии с табл. 6 СП 14.13330.2011.

7. Сейсмичность – задается сейсмичность площадки строительства.

8. Категория грунта. Согласно нормативным документам при «плохих» грунтах может производиться корректировка сейсмичности площадки строительства.

9. Выбирается приемлемый график для коэффициента динамичности. Для расчета по СП необходимо выбрать «по нормам». Кроме того, есть возможность загрузить свои графики для коэффициента динамичности.

10. Учет близости частот – при необходимости учета близких по значениям частот собственных колебаний системы.

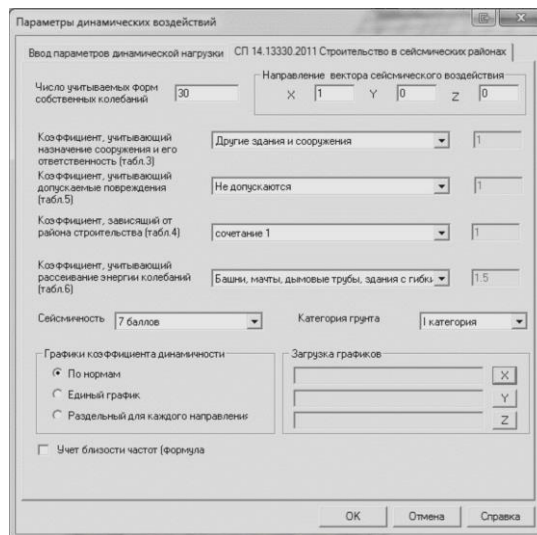


Рисунок 3. Вкладка «СП 14.13330.2011 Строительство в сейсмических районах»

Кроме этого в ЭВК SCAD [9] предусмотрена возможность расчета на сейсмические воздействия по акселерограммам.

В результате выполненных расчетов можно определить формы собственных колебаний системы, а также деформации схемы и усилия или напряжения в ее элементах. Это позволит выполнить прочностные расчеты сечений всех элементов, а также оценить деформативность системы в сравнении с требованиями нормативных документов.

## 4. Заключение

1. Разработана и реализована в натурном виде в рамках теории подобия и размерности модель энергоэффективного каркасного здания, пригодная для испытаний на сеймоплатформе.

2. Составлена схема загрузки с учетом статического приложения нагрузок и сейсмического воздействия.

3. Получены конкретные численные результаты. Показано, что каркас здания удовлетворяет требованиям сейсмобезопасности.

## References

### Литература

- [1]. Саркисов Д. Ю. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Томск: Издательство ТГАСУ, 2015. 156с.
- [2]. Рудаев Я.И., Китаева Д.А., Мамадалиева М.А. Моделирование деформационного поведения горных пород // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 816-822.
- [3]. Dovgan V.I., Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. About structure formation self-organization at loading of

- [1]. Sarkisov D. Yu. Seysmostoykost zdaniy i sooruzheniy. Tomsk: Izdatelstvo TGASU. 2015. 156s.
- [2]. Rudayev Ya.I., Kitayeva D.A., Mamadaliyeva M.A. Modelirovaniye deformatsionnogo povedeniya gornyx porod // Zapiski Gornogo instituta. 2016. T. 222. S. 816-822.
- [3]. Dovgan V.I., Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I. About structure formation self-organization at loading of quasibrittle materials // Proceeding of the XXXIII International Summer School-Conference "Advanced

- quasibrittle materials // Proceeding of the XXXIII International Summer School-Conference "Advanced problems in mechanics" (APM'2005). St.Petersburg: Polytechnical Publishing House. 2005. Pp. 61-66.
- [4]. Mrdak I., Rakočević M., Žugić L., Usmanov R., Murgul V., Vatin N. Analysis of the influence of dynamic properties of structures on seismic response according to Montenegrin and European regulations // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 633-634. Pp. 1069-1076.
- [5]. Chernysheva N.V., Kolosova G.S., Rozin L.A. Combined Method of 3d Analysis for Underground Structures in View of Surrounding Infinite Homogeneous and Inhomogeneous Medium // Magazine of Civil Engineering. 2016. N. 2. Pp. 83-91.
- [6]. Ненахова И.В., Криулин Е.В. К задаче о моделировании и расчете двухэтажного энергоэффективного жилого дома для сейсмоопасных районов // Сборник материалов IX Международной конференции молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях». Бишкек: Издательство НС РАН, 2017. С. 291-296.
- [7]. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [8]. Бокарев С.А., Ефимов С.В. Вопросы подобия усиленных железобетонных балок при экспериментах на уменьшенных масштабных моделях // Наукоеведение. 2014. № 5. С. 1–9.
- [9]. Федоров М.П., Тананаев А.В., Лалин В.В., Константинов И.А., Чусов А.Н., Лалина И.И. Информационно-компьютерные технологии в строительстве. Применение программы SCAD для решения задач динамики сооружений / Учебно-методический комплекс. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. 230 с.
- [10]. Строительные нормы и правила: Строительство в сейсмических районах: СП 14.13330.2011. Введ. 20.05.2011. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 167 с. Лашков Г.А. Запасы и проблемы пресной воды в мире // Всероссийская научно-техническая конференция. Москва, 2011. С. 306-309.
- problems in mechanics" (APM'2005). St.Petersburg: Polytechnical Publishing House. 2005. Pp. 61-66.
- [4]. Mrdak I., Rakočević M., Žugić L., Usmanov R., Murgul V., Vatin N. Analysis of the influence of dynamic properties of structures on seismic response according to Montenegrin and European regulations // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 633-634. Pp. 1069-1076.
- [5]. Chernysheva N.V., Kolosova G.S., Rozin L.A. Combined Method of 3d Analysis for Underground Structures in View of Surrounding Infinite Homogeneous and Inhomogeneous Medium // Magazine of Civil Engineering. 2016. N. 2. Pp. 83-91.
- [6]. Nenakhova I.V., Kriulin E.V. K zadache o modelirovanii i raschete dvukhetazhnogo energoeffektivnogo zhilogo doma dlya seysmoopasnykh rayonov // Sbornik materialov IX Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov «Sovremennyye tekhnika i tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh». Bishkek: Izdatelstvo NS RAN. 2017. S. 291-296.
- [7]. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. M.: Nauka. 1977. 440 s.
- [8]. Bokarev S.A., Efimov S.V. Voprosy podobiya usilennykh zhelezobetonnykh balok pri eksperimentakh na umenshennykh masshtabnykh modelyakh // Naukovedeniye. 2014. № 5. S. 1–9.
- [9]. Fedorov M.P., Tananayev A.V., Lalin V.V., Konstantinov I.A., Chusov A.N., Lalina I.I. Informatsionno-kompyuternyye tekhnologii v stroitelstve. Primneniye programmy SCAD dlya resheniya zadach dinamiki sooruzheniy / Uchebno-metodicheskiy kompleks. SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta. 2009. 230 s.
- [10]. Stroitelnyye normy i pravila: Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonakh: SP 14.13330.2011. Vved. 20.05.2011. – M.: OAO «TsPP». 2011. – 167 s.

***Ненахова, И. В., МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ДВУХЭТАЖНОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА ДЛЯ СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНОВ // Alfabuild. 2019. № 5 (12). С. 53-60.***

***Nenakhova, Irina, MODELING AND CALCULATION OF A TWO-STORED POWER-AND-EFFICIENT HOUSE FOR SEISMIC CONTROL AREAS. Alfabuild. 2019. 5 (12). Pp. 53-60. (rus)***

---

# MODELING AND CALCULATION OF A TWO-STORED POWER-AND-EFFICIENT HOUSE FOR SEISMIC CONTROL AREAS

Irina Nenakhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

---

Article info

review article

## Abstract

*In the northern regions of the Russian Federation (Tomsk, Novosibirsk and other regions), a project of an energy-efficient two-story building with a metal frame was developed and implemented. In many regions of the Kyrgyz Republic, such energy efficiency is particularly relevant. However, the introduction of the practice of building such buildings in mountainous terrain requires additional studies to assess the strength and deformation characteristics from the position of seismic safety. The problem of modeling and calculation of a two-storey energy-efficient residential building for seismically hazardous areas is considered. The model of the building under investigation designed and made in metal is presented, the stability of the structure is checked for various types of loads. The results of the study confirm the feasibility of the project for construction in seismically hazardous areas.*

Keywords:

model, seismic, destruction, stability, frame.

---

---

<sup>1</sup> Corresponding author

1. +79522023699, irina-nenahovav@mail.ru (Nenakhova Irina, undergraduate)