

ПРОЧИЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ / OTHER QUESTIONS RELATED TO CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2018.11.1>

Дударева М.С.

Аспирант, младший научный сотрудник,
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Работа выполнена при поддержке гранта №7.1524.2017/ПЧ.

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ СООРУЖЕНИЕ – ОСНОВАНИЕ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ, НОРМИРОВАННОМ НА 8 БАЛЛОВ

Аннотация

В статье рассматривается задача вероятностного расчета 9-ти этажного железобетонного здания, расположенного на грунтовой основе со случайными параметрами. Задача решается методом статистических испытаний, при котором проводится ряд численных испытаний системы сооружение – основание на действие землетрясения. В качестве расчетного сейсмического воздействия принимается набор синтезированных трехкомпонентных акселерограмм, воздействие представляется в виде нестационарного случайного процесса. Определяются вероятностные параметры закона распределения интенсивности напряжений в грунте. По полученным данным производится количественная оценка надежности системы.

Ключевые слова: надежность, случайный процесс, сооружение-основание, вероятность отказа, землетрясение.

Dudareva M.S.

Graduate student, Junior researcher,
Moscow State University of Civil Engineering

RELIABILITY OF SYSTEM CONSTRUCTION - FOUNDATION FOR 8 POINT RANDOM SEISMIC EXPOSURE

Abstract

The paper deals with probability calculation of a 9-storey reinforced concrete building located on a ground base with random parameters. The problem is solved by the method of statistical tests where a series of numerical tests of the system construction are the basis for the earthquake's impact. We adopted a set of synthesized three-component accelerograms as a calculated seismic effect. The effect is represented as a nonstationary random process. Probabilistic parameters of the stress intensity distribution in the soil are determined. The system reliability is quantitatively evaluated according to the received data.

Keywords: reliability, random process, construction foundation, probability of failure, earthquake.

Email авторов / Author email: marina8busalova@gmail.com

Грунтовой массив является достаточно неоднородной средой. Основные характеристики грунта в разных точках массива будут иметь случайные значения. Именно поэтому при решении задач о совместной работе сооружения с основанием правильно учитывать случайное распределение этих параметров, то есть расчеты необходимо проводить в вероятностной постановке. Кроме того, если говорить о расчетах на землетрясения, то сейсмическое воздействие необходимо представлять в виде нестационарного случайного процесса [5, 6, 7, 16].

Как отмечается в ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» для обработки данных испытаний зачастую используется нормальный закон распределения (1), (2), хотя другие законы (в частности логарифмически нормальный) также могут применять, но при наличии соответствующего обоснования [11]. Таким образом, при проведении исследования будем считать, что все характеристики грунта, принимаемые случайными, будут подчиняться нормальному закону распределения.

$$F(x) = \frac{1}{s_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2s_x^2}} dx \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{s_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2s_x^2}} \quad (2)$$

где $F(x)$ – функция распределения, $f(x)$ – плотность распределения, m_x – математическое ожидание случайной величины x , S_x – среднеквадратическое отклонение случайной величины x .

Грунтовой массив моделировался при помощи нелинейной модели Мора-Кулона [4, 8], случайными параметрами принимались E – модуль деформации, c – удельное сцепление и Φ – угол внутреннего трения. В результате анализа данных инженерно-геологических изысканий были определены вероятностные характеристики данных случайных

параметров. Математическое ожидание модуля деформации $m_E = 25$ МПа, среднее квадратическое отклонение - $s_E = 5$ МПа; математическое ожидание удельного сцепления $m_c = 34$ кПа, среднее квадратическое отклонение - $s_c = 6,8$ кПа; математическое ожидание угла внутреннего трения $m_\varphi = 23^\circ$, среднее квадратическое отклонение - $s_\varphi = 2,3^\circ$.

Расчетная схема представляет собой модель 9-ти этажного железобетонного здания, расположенного на грунтовом основании (рис. 1).

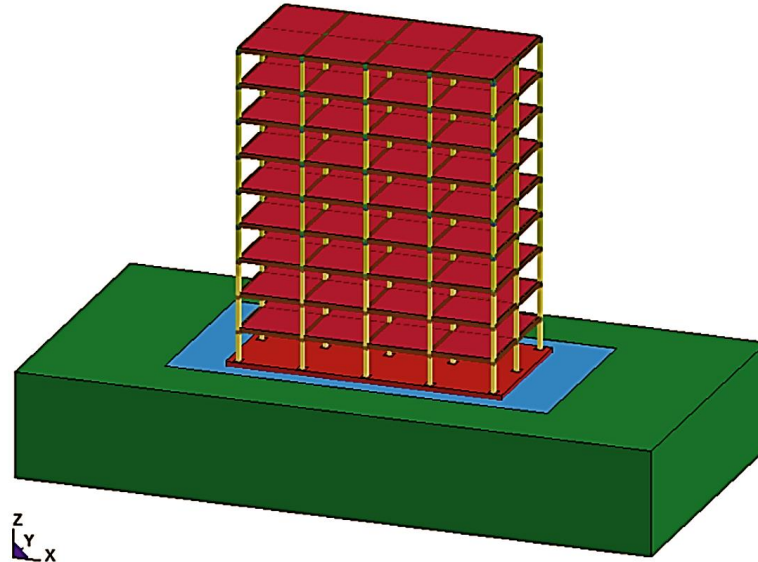


Рис. 1. - Расчетная схема 9-ти этажного железобетонного здания
Примечание: на рисунке грунт показан синим цветом, PML-слой - зеленым

При составлении расчетной схемы были учтены некоторые особенности корректного учета взаимодействия сооружения с основанием: совместная работа грунта и конструкции учитывается посредством методики SSI в соответствии с [15, 17], по границам грунта задан демпфирующий PML-слой, который поглощает «ложные» отраженные волны [12, 13], расчет производится прямым динамическим методом во временной области путем непосредственного интегрирования уравнения движения по явной схеме [1, 9].

Используя метод статистических испытаний было проведено 10 численных экспериментов. В качестве расчетных акселерограмм использовалось семейство реализаций с доминантной частотой 0,5 Гц с нормированием на 8 баллов. Расчет в каждом эксперименте проводился в два этапа. На первом этапе решалась статическая задача (учитывались только основные сочетания нагрузок), на втором этапе проводился динамический расчет на землетрясение с динамическими параметрами грунта [10, 14]. При динамическом расчете в качестве начального напряженно деформируемого состояния принималось то, которое было получено на первом статическом этапе.

Для анализа надежности рассматриваемого 9-ти этажного железобетонного здания построим гистограммы, плотность и функцию распределения значений интенсивности напряжений в грунтовом массиве. При испытании 10 зданий, расположенных на разных грунтах и посчитанных на разные сейсмические воздействия, полностью обрушилось только 2.

Значение интенсивности напряжений для каждого рассматриваемого испытания выбираем как максимальное из семейства кривых для элементов грунта. Аппроксимируем полученное эмпирическое распределение перемещений наиболее подходящим теоретическим, используя критерий максимального правдоподобия Пирсона.

По формулам (3), (4) определим моменты полученного эмпирического распределения:

$$m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0,2725 \text{ МПа} \quad (3)$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2}{n}} = 0,0949 \text{ МПа} \quad (4)$$

где m_x^* – математическое ожидание случайной величины, σ_x^* – среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Сначала выполним аппроксимацию интенсивности напряжений нормальным распределением (рис. 2) [2].

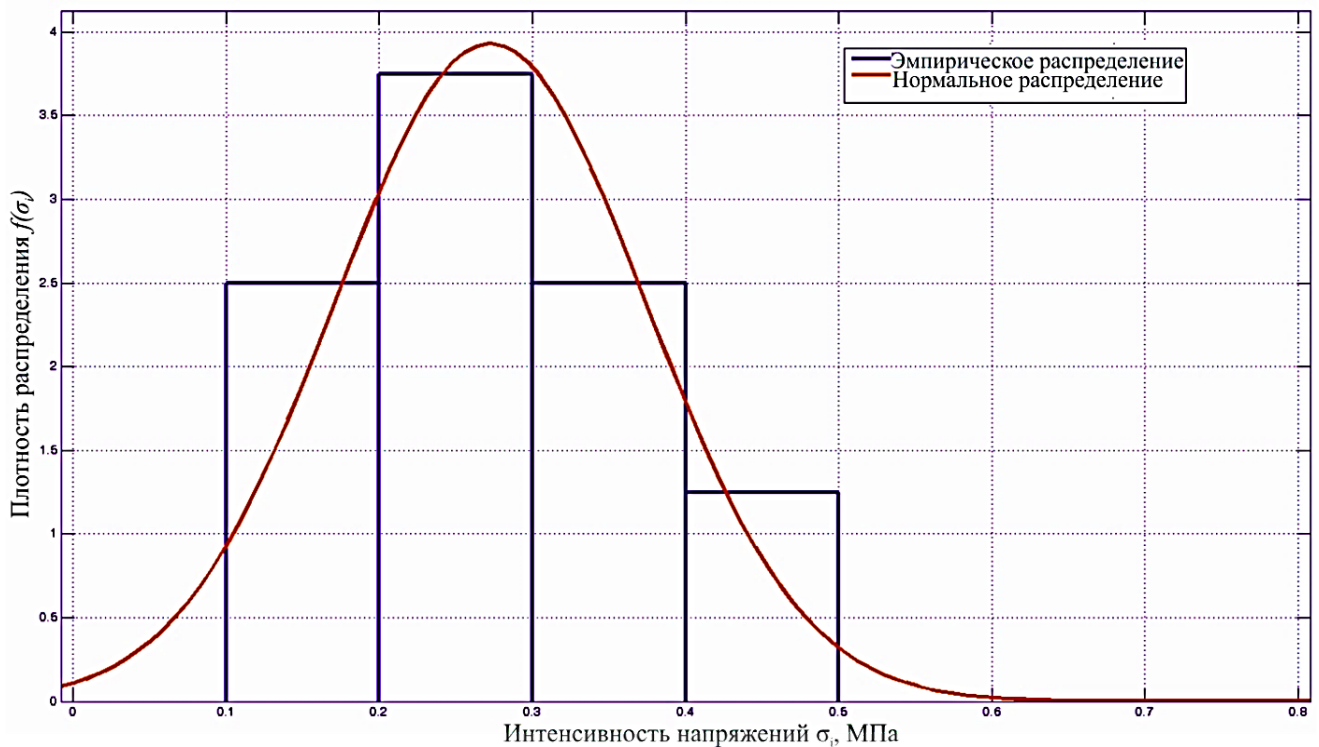


Рис. 2. - Аппроксимация распределения интенсивности напряжений σ_i в грунте нормальным распределением, МПа

С помощью критерия Пирсона проверим корректность применения нормального закона распределения для аппроксимации эмпирического распределения [2].

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^t \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 0,2193 \quad (5)$$

где m_i – число значений в i -ом разряде, n – общее число испытаний, p_i – теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -ый разряд.

В этом случае вероятность распределения интенсивности напряжений по нормальному закону будет равна $P=0,64$.

Далее выполним аппроксимацию распределения интенсивности напряжений в грунте при помощи закона распределения Вейбулла (6), (7) [2].

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 0 \\ b \cdot a^{-b} \cdot x^{b-1} \cdot \exp(-x/a)^b, & \text{при } x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 0 \\ 1 - \exp(-x/a)^b, & \text{при } x \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

здесь a – параметр масштаба, b – параметр формы кривой.

На рис. 3 показана аппроксимация σ_i распределением Вейбулла.

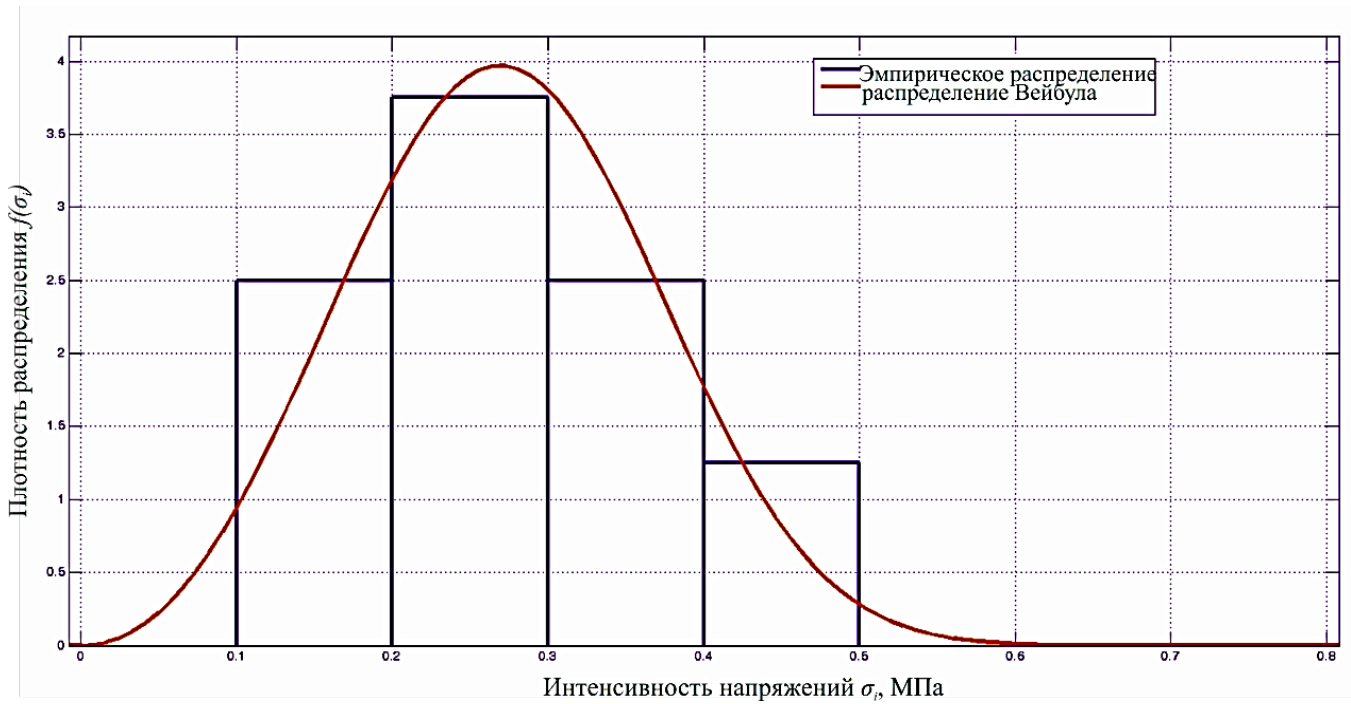


Рис.3 – Аппроксимация распределения интенсивности напряжений σ_i в грунте распределением Вейбула, МПа

По критерию Пирсона проверим корректность применения закона распределения Вейбула.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^t \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 0,1719 \quad (8)$$

В этом случае вероятность распределения интенсивности напряжений по закону распределения Вейбула будет равна $P=0,68$.

На рис. 4 приведена гистограмма эмпирического распределения случайных значений интенсивности напряжений и аппроксимация этого распределения распределением Гумбеля. Этот закон распределения является актуальным для случаев, когда анализируются максимальные значения величин, что и происходит в нашей задаче. Плотность распределения закона Гумбеля имеет вид [3]:

$$f(x) = \alpha \exp\{-\alpha(x-q) - \exp[-\alpha(x-q)]\} \quad (9)$$

Функция распределения определяется выражением:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-q)]\}, \quad (10)$$

где $\frac{1}{\alpha} = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, $q = m_x - m_y \left(\frac{1}{\alpha}\right)$, m_x и σ_x – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины; m_y и σ_y – определяются в зависимости от длины рассматриваемого ряда.

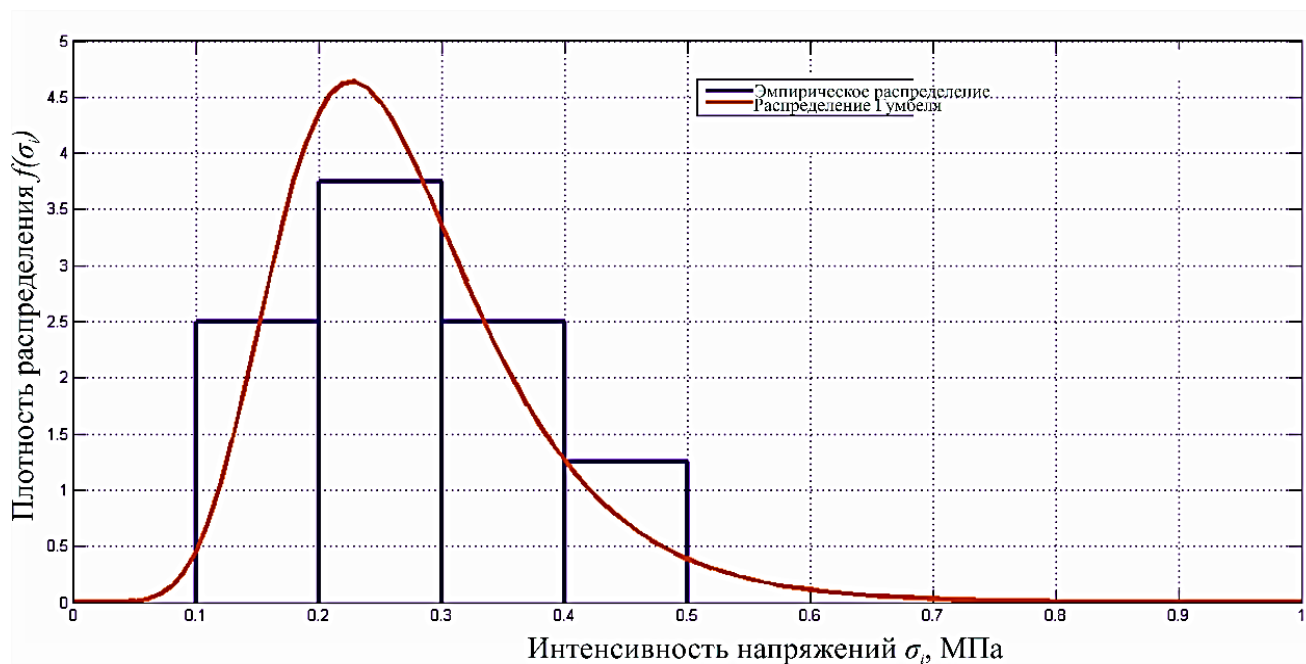


Рис. 4 – Аппроксимация распределения интенсивности напряжений σ_i в грунте распределением Гумбеля, МПа

Согласно критерию Пирсона корректность применения закона распределения по Гумбелю для аппроксимации эмпирического распределения.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i} = 0,4308 \quad (11)$$

Вероятность того, что перемещения распределены по закону Гумбеля будет равна $P=0,51$.

На рис. 5 для сравнения совместно показаны аппроксимации эмпирического распределения интенсивности напряжений в грунтовом массиве, о которых говорилось выше.

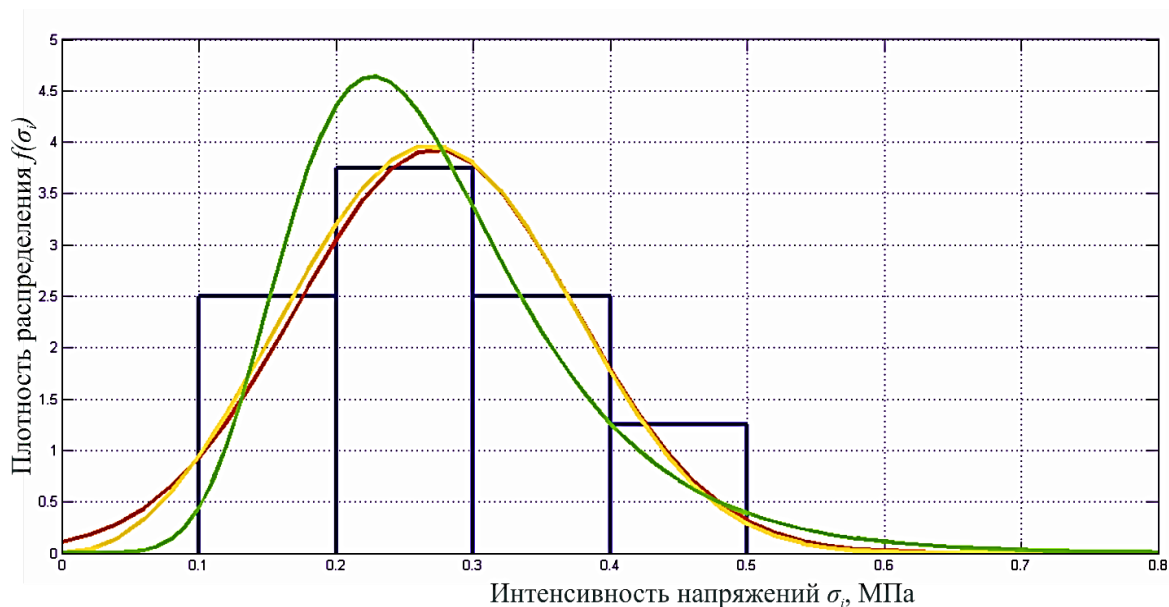


Рис. 5. - Аппроксимация распределения интенсивности напряжений σ_i в грунте, МПа

– нормальным распределением (красный график); – распределением Вейбула (оранжевый график); – распределением Гумбеля (зеленый график)

Анализ аппроксимации эмпирических распределений позволяет сделать вывод, что значения интенсивности напряжений с большей вероятностью будут распределены по закону Вейбула. Далее для построения функции распределения интенсивности напряжений в грунте воспользуемся этим распределением.

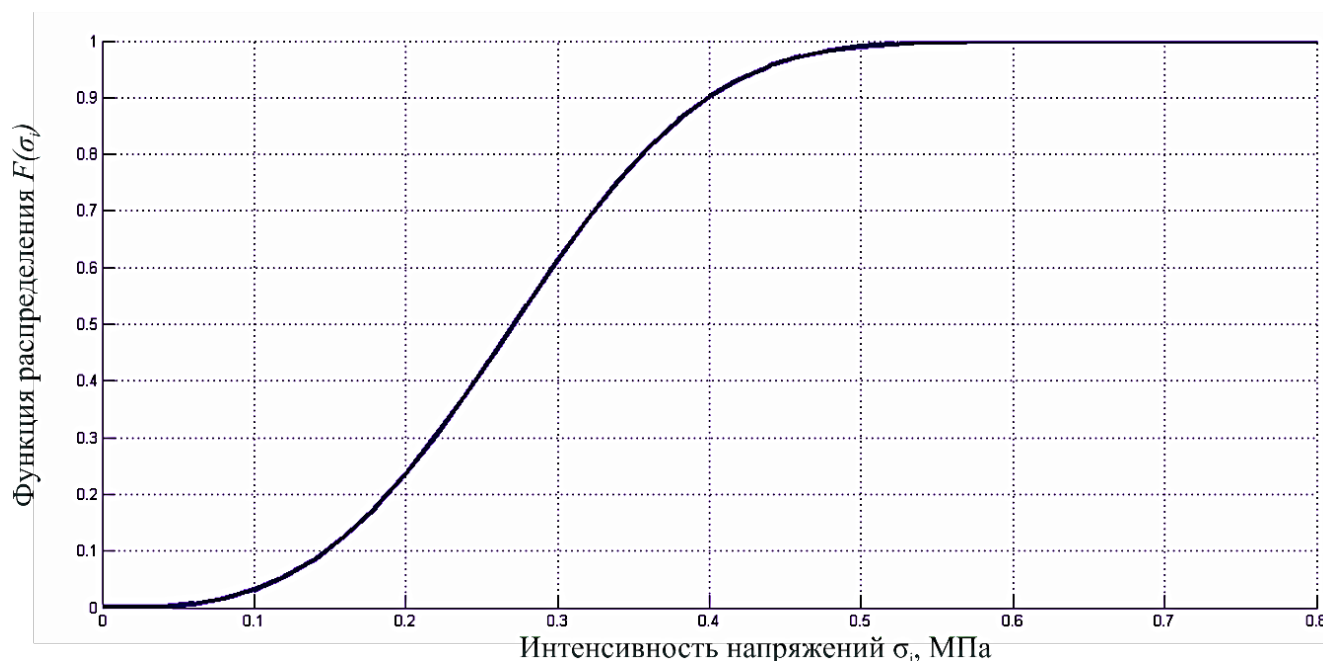


Рис. 6. - Функция распределения значений интенсивности напряжений σ_i в грунтовом массиве при 8-ми бальном воздействии

Таким образом, в результате исследования определена частота отказов, которая характеризует вероятность отказов (разрушения). Для задачи в рассматриваемой постановке вероятность необрушения конструкции составила $P_f = 0,8$. Среднее значение максимальной интенсивности напряжений σ_i равно 0,2725. По результатам можно определить вероятность превышения интенсивностью напряжений различных значений, например, вероятность того, что интенсивность напряжений превысит значение 0,1 МПа составит 0,05.

Список литературы / References

1. Бурого Н. Г. Вычислительная механика. Москва, 2005. 247 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Издание четвертое, стереотипное. М.: Наука, 1969. 576 с.
3. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 452 с.
4. Маскалева В. В., Мухамадиев В. Р. Особенности работы слабых глинистых грунтов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №6 (21). – С. 104-119.
5. Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А., Бусалова М. С. Задача вероятностного расчета конструкции на линейно и нелинейно деформируемом основании со случайными параметрами // Вестник МГСУ. – 2014. – №12. – С. 106-112.
6. Мкртычев О. В., Решетов А. А. Синтезирование наиболее неблагоприятных акселерограмм для линейной системы с конечным числом степеней свободы // International Journal of Computer and Communication System Engineering. – 2015. – volume 11, issue 3. – P. 101-115.
7. Мкртычев О. В., Решетов А. А. Методика моделирования наиболее неблагоприятных акселерограмм землетрясений // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 9. – С. 27-29.
8. Мкртычев О. В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография. М.: МГСУ, 2010. 152 с.
9. Мкртычев О. В., Бусалова М. С. Расчет многоэтажного здания на интенсивное землетрясение с учетом возможности разжижения грунтов основания // Вестник МГСУ. – 2014. – №5 – С. 63-69.
10. Саргсян А. Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций: монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2013. 550 с.
11. Стандарты ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.
12. Basu U., Chopra A. K. Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2004. – No. 59(8). – P. 1039–1074.
13. Basu U. Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – No. 77(2). – P. 151–176.

14. Kenji I. Soil behavior in earthquake geotechnics. Oxford: Clarendon press, 1996. 385 p.
15. Kramer S. L. Geotechnical earthquake engineering. NJ: Prentice-Hall, 1996. 653 p.
16. Mkrtychev O. V., Reshetov A. A. Modeling Worst-case Earthquake Accelerograms for Buildings and Structures // Advances in Engineering Research. – 2016. – volume 72. – P. 89-94.
17. Wolf J. P. Dynamic Soil–Structure Interaction. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985. 481 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Burago N.G. Vychislitel'naya mekhanika [Computational Mechanics]. Moscow, 2005. 247 p. [In Russian]
 2. Ventsel E. S. Teoriya veroyatnostei. [Theory of Probability] Fourth Edition, Stereotyped. M.: Nauka, 1969. 576 p. [In Russian]
 3. Gumbel E. Statistika ekstremal'nykh znachenii. [Statistics of Extreme Values] M.: Mir, 1965. 452 p. [In Russian]
 4. Maskaleva V.V., Mukhamadiev V. R. Osobennosti raboty slabyykh glinistykh gruntov [Features of the Operation of Weak Clayey Ground] // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of Unique Buildings and Structures]. - 2014. - No.6 (21). - P. 104-119. [In Russian]
 5. Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Busalova M. S. Zadacha veroyatnostnogo rascheta konstruktssii na lineino i nelineino deformiruemom osnovanii so sluchainymi parametrami [Problem of Probabilistic Design Calculation on Linearly and Nonlinearly Deformable Base with Random Parameters] // Vestnik MGSU [Bulletin of MSCU]. - 2014. - No.12. - P. 106-112. [In Russian]
 6. Mkrtychev O.V., Reshetov A. A. Sintezirovanie naibolee neblagopriyatnykh akselerogramm dlia lineinoi sistemy s konechnym chislom stepeni svobody [Synthesis of the Most Unfavorable Accelerograms for a Linear System with a Finite Number of Degrees of Freedom] // International Journal of Computer and Communication System Engineering. – 2015. – volume 11, issue 3. – P. 101-115. [In Russian]
 7. Mkrtychev O.V., Reshetov A. A. Metodika modelirovaniya naibolee neblagopriyatnykh akselerogramm zemletriasenii [Method for Modeling the Most Unfavorable Accelerograms of Earthquakes] // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]. - 2013. - No. 9. - P. 27-29. [In Russian]
 8. Mkrtychev O.V. Bezopasnost zdaniy i sooruzhenii pri seismicheskikh i avariinykh vozddeystviyakh: monografiya. [Safety of Buildings and Structures under Seismic and Emergency Influences: Monograph] M.: MSCU, 2010. 152 p. [In Russian]
 9. Mkrtychev O.V., Busalova M. S. Raschet mnogoetazhnogo zdaniya na intensivnoe zemletriasenie s uchetom vozmozhnosti razzhizheniya gruntov osnovaniya [Calculation of a Multi-storey Building for Intensive Earthquake with Account to Liquefaction Possibility of Base Soils] // Vestnik MGSU [Bulletin of MSCU]. – 2014. – No.5 – P. 63-69. [In Russian]
 10. Sargsyan A. E. Dinamika i seismostoikost sooruzhenii atomnykh stantsii: monografiya. [Dynamics and Seismic Stability of Structures of Nuclear Power Plants: Monograph] Sarov: Federal State Unitary Enterprise "RFYTs-VNIIEF", 2013. 550 p. [In Russian]
 11. Standarty GOST 20522-2012 Grunty. Metody statisticheskoi obrabotki rezultatov ispytaniy. [GOST Standards 20522-2012 Soils. Methods of Statistical Processing of Test Results] M.: Standartinform, 2013. 24 p. [In Russian]
 12. Basu U., Chopra A. K. Perfectly matched layers for transient elastodynamics of unbounded domains // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2004. – No. 59(8). – P. 1039–1074.
 13. Basu U. Explicit finite element perfectly matched layer for transient three-dimensional elastic waves // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – No. 77(2). – P. 151–176.
 14. Kenji I. Soil behavior in earthquake geotechnics. Oxford: Clarendon press, 1996. 385 p.
 15. Kramer S. L. Geotechnical earthquake engineering. NJ: Prentice-Hall, 1996. 653 p.
 16. Mkrtychev O. V., Reshetov A. A. Modeling Worst-case Earthquake Accelerograms for Buildings and Structures // Advances in Engineering Research. – 2016. – volume 72. – P. 89-94.
 17. Wolf J. P. Dynamic Soil–Structure Interaction. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985. 481 p.
-
-