



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

ISSN 2618-9283

DOI 10.37153/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY

02 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seismoconstruction.ru



Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений **Научно-технический журнал**

«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» – сетевое научно-техническое рецензируемое издание, охватывающее весь спектр вопросов в области проектирования, строительства, эксплуатации объектов в сейсмически опасных районах России и стран СНГ.

Миссия журнала – развитие строительной науки в области сейсмостойкого строительства; публикация материалов и результатов фундаментальных исследований и достижений ученых, специалистов в области надежности и безопасности зданий и сооружений.

В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) (с 15 февраля 2023);

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки) (с 15 февраля 2023).

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки).

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В действующем Перечне от 31.05.2023 г. под номером 2314.

С 24 мая 2021 года журнал входит в Russian Science Citation Index (RSCI). Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, рецензии, информационные материалы.

ISSN: 2618-9283 (online) DOI: 10.37153/2618-9283

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-72754 от 17.05.2018 года. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издатель – Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС) (<http://raee.su>).

Учредитель – А.А. Бубис.

Сайт сетевого издания: <http://seismoconstruction.ru>

Адрес издательства и редакции: 109428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65. E-mail: info@raee.su

Периодичность: 6 раз в год

Даты выхода в свет: февраль, апрель, июнь, август, октябрь, декабрь.

Earthquake Engineering. Constructions Safety **Scientific and technical journal**

«Earthquake engineering. Constructions Safety» is a network scientific and technical peer-reviewed publication covering the entire range of issues in the field of design, construction, and operation of facilities in seismically dangerous areas of Russia and the CIS countries.

The mission of the journal is to develop the science of earthquake-resistant construction; to publish materials and results of fundamental research and achievements of scientists in the field of reliability and safety of buildings and structures.

The journal publishes articles on the following scientific specialties and related branches of science:

2.1.1 – Building structures, buildings and structures (technical sciences);

2.1.2 – Foundations, underground structures (technical sciences);

2.4.9 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences) the (from February, 15, 2023);

1.6.1 – General and regional geology. Geotectonics and geodynamics science (geological and mineralogical sciences) (from February, 15, 2023);

1.6.7 – Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences).

Included in the List of peer-reviewed scientific publications, where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences, approved by Supreme Attestation Commission (VAK) of the Ministry of education and science.

In the current List of 31.05.2023 listed under the 2314 position.

Since May 24, 2021 included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal accepts for publication: original articles, reviews, discussion materials, comments, reviews, informational materials.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI:** 10.37153/2618-9283

Certificate of registration EL № FS 77-72754 dated 17.05.2018. Registered by the Federal service for supervision of communications, information technologies and mass communications (Roskomnadzor).

Publisher: Russian Association for earthquake-resistant construction and protection from natural and manmade hazards (RAEE) (<http://raee.su>).

The Founder: A. A. Bubis.

Website of the online publication: <http://seismoconstruction.ru>

Address of the publishing house and editorial office: 109428, Moscow, ul. 2-ya Institutskaya, house 6, building 37. Phone: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65.

E-mail: info@raee.su

Frequency: 6 times a year.

Release dates: February, April, June, August, October, December.

Главный редактор

Ведяков И.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Бубис А.А., PhD, кандидат технических наук АО «НИЦ «Строительство»
(Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редколлегии

Смирнова Л.Н., кандидат технических наук
(Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Акулов Н.И., доктор геолого-минералогических наук
(Иркутск, Российская Федерация)

Алешин А.С., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Белаш Т.А., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вада Акира, доктор, профессор
(Токио, Япония)

Вознесенский Е.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Гусев Б.В., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН
(Москва, Российская Федерация)

Захаров В.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Ильичев В.А., доктор технических наук, профессор, Академик РААСН
(Москва, Российская Федерация)

Клементе Паоло, доктор, профессор
(Рим, Италия)

Кривцов Ю.В., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Лапин В.А., кандидат технических наук, профессор
(Алматы, Республика Казахстан)

Немчинов Ю.И., доктор технических наук, профессор
(Киев, Республика Украина)

Норозинежад Фарсанги Исан, доктор, профессор
(Керман, Иран)

Павленко О.В., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Римшин В.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Семенов В.А., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Тонких Г.П., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Уздин А.М., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Хакимов Ш.А., кандидат технических наук, профессор
(Ташкент, Республика Узбекистан)

Хачиян Э.Е., доктор технических наук, профессор
(Ереван, Республика Армения)

Чеверев В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Чимелларо Джан Паоло, адъюнкт-профессор
(Турин, Италия)

Эмри И., доктор, профессор
(Любляна, Республика Словения)

«*EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY*»

Editor-in-Chief

Vedyakov I.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Moscow, Russian Federation)

Deputy editor-in-Chief

Bubis A.A., PhD (Engineering) JSC Research Center of Construction
(Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary

Smirnova L.N., PhD (Engineering)
(Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Akulov N.I., Dr. Sci. (Geology), Professor (Irkutsk, Russian Federation)

Aleshin A.S., Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor (Moscow, Russian Federation)

Belash T.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Wada Akira, PhD, Professor Emeritus (Tokyo, Japan)

Voznesenskii E.A., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Gusev B.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zakharov V.S., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Il'ichev V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)

Krivtsov Yu.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Lapin V.A., PhD, Professor (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Nemchinov Yu.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Kiev, Ukraine)

Noroozinejad Farsangi Ehsan, PhD of Civil Engineering, Professor (Kerman, Iran)

Pavlenko O.V., Dr. Sci. (Mathematics and Physics) (Moscow, Russian Federation)

Rimshin V.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Semenov V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Tonkikh G.P., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Uzdin A.M., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Khakimov Sh., PhD (Engineering), Professor (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Khachiyan E.E., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Yerevan, Republic of Armenia)

Cheverev V.G., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)

Emri Igor, PhD, Professor (Ljubljana, Republic of Slovenia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 2 – 2023

Теоретические и экспериментальные исследования

Пшеничкина В.А., Дроздов В.В., Жиденко А.С.

Амплитудно-частотные характеристики слоистой модели «сооружение-основание» 8

Мониторинг и паспортизация зданий и сооружений

Гукова М.И., Рожкова Л.С., Фарфель М.И.

Опыт экспертизы промышленной безопасности конструкций открытой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «ТАГМЕТ» 24

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Белаш Т.А.

Использование эффекта «гибкого этажа» в зданиях жестких конструктивных систем 45

Белаш Т.А., Свитлик И.В.

К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвешенного типа в районах высокой сейсмической активности 54

Васильева Е.В., Фёдоров В.М.

Повышение эксплуатационной надёжности и безопасности каналов в сборной облицовке из бетона на некондиционных заполнителях 67

Фото на обложке номера из открытых источников.

CONTENTS

№ 2 – 2023

Theoretical and experimental studies

Pshenichkina V.A., Drozdov V.V., Zhidenko A.S.

Amplitude-frequency characteristics of the "structure–pile foundation" layered model **8**

Monitoring and certification of seismic construction

Gukova M.I., Rozhkova L.S., Farfel M.I.

Experience of the examination of industrial safety of structures of the open flyover of the slag yard of the open-hearth workshop of JSC TAGMET **24**

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

Belash T.A.

The use of the "flexible floor" effect in buildings of rigid structural systems **45**

Belash T.A., Svitlik I.V.

On the issue of improving the seismic resistance of suspended buildings in areas of high seismic activity **54**

Vasilyeva E.V., Fedorov V.M.

Improving the operational reliability and safety of channels in precast concrete cladding on substandard aggregates **67**

Photo on the cover of the issue – from the open sources.

УДК 624.04; 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Теоретические и экспериментальные исследования

Амплитудно-частотные характеристики слоистой модели «сооружение–основание»

**Пшеничкина Валерия Александровна¹, Дроздов Вячеслав Вячеславович²,
Жиденко Артем Сергеевич³**

^{1, 2, 3} ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет.
Волгоград, Российская Федерация

Аннотация: Актуальной задачей теории сейсмостойкости является учет взаимодействия сооружения с грунтовым основанием при реализации землетрясения. Несмотря на большое количество исследований, на данный момент не существует удовлетворительного решения данной проблемы. Применяемая в инженерной практике «платформенная модель» может быть использована только для однородных оснований. Вместе с тем поверхностная толща грунта, как правило, имеет многослойную структуру, в которой каждый отдельный слой имеет свои физико-механические характеристики, определяющие резонансные свойства системы в целом. Нормативные расчетные методы не учитывают неоднородность и слоистость грунтового основания, используя усредненные характеристики жесткости, что не позволяет оценить особенности резонансных процессов при совместном колебании здания и основания. Кроме того, динамические характеристики грунтов обладают достаточно высокой статистической изменчивостью даже в пределах одного слоя, и это может существенно повлиять на характер распределения резонансных частот системы.

Целью настоящей работы является исследование динамической реакции системы «здание–многослойное основание» на основе аналитической модели горизонтальной слоистой среды.

Были решены следующие задачи:

- проведен расчет слоистой системы на действие комплексного синусоидального сигнала с учетом демпфирования;
- построены амплитудно-частотные характеристики как для отдельных слоев, так и для системы в целом;
- проведена оценка влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на резонансные частоты рассматриваемой слоистой системы.

Использованы аналитические методы решения волновой задачи сейсмологии.

@ V.A. Pshenichkina, V.V. Drozdov, A.S. Zhidenko, 2023

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, резонансные свойства грунтов, слоистая модель, сейсмическое воздействие, демпфирующие свойства

Для цитирования: Пшеничкина В.А., Дроздов В.В., Жиденко А.С. Амплитудно-частотные характеристики слоистой модели «сооружение – основание» // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С. 8–23

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Theoretical and experimental studies

Amplitude-frequency characteristics of the "structure–pile foundation" layered model

Valeria A. Pshenichkina¹, Vyacheslav V. Drozdov², Artem S. Zhidenko³

^{1,2,3} FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Abstract: Taking into account the interaction between a structure and the soil bed during an earthquake is a vital task of the seismic resistance theory. Despite a large amount of research, there is no satisfactory solution of this problem at the time being. The "platform model" applied in engineering practice can be used only for homogeneous soil beds. However, the surface stratum of soil, as a rule, has a multilayer structure, in which each individual layer has its own physical and mechanical characteristics determining the resonant properties of the entire system. The standard methods of analysis do not take into consideration the heterogeneity and layered nature of a soil bed using the averaged stiffness characteristics, which does not allow evaluating the specific features of resonance processes during the joint oscillation of a building and its soil bed. In addition, the dynamic characteristics of soils have a rather high statistical variability even within the same layer, and this can significantly affect the distribution pattern of the resonant frequencies of the system.

The present article is aimed at investigating the dynamic response of the “building – multilayer soil bed” system based on the analytical model of a horizontal layered medium.

The following tasks were solved:

- an analysis of a layered system under the action of a complex sinusoidal signal was carried out with regard to damping;
- the amplitude-frequency characteristics were constructed both for individual layers and for the system as a whole;
- the influence of the statistical variability of the velocity of transverse seismic waves propagation on the resonant frequencies of the layered system under consideration was assessed.

The analytical methods for the solution of the wave problem of seismology were used.

Keywords: amplitude–frequency characteristic, resonant properties of soils, layered model, seismic action, damping properties

For citation: V.A. Pshenichkina, V.V. Drozdov, A.S. Zhidenko Amplitude–frequency characteristics of the layered model "structure–pile foundation". *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 8–23. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-8-23)

Введение

Слоистая модель грунтового основания используется в инженерной сейсмологии для определения реакции грунта на сейсмические нагрузки, прогнозирования колебаний, возникающих при землетрясениях, построения расчетных акселерограмм для проектирования сейсмостойких сооружений. В общем случае воздействие сейсмической волны на сооружение определяется взаимосвязанными вертикальными и горизонтальными колебаниями [1, 2, 3, 4]. Соответственно спектр резонансных частот грунта должен включать в себя частоты поперечных и продольных волн. В большинстве практических задач учитываются только вертикально распространяющиеся сейсмические волны, которые создают наиболее опасное горизонтальное воздействие на сооружение [4, 5, 6]. Для решения задачи распространения сейсмических волн в многослойной среде применяются аналитические методы тонкослоистых сред [2, 5, 7, 8], а также численные методы, основанные на конечно-разностных и конечно-элементных моделях [9, 10, 11], и реализованные в программных комплексах ProSHAKE, NERA и др. Нелинейный характер реакции грунта учитывается приведением к эквивалентной линейной модели с эффективными параметрами модуля и демпфирования.

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями отечественных и зарубежных специалистов установлено, что сооружение и основание работают как единая система, и характер их взаимодействия определяется соотношением жесткостных параметров надфундаментной части, фундамента и грунтов основания. Наиболее полно проблема взаимодействия сооружений и оснований при сейсмических нагрузках рассмотрена в работах [12, 13, 14]. Отдельные вопросы работы системы «грунт–сооружение» исследованы в [9, 15–17, 18, 19, 20].

Возможность представления сооружения в качестве отдельного слоя многослойной системы обоснована в работах С.В. Медведевой [7], Э.Е. Хачияна [8]. Результаты сравнительного расчета динамических характеристик зданий нескольких типов с применением модели многослойной системы на жестком основании, консольного стержня и КЭ модели показали достаточно высокую степень их согласованности [21].

Воздействие сейсмического импульса на слоистую модель

Поведение сооружения под действием сейсмической нагрузки определяется характером его взаимодействия с грунтовым основанием. При этом наибольший эффект достигается при резонансных явлениях, когда периоды свободных колебаний сооружения совпадают или близки к периодам колебаний оснований. Для определения динамических свойств системы «сооружение–многослойное основание» используем слоистую модель, изображенную на рис.1. Рассматриваются поперечная волна, распространяющаяся под прямым углом из нижнего слоя.

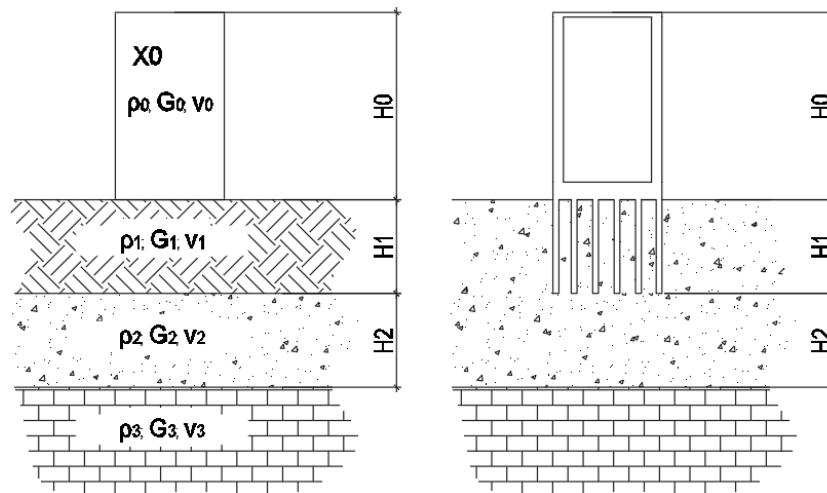


Рисунок 1 – Расчетная слоистая модель системы «сооружение-основание»: слой 0 – сооружение, слой 1 – свайное основание, слой 2 – подстилающий грунт, слой 3 – коренные породы

Figure 1 – The calculation layered model of the "structure-base" system: layer 0 – structure, layer 1 – pile foundation, layer 2 – underlying soil, layer 3 – bedrock

Коренные породы рассматриваем как однородное упругое полупространство, подстилающий слой – однородный изотропный. Каждый j -й слой толщиной H_j характеризуется скоростью распространения упругих волн V_j , модулем сдвига G_j и плотностью ρ_j , ($j=1,2, \dots, n$). Характеристики упругого полупространства: V_{n+1} , G_{n+1} , ρ_{n+1} . Сооружение представляется в виде слоя с эквивалентными параметрами. В общем случае и само сооружение может также рассматриваться в виде слоистой системы.

Для каждого j -го слоя вводится локальная система координат $0 \leq x_j \leq H_j$.

Для исследования динамических свойств рассматриваемой системы построим ее амплитудно-частотную характеристику. Для этого рассмотрим картину колебаний системы (рис.2).

Из нижнего слоя коренных пород в подстилающий грунт вертикально распространяется поперечная сейсмическая волна $f(t)$. Переходя в поверхностный слой, сейсмическая волна преобразуется в новую волну $U_n f(t)$, которая, переходя в слой $n-1$, приобретает вид $U_{n-1} f(t)$ и далее до $U_0 f(t)$. Доходя до границы слоев n и $n-1$, сейсмическая волна одновременно отражается от границы, образуя волну $D_n f(t)$. Таким образом, при колебаниях каждого слоя возникают два вида волн - $U_i f(t)$ и $D_i f(t)$, которые направлены в противоположные стороны.

Для построения амплитудно-частотной характеристики находим реакцию системы на гармоническое колебание вида $f(t)=e^{i\omega t}$ с частотой ω и единичной амплитудой, распространяющееся из слоя скальных пород бесконечной мощности. Проникая в каждый из верхних слоев, волна преобразуется в новые волны с аналогичной частотой ω , но с различными амплитудами $U_n, U_{n-1}, \dots, \dots, U_k, \dots, U_0$:

$$U_k e^{i\omega(t + \frac{x_{k+1}}{v_k})} \quad (1)$$

Каждая из вновь образованных волн отражается от поверхности слоев и преобразуется в обратную волну в виде:

$$D_k e^{i\omega(t - \frac{x_k}{v_k})} \quad (2)$$

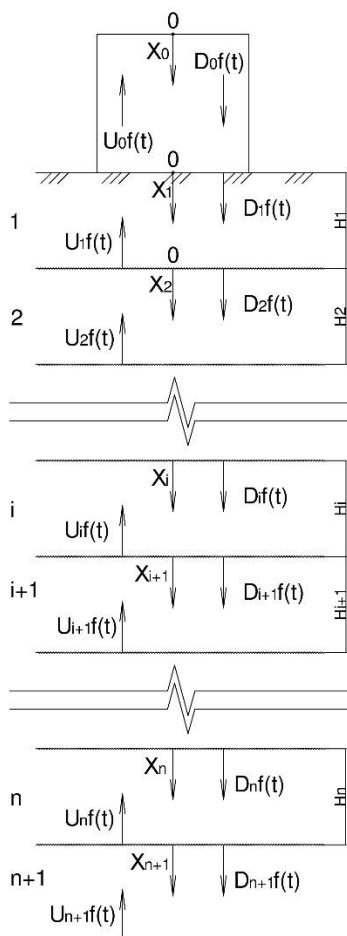


Рисунок 2 – Схема распространения сейсмических волн в системе

Figure 2 – The scheme of propagation of seismic waves in the system

Затухание колебаний j -го слоя по мере распространения волны учитываем введением комплексного волнового числа

$$c_j(\omega) = \bar{a}_j(\omega) - i\bar{b}_j(\omega), \quad (3)$$

действительную и мнимую части которого находим из системы уравнений (1)

$$\begin{aligned}
 A_{0,0} &= e^{-i\omega t_0} [b_0(\omega) + i(a_0(\omega) - 1)], \\
 A_{0,n} &= b_0(\omega) + i(a_0(\omega) + 1), \\
 &\text{при } j=1, \dots, n: \\
 A_{j,j-1} &= e^{-i\omega t_{j-1} a_{j-1}(\omega)} e^{-\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)}, \\
 A_{j,j+n-1} &= e^{-i\omega t_{j-1} [1+a_{j-1}(\omega)]} e^{-\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)}, \\
 A_{j,j+n} &= -1, \\
 A_{n+j,j-1} &= k_{j-1} e^{-i\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)} e^{-i\omega t_{j-1} a_{j-1}(\omega)} [b_{j-1}(\omega) + i(a_{j-1}(\omega) - 1)], \\
 A_{n+j,n+j-1} &= k_{j-1} e^{-i\omega t_{j-1} b_{j-1}(\omega)} e^{-i\omega t_{j-1} [1+a_{j-1}(\omega)]} [b_{j-1}(\omega) + i(a_{j-1}(\omega) + 1)], \\
 A_{n+j,n+j} &= -b_j(\omega) - i[a_j(\omega) + 1],
 \end{aligned} \tag{10}$$

при $j=1, \dots, n-1$:

$$\begin{aligned}
 A_{j,j} &= -e^{-i\omega t_j}, \\
 A_{n+j,j} &= -e^{-i\omega t_j} [b_j(\omega) + i(a_j(\omega) - 1)].
 \end{aligned}$$

Вектор неизвестных амплитуд

$$\mathbf{X}(\omega) = [U_0(\omega), U_1(\omega), \dots, U_{n-1}(\omega), D_0(\omega), D_1(\omega), \dots, D_n(\omega)]^T \tag{11}$$

Вектор правых частей

$$B_n = 1; B_{2n} = b_n(\omega) + i[a_n(\omega) - 1]. \tag{12}$$

Остальные элементы матрицы **A** и вектора **B** равны нулю.

В формулах (10) – (12) приняты следующие параметры:

$$k_j = \frac{G_j V_{j+1}}{G_{j+1} V_j} = \frac{\rho_j V_j}{G_{j+1} V_{j+1}} - \text{отношение сейсмических жесткостей слоев } j \text{ и } j+1,$$

$$a_j(\omega) = \bar{a}_j(\omega) \frac{V_j}{\omega}, \quad b_j(\omega) = \bar{b}_j(\omega) \frac{V_j}{\omega},$$

$$t_j = H_j / V_j - \text{время прохождения волны через слой } j.$$

Амплитудно-частотные характеристики слоистой системы с учетом демпфирующих свойств материалов слоев

Амплитудно-частотная характеристика слоистой системы позволяет определить резонансные частоты системы, равномерность их распределения на определенном диапазоне частот, степень фильтрации системы на различных частотах, а также оценить влияние характеристик грунтовой толщи на сейсмические колебания сооружения.

Рассмотрим задачу построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы на примере трехслойной модели, изображенной на рис. 1. Слой №0 («сооружение») представляет собой железобетонную этажерку. Слой № 1 «свайно-грунтовой массив». Слой № 2 («грунтовой массив») – суглинки азрированные. Слой № 3 («скальное основание») принят безграничным. В рамках исследования было принято условное сооружение в виде этажерки. Характеристики

конструкций модели: плита покрытия $h=200$ мм; колонны 400×400 мм (4 шт.); плита ростверка $h=300$ мм; сваи 300×300 мм (36 шт.); модуль упругости железобетона $E=3 \cdot 10^6$, т/м²; плотность грунта $\rho=1,75$ т/м³; общая высота $H=18,5$ м.

Расчетные характеристики слоистой модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики модели

Table 1 – Design characteristics of the model

№ слоя	H , м	ρ , т·с ² /м ⁴	v , м/с	δ	ψ
0	10,5	0,01841	1164,0	0,3	0,15
1	8,0	0,185	200,0	0,57	0,29
2	30,0	0,175	213,2	0,6	0,3
3	-	3,0	1500	0,02	0,01

Уравнения движения слоев в стационарном режиме имеют вид:

$$F_0(\omega, x_0) = U_0(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_0}(x_0 - H_0 - a_0(\omega)x_0)} e^{-\frac{\omega}{V_0}b_0(\omega)x_0} + D_0(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_0}(x_0 + a_0(\omega)x_0)} e^{-\frac{\omega}{V_0}b_0(\omega)x_0} \quad (13)$$

$$F_1(\omega, x_1) = U_1(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_1}(x_1 - H_1 - a_1(\omega)x_1)} e^{-\frac{\omega}{V_1}b_1(\omega)x_1} + D_1(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_1}(x_1 + a_1(\omega)x_1)} e^{-\frac{\omega}{V_1}b_1(\omega)x_1} \quad (14)$$

$$F_2(\omega, x_2) = U_2(\omega) e^{i\frac{\omega}{V_2}(x_2 - H_2 - a_2(\omega)x_2)} e^{-\frac{\omega}{V_2}b_2(\omega)x_2} + D_2(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_2}(x_2 + a_2(\omega)x_2)} e^{-\frac{\omega}{V_2}b_2(\omega)x_2} \quad (15)$$

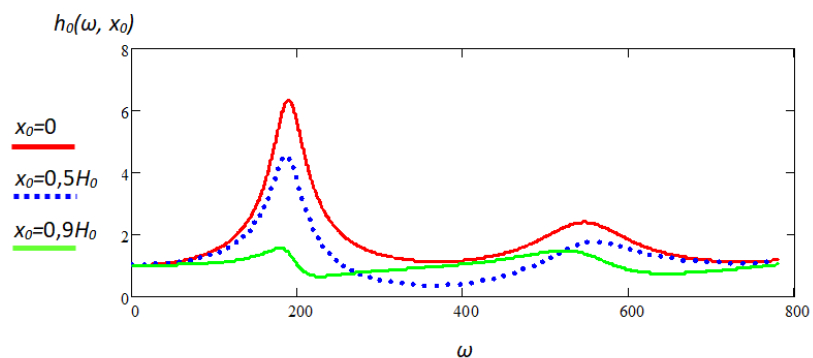
$$F_3(\omega, x_3) = e^{i\frac{\omega}{V_3}(x_3 - a_3(\omega)x_3)} e^{-\frac{\omega}{V_3}b_3(\omega)x_3} + D_3(\omega) e^{-i\frac{\omega}{V_3}(x_3 + a_3(\omega)x_3)} e^{-\frac{\omega}{V_3}b_3(\omega)x_3} \quad (16)$$

Функции (13–16) позволяют найти амплитудно-частотные характеристики как для отдельных слоев, так и для всей системы в целом.

Амплитудно-частотные характеристики для j -го слоя вычисляем как отношение амплитуды $F_i(\omega, x_j)$ к амплитуде входящей из $(j+1)$ -го слоя волны $F_{j+1}(\omega, 0)$

$$h_j(\omega, x_j) = \frac{F_i(\omega, x_j)}{F_{j+1}(\omega, 0)} \quad (17)$$

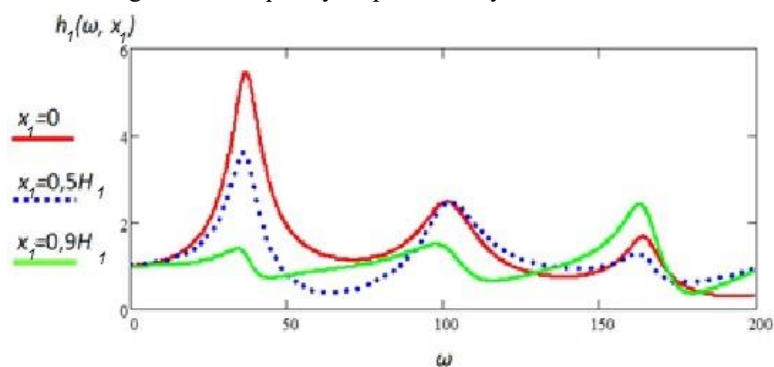
Графики АЧХ для 0, 1 и 2 слоев изображены на рисунках 3 – 5. В таблицах под графиками приведены значения несущих частот слоя, работающего как элемент в системе, в правой колонке – соответствующие частоты колебаний однородного слоя с аналогичными характеристиками (18).



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	189,5	182,8
2	548,4	548,5

Рисунок 3 – АЧХ слоя № 0 «Сооружение»

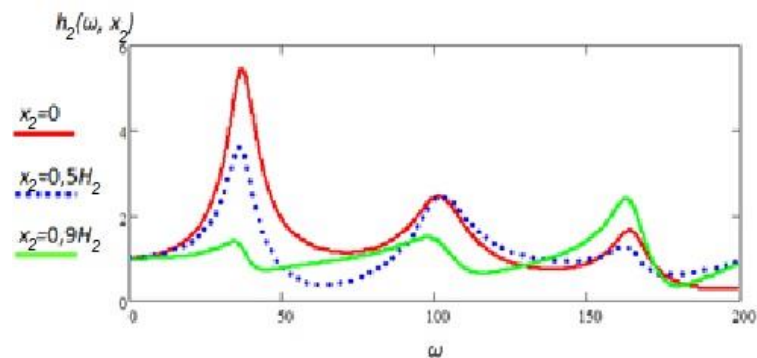
Figure 3 – Frequency response of layer No. 0 "Construction"



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	37,2	39,3
2	102,2	117,8
3	164,0	196,4

Рисунок 4 – АЧХ слоя №1 «Свайно-грунтовый массив» $h_1(\omega, x_1)$

Figure 4 – Frequency response of layer No. 1 "Pile-ground array" $h_1(\omega, x_1)$



№ формы	Частота ω , 1/с	Частота однородного слоя, ω_0 , 1/с
1	37,2	39,3
2	102,2	117,8
3	164,0	196,4

Рисунок 5 – АЧХ слоя №2 «Массив подстилающих грунтов» $h_2(\omega, x_2)$

Figure 5 – Frequency response of layer No. 2 "Array of underlying soils" $h_2(\omega, x_2)$

Частоты свободных колебаний однородного основания вычисляются по формуле [9]

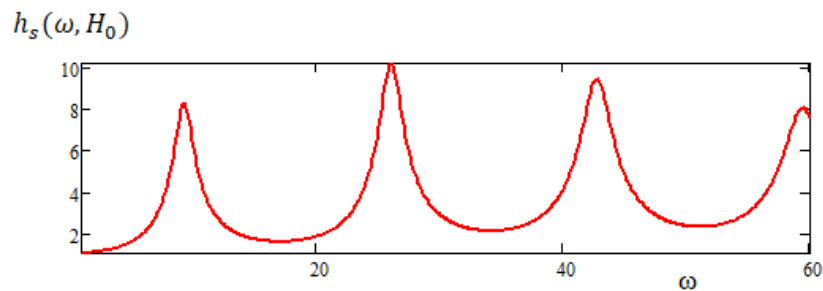
$$\omega_n = (2n - 1) \frac{\pi V}{2H}, n=1,2, \dots \quad (18)$$

Амплитудно-частотная характеристика системы «сооружение-основание»

$$h_s(\omega, x) = \frac{F(\omega, x)}{F_{n+1}(\omega, 0)}, \quad x=0, \dots, H_0 + H_1 + H_2, \quad (19)$$

где $F(\omega, x)$ – амплитуда колебаний всего пакета слоев, $F_{n+1}(\omega, 0)$ – амплитуда волны, входящей из слоя коренных пород.

График АЧХ $h_s(\omega, x)$ на уровне дневной поверхности грунта ($x=H_0$) приведен на рис.6. Интервал частот $\omega \in [0, 60]$ с⁻¹ соответствует интервалу основных несущих частот спектра сейсмического ускорения грунтового основания



№ формы	Частота ω , 1/с	Приближенные частоты для осредненной скорости, ω_0 , 1/с
1	9,4	8,69
2	26,1	26,08
3	42,9	43,46
4	59,5	60,85

Рисунок 6 – АЧХ системы «сооружение-основание»

Figure 6 – Frequency response of the "construction-base" system

Для сравнения вычислим несущие частоты колебаний грунтовой толщи по приближенным формулам способом осредненной скорости [9], объединив слои 1 и 2.

Средняя скорость по слоям составляет $\bar{V} = 210,28$ м/с, средняя плотность $\bar{\rho} = 06177$ тс²/м⁴, $\bar{H} = 38$ м. Значения полученных частот приведены в таблице рис.6.

Вероятностная оценка динамических свойств слоистой системы

График АЧХ системы (рис.6) получен при средних значениях расчетных параметров слоев (табл.1). Вместе с тем физико-механические параметры грунтовых оснований характеризуются достаточно высокой статистической изменчивостью. Согласно данным натурных исследований динамических характеристик грунтов, рекомендуемых [23] для расчетов сейсмостойкости системы «сооружение–основание», коэффициент вариации плотности грунтов составляет 0,03-0,05, коэффициент вариации скорости поперечных сейсмических волн колебаний грунта – 0,28-0,33. Проведена оценка влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на резонансные частоты рассматриваемой слоистой системы. Для вероятностного расчета использовался метод Монте-Карло. Коэффициент вариации принят равным $f_v=0,3$. Рассмотрена изменчивость скорости только для слоя № 2.

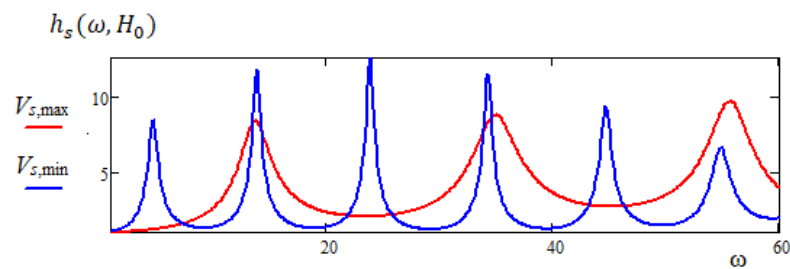
По результатам расчета коэффициент вариации для всех несущих частот практически одинаков и равен $k_{\omega_i} = 0,28$.

На рис. 7 показаны графики АЧХ системы для минимальных и максимальных значений скорости V_2 в интервале $\bar{V}_2 \pm 1,64\sigma_{V_2}$, что соответствует обеспеченности 0,95:

$$V_{2,min} = \bar{V}_2 - 1,64\sigma_{V_2}, V_{2,max} = \bar{V}_2 + 1,64\sigma_{V_2}, \quad (20)$$

где \bar{V}_2 – средняя скорость, σ_{V_2} – стандарт.

Как видно из графика, при минимальных в пределах статистической изменчивости значениях скорости поперечных сейсмических волн спектр собственных частот системы сгущается и смещается в сторону более низких значений. При $V_{2,min}$ в интервал $[0,60]$ с⁻¹ входят 6 резонансных частот, при $V_{2,max}$ – 3



№ формы	Резонансные частоты ω , с ⁻¹ при $V_{2,max}$	Резонансные частоты ω , с ⁻¹ при $V_{2,min}$
1	13,9	4,8
2	35,0	13,9
3	55,8	23,9
4	-	34,4
5	-	44,7
6	-	54,9

Рисунок 7 – АЧХ системы для минимальных и максимальных значений скорости V_2

Figure 7 – Frequency response of the system for minimum and maximum speed values

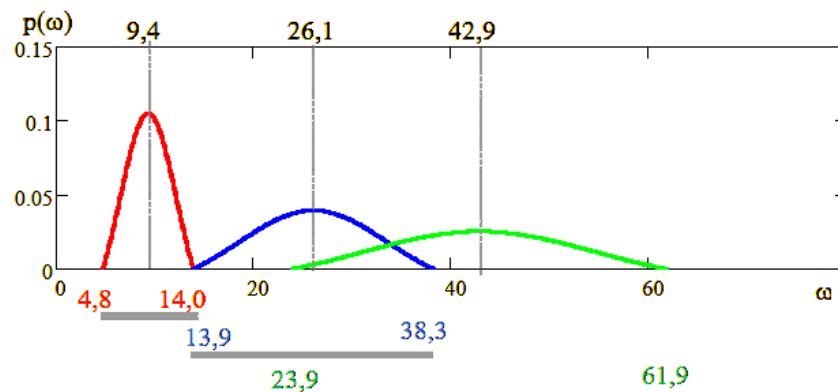


Рисунок 8 – Интервалы возможных значений частот свободных колебаний слоистой системы с обеспеченностью 1,64 стандарта σ_{ω_i}

Figure 8 – Intervals of possible values of free oscillation frequencies of a layered system with a security of 1.64 σ_{ω_i} standard

Несущие частоты свободных колебаний системы являются случайными величинами, и их фактические значения находятся в определенных интервалах, которые могут частично перекрываться. Так, на рис.8 интервал частот ($23,9-38,3 \text{ с}^{-1}$) соответствует и 2-й и 3-й формам свободных колебаний.

Выводы

Представленный алгоритм расчета системы «сооружение–слоистое основание» является базовым детерминированным алгоритмом, реализованным в форме, удобной для его дальнейшего развития на вероятностном уровне и решения задач оценки надежности системы при сейсмических воздействиях.

Решена задача исследования динамических характеристик слоистой системы «сооружение–свайное основание–грунт», получены амплитудно-частотные характеристики для отдельных слоев и для системы в целом. Сравнение полученных несущих частот с приближенными частотами для осредненной скорости показало достаточно близкие результаты: погрешность составила от 0,1% до 7,5%.

Установлена высокая степень влияния статистической изменчивости скорости распространения поперечных сейсмических волн на характер распределения резонансных частот системы. При заданном коэффициенте вариации скорости поперечных сейсмических волн колебаний грунта $f_v=0,3$ коэффициент вариации для всех частот практически одинаков и равен $k_{от}=0,28$.

С уменьшением скорости распространения поперечных волн V_s в грунте спектр резонансных частот слоистой системы сгущается и смещается в сторону более низких значений. При этом собственные частоты характеризуются достаточно высокой статистической изменчивостью, и интервалы их возможных значений могут частично перекрываться.

Список литературы

1. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. Москва: Недра. 1972. 294 с.
2. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. Москва: Мир. 1973. 124 с.
3. Messiou S., Badreddine S., Dias D. The seismic response of foundations subjected to oblique plane waves. Symposium of the international association for boundary element methods . Breshcia, Italy 5–8 September, 2011.
4. Messiou S., Badreddine S., Dias D. Harmonic seismic waves response of a 3D rigid surface on heterogeneous soil layer. 15WCEE, Lisbon. 2012.
5. Chiang-Liang V. (1974). Dynamic response of structures in layered soils, MIT Res. Rep. R74-10, Soils Pub., no. 335, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
6. Семёнова Ю.В. Расчетные методы определения резонансных свойств грунтов при сейсмическом микрорайонировании // *Международный научно-исследовательский журнал*. Выпуск: № 10 (41), 2015. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.202>.
7. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. Москва: Наука. 1987.160 с.
8. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружений. Ереван: Гитутюн. НАН РА. 2015. 555 с.
9. Seed H.B., Lysmer J., Hwang R. Soil-Structure Interaction Analyses for Evaluating Seismic Response *Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE*. 1975, vol. 101, no. GT5, pp. 439–457.

10. Bardet J.P., Tobita T., Nera A. Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. 2001. 44 p.
11. Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972). SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102 p.
12. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука. 1998. 255 с.
13. Тяпин А.Г. Учет взаимодействия сооружений с основанием при расчетах на сейсмические воздействия: Научное издание. Издательство АСВ. 2014. 136 с.
14. Тяпин А.Г. Расчет сооружений на сейсмические воздействия с учетом взаимодействия с грунтовым основанием. Научное издание. Москва: Издательство АСВ. 2013. 392 с.
15. Khalil L., Sadek M., Shahrour I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. Dyn. 2007, 36: 2445–2453.
16. Mylonakis G., Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 4, no. 3(2000), pp. 277–301, Imperial College Press.
17. Stewart J.P., Fenves G.L., Seed R.B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 125, no. 1, January, 1999. ASCE, 1090-0241/99/0001-0026 0037.
18. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Sukhin K.A Modeling a "pile-soil array" system under the seismic load action taking into account shock-absorbing properties of the soil. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 913 (2020) 022011.
19. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Drozdov V.V. Investigation of the dynamic characteristics of the “building-pile foundation” system with the random parameters of foundation soils. *E3S Web of Conferences* 281, 01029 (2021).
20. Dangla P. (1988). A plane strain soilstructure interaction model. *Earthquake engineering & structural dynamics*. Vol. 16(8), 1115–1128.
21. Пшеничкина В.А., Рекунов С.С., Иванов С.Ю., Махмеддин Ч., Хамиси С., Жиденко А.С. Применение слоистой модели к расчетам динамических характеристик зданий при сейсмических воздействиях // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно–строительного университета. Серия: строительство и архитектура*. 2022. №1 (86). С. 43–57.
22. СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах. Москва: Росстандарт; 2017.

References

1. Savarenskij E.F. Sejsmicheskie volny. Moscow: Nedra, 1972, 294 p. [In Russian]
2. Ratnikova L.I. Metody rascheta sejsmicheskikh voln v tonkosloistykh sredakh. Moscow: Mir, 1973, 124 p. [In Russian]
3. Messioud S., Badreddine S., Dias D. The seismic response of foundations subjected to oblique plane waves. Symposium of the international association for boundary element methods. Breshcia, Italy, 5–8 September, 2011.
4. Messioud S., Badreddine S., Dias D. Harmonic seismic waves response of a 3D rigid surface on heterogeneous soil layer. 15WCEE, Lisbon. 2012.
5. Chiang-Liang V. (1974). Dynamic response of structures in layered soils. MIT Res. Rep. R74-10, Soils Pub., no. 335, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

6. Semyonova Yu.V. Raschetnye metody opredeleniya rezonansnykh svojstv gruntov pri sejsmicheskom mikrorajonirovanii. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. Vypusk no.10 (41), 2015. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.202>. [In Russian]
7. Volnovye processy v konstrukciyakh zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyakh. Moscow: Nauka, 1987. 160 p. [In Russian]
8. Khachiyani E. Sejsmicheskie vozdeystviya i prognoz povedeniya sooruzhenij. Yerevan: Gitutyun. NAS RA. 2015. 555 p. [In Russian]
9. Seed H.B., Lysmer J., Hwang R. Soil-Structure Interaction Analyses for Evaluating Seismic Response. *Journal of the Geotechnical Engineering*. Div., ASCE. 1975, vol.101, no. GT5, pp. 439–457.
10. Bardet J.P., Tobita T., Nera A. Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. 2001. 44 p.
11. Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972) SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report no. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102 p.
12. Birbraer A.N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost. SPb.: Nauka, 1998. 255 p. [In Russian]
13. Tyapin A.G. Uchet vzaimodejstviya sooruzhenij s osnovaniem pri raschetax na sejsmicheskie vozdeystviya: Nauchnoe izdanie. Moscow: Izdatel'stvo ASV. 2014. 136 p. [In Russian]
14. Tyapin A.G. Raschet sooruzhenij na sejsmicheskie vozdeystviya s uchetom vzaimodejstviya s gruntovym osnovaniem. Nauchnoe izdanie. Moscow: Izdatel'stvo ASV. 2013. 392 p. [In Russian]
15. Khalil L., Sadek M., Shahrour I. (2007). Influence of the soil-structure interaction on the fundamental period of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. Dyn. 2007; 36: 2445 – 2453.
16. Mylonakis G., Gazetas G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 4, no. 3(2000) 277–301, Imperial College Press.
17. Stewart J.P., Fenves G.L., Seed R.B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 125, no. 1, January, 1999. ASCE, 1090-0241/99/0001-0026 0037.
18. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Sukhin K.A. Modeling a "pile-soil array" system under the seismic load action taking into account shock-absorbing properties of the soil. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 913 (2020) 022011.
19. Pshenichkina V.A., Zhidenko A.S., Sukhina K.N., Drozdov V.V. Investigation of the dynamic characteristics of the “building - pile foundation” system with the random parameters of foundation soils. E3S Web of Conferences 281, 01029 (2021)
20. Dangla P. (1988). A plane strain soil-structure interaction model. *Earthquake engineering & structural dynamics*. Vol.16(8), 1115–1128.
21. Pshenichkina V.A., Rekunov S.S., Ivanov S.Yu., Makhieddin Ch., Xamisi S., Zhidenko A.S. Primenenie sloistoj modeli k raschetam dinamicheskikh kharakteristik zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyakh. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno–stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arhitektura*. 2022, no.1 (86), pp. 43–57. [In Russian]

22. SP 358.1325800.2017 Sooruzheniya gidrotekhnicheskie. Pravila proektirovaniya i stroitelstva v seismicheskikh rajonakh. Moscow: Rosstandart; 2017. [In Russian]

Информация об авторах / Information about authors

Пшеничкина Валерия Александровна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация

Valeria A. Pshenichkina, Dr. Sci. (Engineering), Professor. FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Дроздов Вячеслав Вячеславович, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация
drozdov_jm@mail.ru

Vyacheslav V. Drozdov, Cand. Sci. (Engineering). FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Жиденко Артем Сергеевич, аспирант, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, Российская Федерация

Artem S. Zhidenko, PhD student, FS FEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

УДК: 624.072.2.014

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-24-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-24-44)

Мониторинг и паспортизация зданий и сооружений

Опыт экспертизы промышленной безопасности конструкций открытой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «ТАГМЕТ»

**Гукова Маргарита Ильинична¹, Рожкова Лидия Сергеевна¹,
Фарфель Михаил Иосифович^{1,2}**

¹ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

² ФГБОУ ВПО НИУ МГСУ, кафедра металлических и деревянных конструкций.
Москва, Российская Федерация

Аннотация: Экспертиза промышленной безопасности играет огромную роль в сохранении зданий и сооружений и предотвращении их разрушений и нежелательных последствий, неизбежных в процессе эксплуатации поврежденных конструкций, особенно в зданиях с опасным производством или при тяжелых режимах работы мостовых кранов. В настоящее время в связи со старением и износом конструкций экспертиза промышленной безопасности зданий и сооружений приобретает все большее значение. Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» с 1995 года в течение почти 20 лет проводил обследования цехов ОАО «Тагмет», давал заключения по промышленной безопасности и рекомендации по ремонту и усилению поврежденных строительных конструкций с целью возможности и условий дальнейшей безопасной эксплуатации. В статье приводится пример успешно проведенной работы по обследованию конструкций цехов, который можно распространить и на современную практику. В статье анализируются результаты обследования технического состояния конструкций, классифицируются повреждения и даются рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации конструкций открытой крановой эстакады.

Ключевые слова: сталь, стальная конструкция, несущая способность, жесткость, ферма, балка, стержень, болт, связь

Для цитирования: Гукова М.И., Рожкова Л.С., Фарфель М.И. Опыт экспертизы промышленной безопасности конструкций открытой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «ТАГМЕТ» // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С. 24–44.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-24-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-24-44)

Monitoring and certification of seismic constructions

Experience of the examination of industrial safety of structures of the open flyover of the slag yard of the open-hearth workshop of JSC TAGMET

Margarita I. Gukova¹, Lidia S. Rozhkova¹, Mikhail I. Farfel^{1,2}

¹ Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

² FSFEI HPE NRU MGSU, Department of Metal and Wooden Structures. Moscow, Russian Federation

@ M.I. Gukova, L.S. Rozhkova, M.I. Farfel, 2023

Abstract: Industrial safety expertise plays a huge role in preserving buildings and structures and preventing their destruction and undesirable consequences that are inevitable during the operation of damaged structures, especially in buildings with hazardous production or under heavy operating conditions of overhead cranes. Currently, due to the aging and wear of structures, the examination of industrial safety of buildings and structures is becoming increasingly important. Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Koucherenko of JSC "SIC "Construction" since 1995 for almost 20 years conducted surveys of the workshops of JSC "Tagmet", giving conclusions on industrial safety and recommendations for repairing and strengthening damaged building structures in order to enable and conditions for further safe operation. The article provides an example of successfully carried out work on the inspection of shop structures, which can be extended to modern practice. The article analyzes the results of a survey of the technical condition of structures, classifies damages and gives recommendations for ensuring the safe operation of structures of an open crane overpass.

Keywords: steel, steel structure, bearing capacity, stiffness, truss, beam, rod, bolt, connection

For citation: Gukova M.I., Rozhkova L.S., Farfel M.I. Experience of the examination of industrial safety of structures of the open flyover of the slag yard of the open-hearth workshop of JSC TAGMET. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 24–44. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-24-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-24-44)

Экспертиза конструкций открытой эстакады шлакового двора мартеновского цеха, расположенных на территории ОАО «Тагмет», проводилась в 2010 – 2011 годах в соответствии с требованиями нормативно-технических документов [1–8], до сих пор не утратила значения и может быть рекомендована как образец проведения обследований подобного рода. Руководитель экспертной организации – директор ЦНИИСК, д.т.н., профессор И.И. Ведяков.

Крановая эстакада шлакового двора была запроектирована ГП «Укргипромез» в 1965 году и введена в эксплуатацию в 1971 году [9, 10]. Колонны эстакады были железобетонные и существовали ограждающие конструкции в виде кирпичных стен высотой 3 м. В 1985 г. по проекту проектно-конструкторского отдела Таганрогского металлургического завода (ПКО ТМЗ) часть железобетонных колонн была заменена металлическими, а в 2001 г. усилены оставшиеся железобетонные колонны.

Открытая крановая эстакада шлакового двора, предназначенного для сбора и дробления шлака, поставляемого на платформах по железнодорожному пути из мартеновского цеха ОАО «Тагмет», – прямоугольное в плане однопролётное каркасное сооружение с шириной пролета 30 м и шагом колонн 12 м. На колонны установлены металлические фермы и связи по ним (рис. 1).



Рисунок 1 – Вид эстакады шлакового двора мартеновского цеха

- а) со стороны ряда А от оси 1;
- б) со стороны ряда А от оси 6;
- в) от оси 6;
- г) со стороны ряда Б от оси 6

Figure 1 – View of the flyover of the slag yard of open-hearth workshop

- a) from the row A at axis 1;
- b) from the row A at axis 6;
- c) from axis 6;
- d) from the row B at axis 6

Последнее обследование конструкции открытой эстакады было проведено в марте 2007 г. ОАО «ЮВЭНЕРГОЧЕРМЕТ», в результате выполнены следующие работы: заключение экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ); рабочий проект с результатами обследования (обмерочными чертежами) и с рекомендациями по ремонту и усилению металлических конструкций каркаса и железобетонных колонн [11–13].

На момент обследования каркас эстакады включал колонны двухступенчатые: в осях 2, 3, 4 и 5 – стальные двухветвевые из прокатных широкополочных двутавров с треугольной решеткой из прокатных уголков; в осях 1 и 6 – железобетонные в стальных обоймах. Между колоннами каркаса в осях 3–4 и 5–6 установлены металлические вертикальные связи различного конструктивного оформления из двутавров и прокатных уголков (рис. 2).



Рисунок 2 – Вертикальные связи между колоннами 3 и 4 по ряду А

Figure 2 – Vertical connections between columns 3 and 4 in row A

По оголовкам колонн каркаса эстакады на отметке 17,07 м установлены стропильные металлические фермы высотой 2,73 м. Стропильные фермы – сварные, с восходящим опорным раскосом, с параллельными поясами и треугольной решеткой со стойками из парных уголков на фансонках (рис. 3).



Рисунок 3 – Стропильные фермы по осям 1 и 2

Figure 3 – Trusses on axes 1 and 2

По нижним и верхним поясам стропильных ферм эстакады установлены горизонтальные и вертикальные связи для обеспечения покрытия пространственной жесткости (рис. 4, 5, 6).



Рисунок 4 – Вертикальные и горизонтальные связи между стропильными фермами (вид от оси 1)

Figure 4 – Vertical and horizontal connections between trusses (view from axis 1)



Рисунок 5 – Поперечные горизонтальные и вертикальные связи по оси 1 (вид в сторону ряда Б)

Figure 5 – Transverse horizontal and vertical connections along the axis 1 (view towards row B)

а)



б)



Рисунок 6 – Фермы под поперечный проходной мостик по оси 6 (вид со стороны ряда Б)
а) горизонтальная ферма; б) вертикальные фермы

Figure 6 – Trusses for a transverse walkway bridge along axis 6 (view from row B)
a) horizontal truss; b) vertical trusses

Кровля и стены отсутствуют. Часть сохранившейся стены у осей 1–4 по ряду Б – кирпичная (рис. 7).



Рисунок 7 – Часть сохранившейся кирпичной стены вдоль ряда Б (оси 1–4)

Figure 7 – Part of the preserved brick wall along row B (axes 1-4)

В осях 4-5 устроен ремонтный загон (рис. 8).



Рисунок 8 – Ремонтный загон в осях 5–4

Figure 8 – Repair paddock in axes 5-4

Крановая эстакада оборудована двумя мостовыми кранами тяжелого режима работы грузоподъемностью 80 и 20 т.

Подкрановые балки – металлические сварные двутавровые высотой 1,75 м с поперечными ребрами жесткости установлены на отметке 9,94 м (рис. 9).



Рисунок 9 – Подкрановая балка по ряду А в осях 2–3

Figure 9 – Crane runway beam along row A in axes 2-3

Подкрановые балки закреплены по верхним полкам тормозным листом, связанным с тормозной фермой. Тормозная ферма и нижняя полка подкрановой балки раскреплены связевой горизонтальной фермой (рис. 10). Подкрановый рельс – КР100.

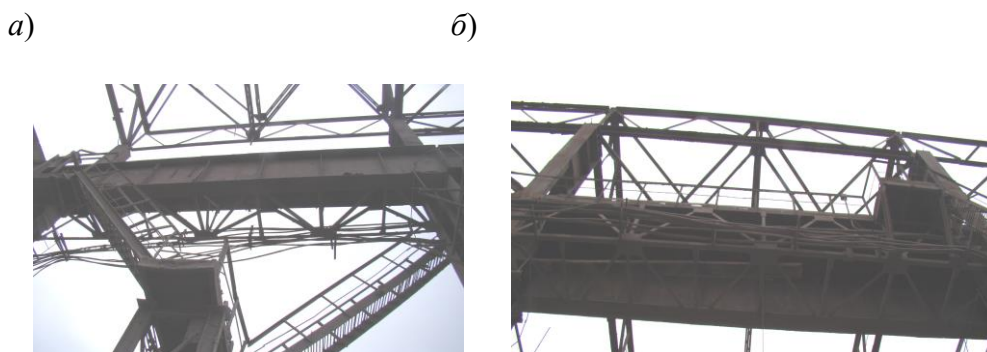


Рисунок 10 – Связевая (горизонтальная) и тормозная (вертикальная) фермы подкрановых балок (вид снизу)

а) подкрановая балка ПБ А/1-2; б) подкрановая балка ПБ А/2-3

Figure 10 – Tie (horizontal) and brake (vertical) trusses of crane beams (bottom view)

а) crane runway beam PB A/1-2; б) crane runway beam PB A/2-3

В процессе проведения работы в декабре 2010 – феврале 2011 г. сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко выполнено полное натурное обследование строительных конструкций эстакады шлакового двора мартеновского цеха, проведены необходимые проверочные расчеты, оценено техническое состояние конструкций и разработаны рабочие чертежи на ремонт и усиление конструкций.

Визуальному осмотру [14] подвергались элементы открытой крановой эстакады: металлические колонны и вертикальные связи между ними; стропильные фермы и связи между ними; подкрановые балки; узлы опирания стропильных ферм и подкрановых балок; железобетонные колонны.

При инструментальном обследовании определялись:

- выборочно геометрические характеристики: длины и сечения элементов стропильных ферм; сечения ветвей колонн; длины и катеты сварных швов крепления элементов конструкций;
- общие искривления и местные погибы элементов металлических конструкций;
- степень поражения коррозией металлических конструкций;
- толщина защитного слоя бетона;
- степень поражения коррозией арматуры железобетонных колонн.

Для определения геометрических характеристик и параметров деформаций элементов металлических конструкций были использованы штангенциркуль, лазерный дальномер, рулетка.

При оценке технического состояния конструкций и разработке рекомендаций по их ремонту и усилению использованы фактические данные измерений при обследованиях.

При визуальном осмотре дефектов категории «А» в конструкциях крановой эстакады не обнаружено. Обнаружены дефекты и повреждения категории «В», не требующие ремонта, и категории «Б» – элементы конструкций, требующие ремонта (усиления) [15].

На момент обследования поверхность основных металлических конструкций здания (колонн, подкрановых балок, стропильных ферм и связей) была покрыта плотным слоем затвердевшей промышленной пыли (рис. 11, 12 и 13):



Рисунок 11 – Скопление затвердевшей пыли на оголовке колонны
а) Б5 (вид со стороны оси 4); б) Б4 (вид со стороны оси 5); в) А4 (вид со стороны оси 5);
г) А3 (вид со стороны оси 4)

Figure 11 – Accumulation of solidified dust on the head of the column
a) B5 (view from axis 4); б) B4 (view from axis 5); в) А4 (view from axis 5);
д) А3 (view from axis 4)

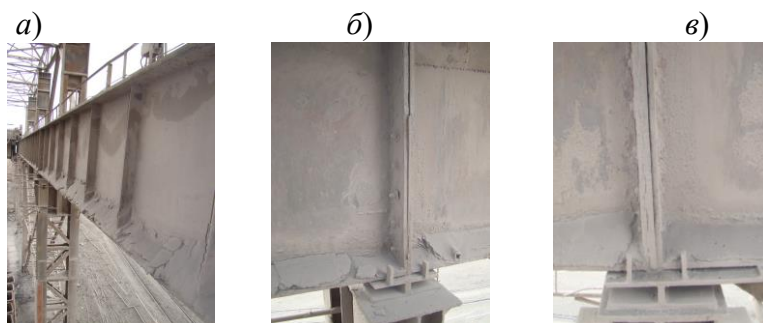


Рисунок 12 – Отложение слежавшейся промышленной пыли на подкрановых балках
а) нижняя полка ПБ А/4-5; б) опорный узел на колонну А2; в) на колонну А3

Figure 12 – Deposition of caked industrial dust on crane runway beams
a) lower shelf of PP A/4-5; б) support unit on column A2; в) on column A3

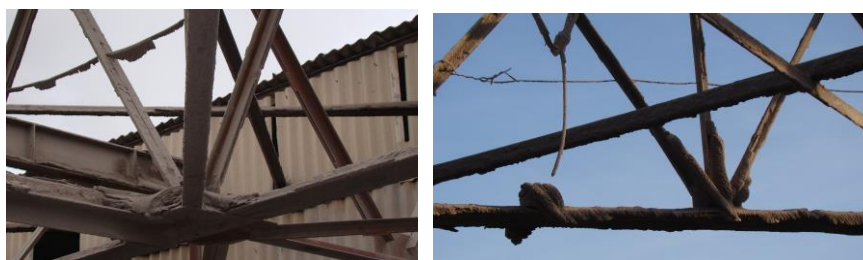


Рисунок 13 – Скопление затвердевшей промышленной пыли на горизонтальных связях между фермами Ф1 и Ф2

Figure 13 – Accumulation of solidified industrial dust on horizontal connections between trusses F1 and F2

Степень поражения коррозией металлических конструкций здания под этим слоем не превышает 3%, т.е. в пределах допустимой нормы.

Степень поражения коррозией рабочей арматуры и хомутов железобетонных колонн определялась путем измерения фактических размеров штангенциркулем и составила: ~ 5 %. В

некоторых местах под отдельными листами обойм на колоннах А6, Б6 и А1 выявлено разрушение защитного слоя бетона (рис. 14).



Рисунок 14 – Оголение рабочей арматуры

- a) в подкрановой части и вдоль рабочей арматуры в надкрановой частях колонны А6
- б) снизу в переходной и поперечной арматуры в надкрановой частях колонны Б6
- в) в надкрановой части и на уровне подкрановой балки колонны А1

Figure 14 – Exposure of working fittings

- a) in the crane part and along the working fittings in the over-crane parts of column A6
- b) from below in the transitional and transverse fittings in the over-crane parts of column B6
- c) in the over-crane part and at the level of the crane runway beam of column A1

Толщина защитного слоя бетона измерялась металлической линейкой в местах разрушения бетона и фактически составила 25–30 мм. Таким образом, фактическая толщина защитного слоя бетона в колоннах эстакады соответствует нормативным требованиям [16,17].

Проведен проверочный расчет несущей способности горизонтальной связи [18]. В соответствии с требованиями п. 15.4.12 СП 16.13330.2011 при применении крестовой решетки связей покрытия допускается расчет по условной схеме в предположении, что раскосы воспринимают только растягивающие усилия.

Диагонали крестовых поперечных связей в конструкции шлакового двора приняты из одиночного уголка 90 х 7, минимальный радиус инерции которого 17,8 мм. При проверке этого элемента по предельной гибкости имеем: расчетная длина в соответствии с п. 10.1.1 СП 16.13330.2011 равна полной геометрической длине элемента

$$l_{ef} = 8485 \text{ мм};$$
$$\lambda = l_{ef} / r_{min} = 8485 / 17,8 = 477.$$

Предельная гибкость растянутых элементов связей при статических нагрузках, в соответствии с табл. 33 СП 16.13330.2011 – $[\lambda] = 400$. Таким образом, принятое сечение диагональных связей **не удовлетворяет** требованиям СП 16.13330.

По результатам данной экспертизы техническое состояние строительных конструкций крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «Тагмет» оценивается как **ограниченно работоспособное**. Дефектов и повреждений, представляющих непосредственную опасность разрушения (категории «А» согласно [7]), в особо ответственных элементах и соединениях конструкций не обнаружено. Отмечено скопление затвердевшей промышленной пыли на оголовках колонн, подкрановых балках, элементах стропильных ферм и связях.

Отдельные конструкции, имеющие дефекты или повреждения категории «Б», относятся к **ограниченно работоспособному** состоянию и требуют ремонта:

Колонны (рис. 15)

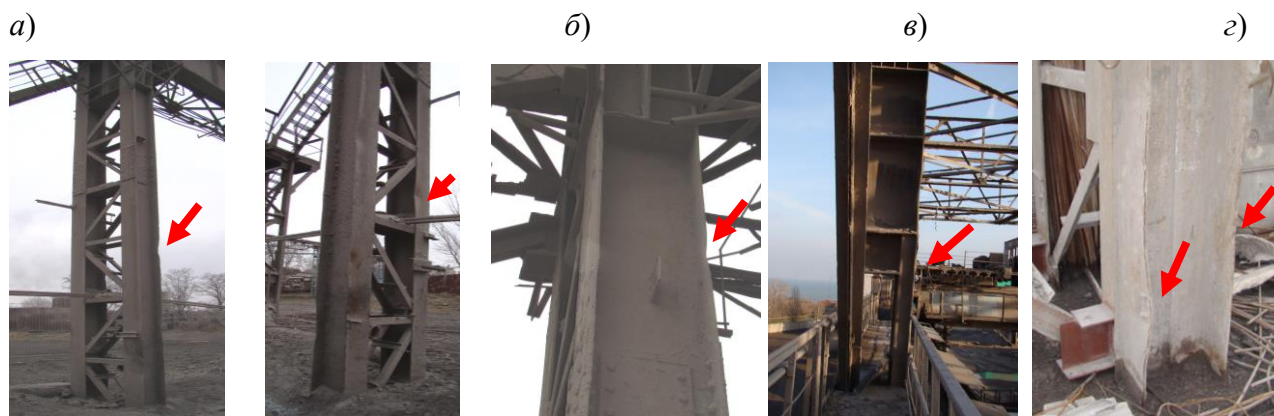


Рисунок 15 – Местное искривление полок

а) двутавров ветвей колонны А2; б) двутавра внутренней ветви колонны А4 со стороны оси 5; в) надкрановой части колонны Б3 со стороны оси 4; г) уголка внутренней ветви колонны Б5 со стороны оси 6

Figure 15 – Local curvature of shelves

a) the I-beams of the branches of column A2; b) the I-beam of the inner branch of column A4 on the side of axis 5; c) the over-crane part of column B3 on the side of axis 4; d) the corner of the inner branch of column B5 on the side of axis 6

Вертикальные связи между колоннами (рис. 16, 17, 18):



Рисунок 16 – Искривление фасонки и уголков решетки вертикальной связи между колоннами А/ 3-4 у оси 3 и фасонки вертикальной связи между колоннами А/ 3-4 у оси 4

Figure 16 – Curvature of the gusset and corners of the lattice of the vertical connection between columns А/ 3-4 at axis 3 and the gusset of the vertical connection between columns А/ 3-4 at axis 4



Рисунок 17 – Изогнутая и закрученная наружная ветвь вертикальной связи 7 между колоннами А/ 3-4 у оси 4 и нижняя диагональ вертикальной связи между колоннами А/ 5-6 у оси 5

Figure 17 – Curved and twisted outer branch of the vertical connection 7 between columns А/ 3-4 at axis 4 and the lower diagonal of the vertical connection between columns А/ 5-6 at axis 5



Рисунок 18 – Изогнутая наружу внутренняя ветвь вертикальной связи ВС В/ 3-4 между колоннами у оси 4

Figure 18 – Outward curved inner branch of the vertical connection of the VC В/ 3-4 between the columns at the axis 4

Стропильные фермы (рис. 19, 20, 21, 22):



Рисунок 19 – Общее искривление стойки в четвертом узле НП от ряда Б фермы Ф6. Разрушение сухарей на стойке и в нижнем поясе фермы и десятого раскоса от ряда Б фермы Ф6

Figure 19 – The general curvature of the rack in the 4th node of the NP from row B of the F6 truss. Destruction of “crackers” on the rack and in the lower belt of the truss and the 10th brace from row B of F6 truss



Рисунок 20 – Отсутствие болтов в узлах крепления фасонки связей к нижнему поясу фермы Ф6 и отсутствие болта в центральном стыковом узле нижнего пояса фермы Ф6 и в узле крепления фасонки связей в 12 м от ряда А к нижнему поясу фермы Ф4

Figure 20 – The absence of bolts in the attachment points of the gussets of the ties to the lower chord of the truss F6 and the absence of a bolt in the central butt joint of the lower chord of the F6 truss and in the attachment point of the gusset of ties 12 m from row A to the lower chord of the F4 truss



Рисунок 21 – Местное искривление в отстоящей полке уголка со стороны оси 3 четвертой от ряда Б панели нижнего пояса фермы Ф2

Figure 21 – Local curvature in the spaced corner shelf on the side of the axis 3 of the fourth panel from row B of the lower belt of the farm F2



Рисунок 22 – Вырез в отстоящей полке уголка первой панели от ряда Б нижнего пояса фермы Ф5 и местное искривление в отстоящей полке уголка со стороны оси 5 первой от ряда Б стойки фермы Ф4

Figure 22 – A cutout in the spaced shelf of the corner of the first panel from row B of the lower belt of the F5 truss and a local curvature in the spaced shelf of the corner from the side of the axis 5 of the first rack from row B of truss F4

Горизонтальные связи по нижним поясам стропильных ферм (рис. 23, 24)



- Рисунок 23 – Смещение поперечных распорок в узле соединения с распоркой горизонтальной связи по нижним поясам ферм со стороны ряда Б между фермами Ф2 и Ф3;
- Местное искривление отстоящего уголка распорки в 6м от ряда А между нижними поясами ферм Ф4 и Ф3 вблизи фермы
 - Общее искривление диагонали во втором кресте от ряда А поперечной связи вдоль нижнего пояса фермы Ф4 со стороны оси 3

- Figure 23 – Displacement of the transverse struts in the junction with the horizontal connection strut along the lower belts of the trusses from the side of row B between the F2 and F3 trusses;
- Local curvature of the spacer angle 6 m from row A between the lower belts of the F4 and F3 trusses near the truss
 - The general curvature of the diagonal in the second cross from the row A of the transverse connection along the lower belt of the F4 truss from the side of the axis 3



- Рисунок 24 – Местное искривление отстоящей полки уголка первой от ряда Б диагонали крестовой поперечной связи вдоль верхнего пояса фермы Ф5 со стороны оси 4

- Figure 24 – Local curvature of the spaced shelf of the corner of the first from row B of the diagonal cross-link along the upper belt of the F5 truss from the side of the axis 4

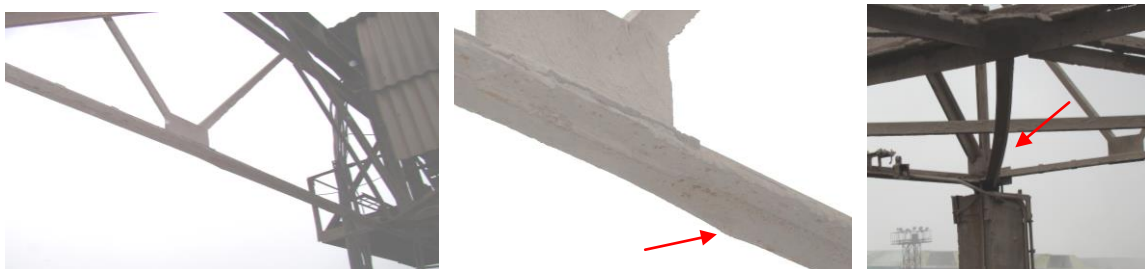


Рисунок 25 – Местное искривление отстоящей полки уголка нижнего пояса вертикальной связи по ряду В в осях 5–4
– Общее искривление диагонали горизонтальной связи по нижним поясам ферм, подходящей к узлу на колонне Б6

Figure 25 – Local curvature of the spaced shelf of the corner of the lower vertical link belt along row B in axes 5-4
– General curvature of the diagonal of the horizontal link along the lower truss belts, suitable for the node on column B6

Стены: (рис. 26)

Трещины в кирпичной стене вдоль ряда Б.



Рисунок 26 – Разрушение кирпичной стены по ряду Б в осях 2–3

Figure 26 – Destruction of a brick wall along row B in axes 2-3

Подкрановые балки (рис. 27):

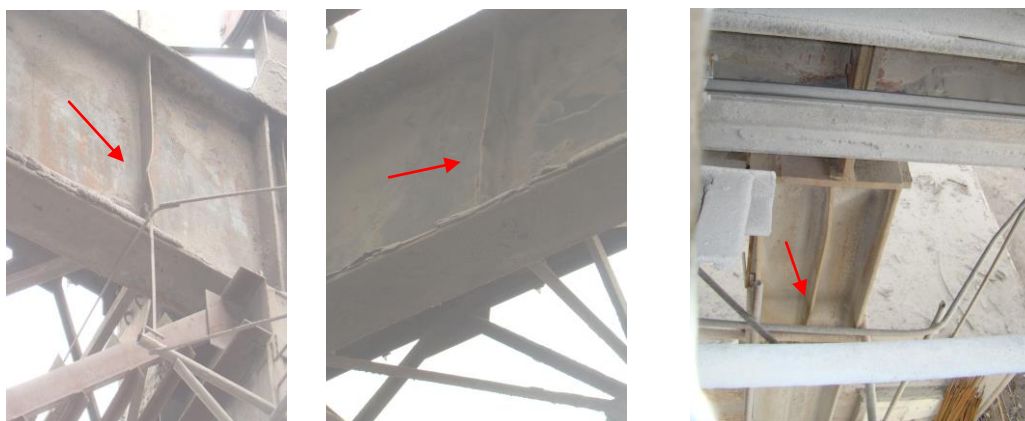


Рисунок 27 – Местное искривление поперечных ребер подкрановой балки ПБ А/5–6 и искривление центрального ребра в опорной тумбочке подкрановой балки на колонне В5

Figure 27 – Local curvature of the transverse ribs of the crane runway beam PB A/5-6 and the curvature of the central rib in the support table of the crane runway beam on column B5

Вспомогательные конструкции:

Обнаружены местные и общие искривления стоек и решетки стоек опор площадок проходных мостиков вдоль оси 1 и между осями 5 и 6.

Техническое состояние остальных конструкций эстакады оценивается как **работоспособное**.

Колонны каркаса цеха замоноличены бетоном в уровне пола. Разрушений бетона не обнаружено, что позволяет сделать заключение об удовлетворительном состоянии фундаментов колонн.

Колебания элементов каркаса эстакады наблюдаются вследствие динамического воздействия на конструкции разгрузки и дробления шлака при работе мостовых кранов.

Жесткость каркаса здания в поперечном направлении обеспечивается жесткой заделкой колонн в фундаменты, в продольном направлении – вертикальными металлическими связями между колоннами.

В составе работы по ЭПБ был произведен расчет по оценке остаточного ресурса конструкций крановой эстакады шлакового двора. Последний такой расчет был выполнен в 2007г. и составлял 19,6 лет при условии выполнения капитального ремонта. Силами завода значительная часть рекомендаций по усилению до 2010 года была выполнена.

Расчет по оценке остаточного ресурса конструкций шлакового двора осуществлен по «Рекомендациям по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам», разработанным АО «ЦНИИПромзданий» в 2001 г.

Учитывая, что по результатам данной экспертизы техническое состояние строительных конструкций крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха оценивается как **ограниченно работоспособное**, и имеющиеся дефекты или повреждения относятся к категории «Б», т.е. требуют ремонта, в расчете для поврежденных элементов конструкций в соответствии с таблицей 1 принята категория технического состояния до ремонта – 3 и 4, а после ремонта – категория 2.

Рассматриваемые элементы конструкций, их значимость (α) и поврежденность (ε) представлены в таблице:

№ п/п	Элементы конструкций	Коэффициент значимости, α_i	Поврежденность, ε
1	колонны каркаса	$\alpha_1 = 8$	0,15
2	фермы покрытия	$\alpha_2 = 7$	0,25
3	связи по колоннам	$\alpha_3 = 2$	0,15
4	связи по фермам	$\alpha_4 = 2$	0,25

Общая оценка поврежденности здания определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \alpha_3 \varepsilon_3 + \alpha_4 \varepsilon_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} = \frac{8 \cdot 0,15 + 7 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,25}{8 + 7 + 2 + 2} = 0,197.$$

Относительная оценка надежности здания $y = 1 - \varepsilon = 1 - 0,197 = 0,803$.

Срок эксплуатации здания на момент обследования составляет

$$t_\phi = 2011 - 1971 = 40 \text{ лет.}$$

Постоянная износа определяется по формуле

$$\lambda = \frac{-\ln y}{t_\phi} = \frac{-\ln 0,803}{40} = 0,0055.$$

Срок эксплуатации до капитального ремонта определяется

$$t = 0,16 / \lambda = 0,16 / 0,0055 = 29 \text{ лет.}$$

Срок конструкций до капитального ремонта истек.

После проведения ремонта и усиления конструкций оценку поврежденности можно будет считать по категории технического состояния 2, при которой $\varepsilon = 0,05$.

Коэффициент надежности отремонтированных и усиленных конструкций в процессе эксплуатации

$$\gamma_o = \gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n.$$

По СП 16. 13330.2011: $\gamma_m = 1,025$; $\gamma_n = 0,95$; минимальный $\gamma_c = 0,8$; $\gamma_f = 1,05$.

$$\gamma_o = 1,025 \times 0,95 \times 0,8 \times 1,05 = 0,818$$

Тогда относительная надежность при эксплуатации

$$y = (1 - \varepsilon) \gamma_o = (1 - 0,05) 0,818 = 0,777 \text{ и}$$

постоянная износа

$$\lambda = \frac{-\ln y}{t_\phi} = \frac{-\ln 0,777}{40} = 0,00631.$$

Срок эксплуатации после ремонта и усиления конструкций шлакового двора будет составлять

$$t = 0,16 / \lambda = 0,16 / 0,00631 = 25,4 \text{ года.}$$

Работа по ремонту, усилению и замене строительных конструкций эстакады осуществлялась по «Рабочим проектам на ремонт и усиление конструкций» [19].

Выводы

В результате визуального осмотра и инструментального обследования строительных конструкций крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «Тагмет» были выявлены дефекты и повреждения, превышающие значения, установленные действующими нормативными документами, и влияющие на эксплуатационную пригодность здания:

- местные искривления сечений колонн ниже подкрановой балки;
- оголение и трещины вдоль рабочей арматуры;
- изгиб и закручивание диагоналей ветвей крестовых связей;

- общее искривление стойки фермы, отрыв сухарей; местное искривление полки уголка сечения нижнего пояса фермы; вырез в полке уголка сечения нижнего пояса фермы;
- отсутствие болтов в стыковых узлах и узлах крепления фасонки связей в нижних поясах ферм;
- общее искривление диагонали горизонтальной связи между фермами;
- недостаточное сечение диагоналей крестовых связей;
- трещины и выпадение кирпича в стене вдоль ряда Б;
- местные и общие искривления стоек и решетки стоек опор площадок проходных мостиков;
- скопление затвердевшей промышленной пыли на оголовках колонн, подкрановых балках, элементах стропильных ферм и связях;
- деформация каркаса здания при динамических нагрузках от работы кранов.

На основании результатов технического диагностирования и проведенных расчетов установлено:

Дальнейшая безопасная эксплуатация открытой крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «Тагмет» до капитального ремонта возможна в течение 25 лет после проведения ремонтных работ. Для обеспечения дальнейшей безопасной эксплуатации конструкций открытой крановой эстакады шлакового двора необходимо выполнить согласованные мероприятия для процесса экспертизы строительных конструкций открытой крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «Тагмет».

Список документов

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (с изм.)
2. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ
3. ПБ 03-246-98 Правила проведения экспертизы промышленной безопасности. Вып. 9 (часть 1). Экспертиза промышленной безопасности (сборник документов). Москва: ГП НТЦ по безопасности в промышленности, ГТН РФ. 2000.
4. ПБ 11-493-02 Общие правила безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств. Москва: НТЦ «Промышленная безопасность». Москва. 2002.
5. РД 11-405-01 «Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах металлургических и коксохимических производств». Москва. 2001.
6. РД 11-589-03 «Положение о проведении экспертизы промышленной безопасности опасных металлургических и коксохимических производственных объектов». Москва: НТЦ «Промышленная безопасность». 2004.
7. РД 22-01-97 «Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями)». Москва: ЭКЦ-МЕТАЛЛУРГ. 1997.
8. РД 11-126-96 «Методические рекомендации по организации и осуществлению контроля за обеспечением безопасной эксплуатации зданий и сооружений на подконтрольных металлургических и коксохимических производствах». Москва. 1996.
9. Министерство металлургической промышленности СССР. «Главтрубосталь». Таганрогский государственный металлургический завод. Паспорт № 132 на здание и сооружение шлакового отделения копрового цеха. Составлен в 1986 г.
10. ПКО ТАГМЕТ ЗАВОД «Мартеновский № 2. Шлаковое отделение». Чертежи. Шифр В 221436. 1984–85 г.

11. ОАО «ЮВЭНЕРГОЧЕРМЕТ». ПКО. ОАО «Тагмет», г. Таганрог. Мартеновский цех. Открытая крановая эстакада. Обследование. Шифр 304882-КМ1. 2007.
12. ОАО «ЮВЭНЕРГОЧЕРМЕТ». ПКО. ОАО «Тагмет», г. Таганрог. Мартеновский цех. Открытая крановая эстакада. Усиление и ремонт. Шифр 304882-КМ2. 2007.
13. «Заключение экспертизы промышленной безопасности строительных конструкций открытой крановой эстакады шлакового двора мартеновского цеха ОАО «Тагмет» ОАО «ЮВЭНЕРГОЧЕРМЕТ». Ростов-на-Дону. 2007.
14. РД 03-606-03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю». Москва: НТЦ «Промышленная безопасность». 2004.
15. СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Москва: Госстрой РФ. 2003.
16. СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии». Москва: Госстрой СССР. 1986.
17. СНиП 3.04.03-85 «Защита строительных конструкций от коррозии. Правила производства работ». Москва: Госстрой СССР. 1986.
18. СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81». Москва: Росстандарт. 2011.
19. СА-03-006-06 «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений предприятий, эксплуатирующих взрывоопасные и химически опасные объекты». Москва: Ростехэкспертиза. Серия 03. 2008.

References

1. Federalnyj zakon «O promyshlennoj bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov» ot 21 iyulya 1997 g. № 116-FZ (s izm.) (In Russian)
2. Federalnyj zakon «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij» ot 30 dekabrya 2009 g. № 384-FZ (In Russian)
3. PB 03-246-98 Pravila provedeniya ekspertizy promyshlennoj bezopasnosti. Vyp. 9 (chast 1). Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti (sbornik dokumentov). Moskva: GP NTCz po bezopasnosti v promyshlennosti, GGTN RF. 2000. (In Russian)
4. PB 11-493-02 Obshhie pravila bezopasnosti dlya metallurgicheskikh i koksokhimicheskikh predpriyatij i proiz-vodstv. Moskva: NTCz «Promyshlennaya bezopasnost». Moskva. 2002. (In Russian)
5. RD 11-405-01 «Metodicheskie rekomendacii po klassifikacii avarij i incidentov na opasnykh proizvodstvennykh obektakh metallurgicheskikh i koksokhimicheskikh proizvodstv». Moskva. 2001. (In Russian)
6. RD 11-589-03 «Polozhenie o provedenii ekspertizy promyshlennoj bezopasnosti opasnykh metallurgicheskikh i koksokhimicheskikh proizvodstvennykh ob'ektov». Moskva: NTCz «Promyshlennaya bezopasnost». 2004. (In Russian)
7. RD 22-01-97 «Trebovaniya k provedeniyu otsenki bezopasnosti ekspluatatsii proizvodstvennykh zdaniy i so-oruzhenij podnadzornykh promyshlennykh proizvodstv i ob'ektov (obsledovanie stroitelnykh konstruktsij specializirovannymi organizatsiyami)». Moskva: EKC-METALLURG. 1997. (In Russian)
8. RD 11-126-96 «Metodicheskie rekomendatsii po organizatsii i osushhestvleniyu kontrolya za obespecheniem bezopasnoj ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij na podkontrolnykh metallurgicheskikh i koksokhimicheskikh proizvodstvakh». Moskva. 1996. (In Russian)

9. Ministerstvo metallurgicheskoy promyshlennosti SSSR. «Glavtrubostal». Taganrogskij gosudarstvennyj metallurgicheskij zavod. Pasport № 132 na zdanie i sooruzhenie shlakovogo otdeleniya koprovogo tsekha. Sostavlen v 1986 g. (In Russian)
10. PKO TAGMET ZAVOD «Martenovskij № 2. Shlakovoe otdelenie». Chertezhi. Shifr V 221436. 1984–85 g. (In Russian)
11. OAO «YuVENERGOChERMET». PKO. OAO «Tagmet», g. Taganrog. Martenovskij tsekh. Otkrytaya kranovaya estakada. Obsledovanie. Shifr 304882-KM1. 2007. (In Russian)
12. OAO «YuVENERGOChERMET». PKO. OAO «Tagmet», g. Taganrog. Martenovskij tsekh. Otkrytaya kranovaya estakada. Usilenie i remont. Shifr 304882-KM2. 2007. (In Russian)
13. «Zaklyuchenie ekspertizy promyshlennoj bezopasnosti stroitelnykh konstruksij otkrytoj kranovoj estakady shlakovogo dvora martenovskogo tsekha OAO «Tagmet» OAO «YuVENERGOChERMET». Rostov-na-Donu. 2007. (In Russian)
14. RD 03-606-03 «Instruktsiya po vizualnomu i izmeritelnomu kontrolyu». Moskva: NTCz «Promyshlennaya bezopasnost». 2004. (In Russian)
15. SP 13-102-2003 «Pravila obsledovaniya nesushhikh stroitelnykh konstruksij zdaniy i sooruzhenij». Moskva: Gosstroj RF. 2003. (In Russian)
16. SNiP 2.03.11-85 «Zashhita stroitelnykh konstruksij ot korrozii». Moskva: Gosstroj SSSR. 1986. (In Russian)
17. SNiP 3.04.03-85 «Zashhita stroitelnykh konstruksij ot korrozii. Pravila proizvodstva rabot». Moskva: Gosstroj SSSR. 1986. (In Russian)
18. SP 16.13330.2011 «Stalnye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81*». Moskva: Rosstandart. 2011. (In Russian)
19. SA-03-006-06 «Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu texnicheskogo obsluzhivaniya, remonta, obsledovaniya, analiza promyshlennoj bezopasnosti proizvodstvennykh zdaniy i sooruzhenij predpriyatij, ekspluatiruyushhikh vzryvoopasnye i khimicheski opasnye ob'ekty». Moskva: Rostekhekspertiza. Seriya 03. 2008. (In Russian)

Информация об авторах/Information about authors

Гукова Маргарита Ильинична, кандидат технических наук, заместитель заведующего лабораторией отдела металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Margarita I. Gukova, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of the Laboratory of reconstruction and monitoring of unique building and structures of Metal structures division, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction. Moscow. Russian Federation

gukova.Rita@yandex.ru

Рожкова Лидия Сергеевна, старший научный сотрудник лаборатории высотных зданий и сооружений отдела металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Lidia S. Rozhkova, Senior Researcher, Laboratory of high-rise buildings and structures of Metal structures division, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction. Moscow. Russian Federation

sosnikova_lidia@mail.ru

Фарфель Михаил Иосифович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией отдела металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Москва, Российская Федерация

Mikhail I. Farfel, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Reconstruction and monitoring unique of building and structures structures of Metal structures division, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures of the NRU MGSU. Moscow Russian Federation farfelmi@yandex.ru.

УДК 69.01

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-45-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-45-53)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Использование эффекта «гибкого этажа» в зданиях жестких конструктивных систем

Белаш Татьяна Александровна¹

¹АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Здания жестких конструктивных систем с включением в их конструкции «гибких этажей» являются широко известным решением, получившим свое распространение во многих южных регионах для организации летних помещений, помещений для отдыха, спорта и т.п. При этом «гибкий этаж» располагается на уровне первого этажа. Такой подход позволяет не только создать комфортные условия для проживания, но и с его помощью снизить сейсмические нагрузки на здания за счет повышения гибкости всего здания и улучшения его динамических характеристик. В другом конструктивном решении сейсмостойкость здания повышается за счет расположения «гибкого этажа» в самой верхней части, при этом «гибкий этаж» выполняет роль динамического гасителя колебаний. Однако по архитектурно-планировочным требованиям возникает необходимость использования свободных пространств и в средней части жестких зданий, которые также могут быть реализованы через «гибкий этаж». Оценка сейсмостойкости этих зданий в сейсмических районах при воздействиях различного частотного состава имеет большое значение для безопасного функционирования этих объектов. Некоторые результаты этого исследования представлены в данной статье.

Ключевые слова: жесткая конструктивная система, «гибкий этаж», сейсмостойкость, сейсмозащита, демпфер, гаситель колебаний

Для цитирования: Белаш Т.А. Использование эффекта «гибкого этажа» в зданиях жестких конструктивных систем // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С.45–53

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-45-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-45-53)

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

The use of the "flexible floor" effect in buildings of rigid structural systems

Tatiana A. Belash¹

¹JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation.

Abstract: Buildings of rigid structural systems with the inclusion of "flexible floors" in their designs are a well-known solution that has become widespread in many southern regions for the organization of summer rooms, recreation, sports, etc. At the same time, the "flexible floor" was located at the level of the first floor. This approach allowed not only to create comfortable living

@T.A. Belash, 2023

conditions, but also with its help it was possible to reduce seismic loads on buildings by increasing the flexibility of the entire building and improving its dynamic characteristics. In another constructive solution, the earthquake resistance of the building increases due to the location of the "flexible floor" in the uppermost part, while the "flexible floor" performs the role of dynamic vibration dampener. However, according to architectural and planning requirements, there is a need to use free spaces in the middle part of rigid buildings, which can also be implemented through a "flexible floor". Assessment of the seismic resistance of these buildings in seismic areas under impacts different frequency composition is of great importance for the safe operation of these facilities. Some of the results of this study are presented in this article.

Keywords: rigid structural system; "flexible floor", earthquake resistance, seismic protection, damper, vibration dampener

For citation: Belash T.A. The use of the "flexible floor" effect in buildings of rigid structural systems. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 45–53. [In Russian]
DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-45-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-45-53)

Очень часто в архитектурно-конструктивном решении здания применяется сочетание конструктивных элементов, взятых из различных конструктивных систем, например, сочетание несущих элементов каркасной системы и стеновой. Такой подход позволяет одновременно создать не только интересную композицию здания, но и решить многие проблемы, связанные с обеспечением комфортных условий проживания в нем. Ярким примером использования этого подхода является использование «гибкого этажа», реализуемого через каркасные стойки в конструкциях здания жесткой конструктивной системы к которым относятся крупнопанельные здания, здания монолитной стеновой системы, каменные и другие здания. Одним из примеров таких решений является проект многоэтажного здания, представленный на рис.1, в котором на разных отметках по высоте вводятся элементы «гибкого этажа».



Рисунок 1 – проект многоэтажного здания, в котором на разных отметках по высоте вводятся элементы «гибкого этажа»
(многофункциональный терминальный комплекс, г. Москва)

Figure 1 – the project of a multi-storey building, in which elements of a "flexible floor" are introduced at different heights (multifunctional terminal complex, Moscow)

В случае, если эти здания попадают в районы сейсмических воздействий, то их поведение существенным образом будет отличаться от поведения обычных зданий, конструктивное решение которых выполнено с использованием традиционных подходов. В этом случае «гибкий этаж» может выполнять различные функции. Так, одной из первых работ, посвященных использованию эффекта «гибкого этажа» в зданиях жестких конструктивных систем, была работа И.Л. Корчинского [1], в которой он привел пример конструкции крупнопанельного здания, опирающегося на рамный каркас нижнего этажа (рис. 2), выполняющего функции гибкого этажа.

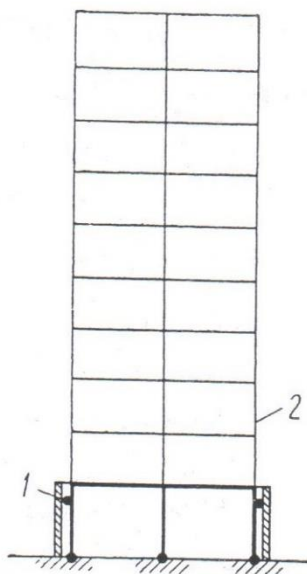


Рисунок 2 – Схема крупнопанельного здания с гибким нижним этажом [1]:
1 – гибкая часть здания; 2 – жесткая часть здания

Figure 2 – Diagram of a large-panel building with a flexible lower floor [1]:
1 – flexible part of the building; 2 – rigid part of the building

Благодаря такому решению гибкость всего здания существенно повышается, сейсмическая нагрузка уменьшается, гибкость здания может регулироваться за счет гибкости нижнего этажа. С таким конструктивным решением можно часто встретиться в южных регионах, в которых пространство нижнего этажа используется для летних помещений различного назначения. Между тем, последствия некоторых сильных землетрясений показали, что в местах сопряжения гибкой и жесткой частей здания могут возникать большие перемещения, приводящие к потере устойчивости здания и его обрушению.

Фактически описанная идея использования «гибкого этажа» явилась прообразом первых конструкций по реализации систем сейсмоизоляции, которые в тот период времени начали активно развиваться в России и за рубежом [2–4].

Другим наиболее известным решением использования «гибкого этажа» в качестве элемента сейсмозащиты здания было конструктивное решение, разработанное А.И. Цейтлиным [5] и в последующем детально изучено специалистами из Армении под руководством академика Э.Е. Хачияна. Был проведен большой комплекс экспериментальных и теоретических исследований, представленных, например, в [6–8].

Первоначально предполагалось, что снижение уровня колебаний здания происходит за счет передачи значительной части накапливаемой в нем энергии «гибкому этажу». В результате чего во время землетрясения «гибкий этаж» подвергается значительным

перемещениям, в его элементах возникают опасные повреждения, которые приводят к его обрушению. По мнению авторов исследования, предполагается, что гибкий этаж «жертвует» собой с целью безопасности остальных этажей, при этом этаж должен быть неэксплуатируемый. После землетрясения весь этаж восстанавливается.

При проведении дальнейших исследований было принято решение рассматривать массу «гибкого этажа» в качестве динамического гасителя колебаний, выполняющего функции сейсмогашения колебаний строительных конструкций здания при сейсмических воздействиях.

Здания с такой защитой получили реализацию на территории Армении (рис. 3).

а)

б)

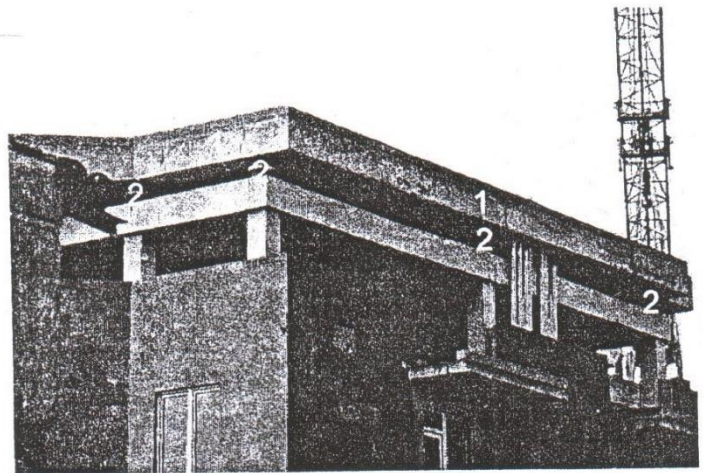


Рисунок 3 – Примеры реализации динамических гасителей в зданиях, построенных в Армении [7]: а – 9-этажное здание в г. Ванadzоре с изолированным верхним этажом (автор М. Мелкумян), 1 – изолированный этаж; 2 – подушки; б – 12-этажное здание в г. Ереване с гасителем сейсмических колебаний (автор З. Хлгатыян), 1 – междуэтажные перекрытия; 2 – подушки

Figure 3 – Examples of the implementation of dynamic dampers in buildings built in Armenia [7]: а – a 9-storey building in Vanadzor with an isolated upper floor (author M. Melkumyan), 1 – an isolated floor; 2 – pillows; б – a 12-storey building in Yerevan with a seismic vibration dampener (author Z. Khlgatyan), 1 – floor ceilings; 2 – pillows

Во всех рассмотренных вариантах «гибкий этаж» занимал либо самую нижнюю позицию, либо располагался в самой верхней части здания. Влияние его на сейсмостойкость здания, как показали исследования, весьма значительно. Оно отражается прежде всего в изменении динамических характеристик здания, в котором за счет увеличения податливости «гибкого этажа» или использования его в качестве гасителя колебаний, можно добиться определенного уровня снижения сейсмической нагрузки на здание, тем самым повысив его сейсмостойкость. Однако конструкция «гибкого этажа» во время землетрясения оказывается весьма уязвимой, особенно при воздействиях низкочастотного характера, сопровождающихся большими смещениями основания, при этом «гибкий этаж» получает серьезные повреждения, что неоднократно подтверждалось

последствиями сильных землетрясений в Турции, Японии, Мексике и других странах (рис. 4).

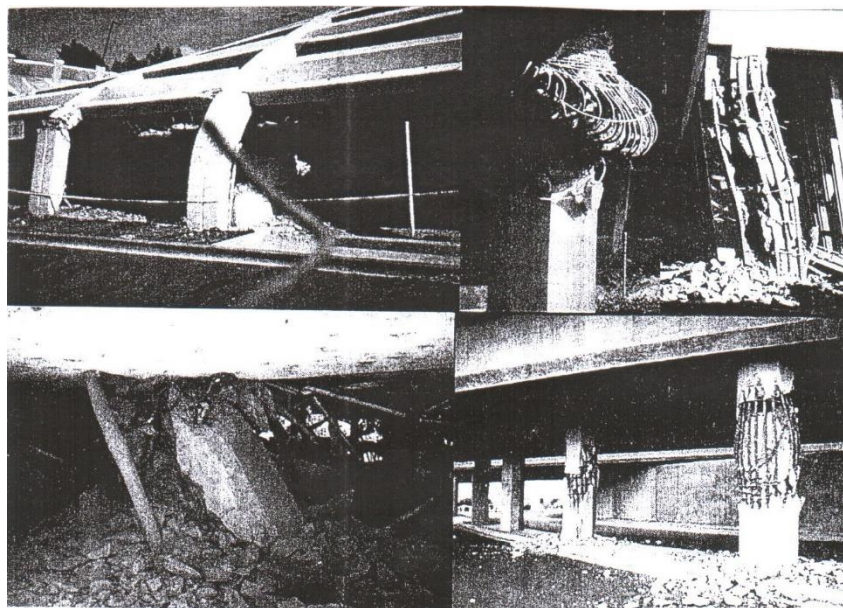


Рисунок 4 – Последствия сильных землетрясений, вызванные обрушением зданий и сооружений с гибкой нижней частью (по материалам международных конференций)

Figure 4 – The consequences of strong earthquakes caused by the collapse of buildings and structures with a flexible bottom (based on the materials of international conferences)

Подобная ситуация может возникнуть в зданиях при расположении «гибкого этажа» по высоте и на других уровнях. В архитектурном плане такие решения появляются для организации свободного пространства, например, в средней части здания для размещения зимних садов, спортивных площадок, зон отдыха и т.п. Для прогнозирования поведения такого здания во время землетрясения возникает необходимость в проведении дополнительных исследований по оценке степени влияния расположения «гибкого этажа» по высоте на его сейсмостойкость с учетом различного характера сейсмического воздействия. Некоторые результаты этого исследования представлены в настоящей статье.

Рассматривается здание из жестких монолитных стеновых конструкций толщиной 200 мм. Перекрытия и покрытия выполнены из монолитного железобетона в виде балок и плит. «Гибкий этаж» представлен из стальных квадратных труб сечением 160 x 160 x 5 мм.

Схемы типового и «гибкого этажа» показаны на рис. 5.

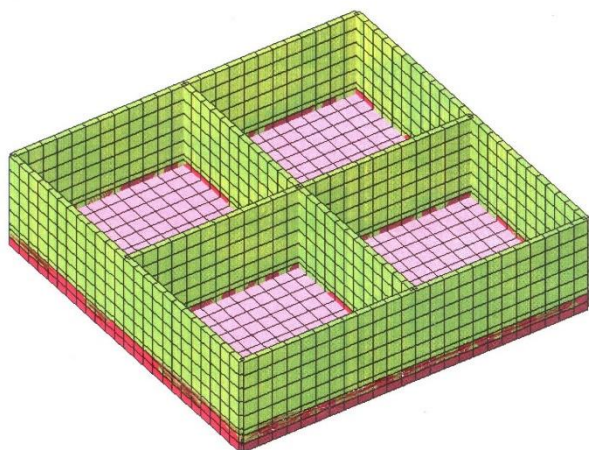


Схема типового этажа

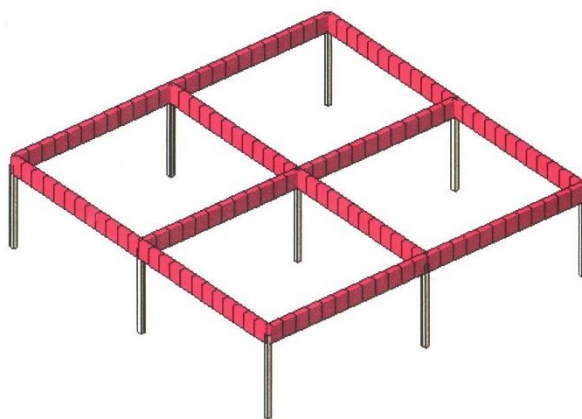


Схема гибкого этажа

Рисунок 5 – Фрагменты расчетных схем типового и «гибкого» этажей

Figure 5 – Fragments of calculation schemes of standard and "flexible" floors

Расчеты производились в программном комплексе ЛИРА-САПР 2016, позволяющем получить все необходимые параметры исследуемого здания, такие, как нагрузки в элементах, перемещение, периоды колебаний, а также визуализировать формы колебаний. Для оценки сейсмостойкости конструкции проводилось сравнение деформаций, усилий в опорных элементах «гибкого этажа», а также частоты и периоды колебаний. Воздействие задавалось набором акселерограмм, характерных для высокочастотных землетрясений с преобладающим периодом колебаний 0,1 с до 0,3 с, для среднечастотных воздействий; с преобладающим периодом колебаний от 0,4 с до 0,7 с; и для низкочастотных воздействий с преобладающим периодом колебаний от 1 с до 1,7 с. Взаимодействие здания с основанием учитывалось по гипотезе «жесткой платформы». Расчет выполнялся с использованием метода конечных элементов. Рассматриваемые расчетные схемы и собственные периоды колебаний, характерных для каждой схемы, представлены на рис. 6.

Расчетные схемы

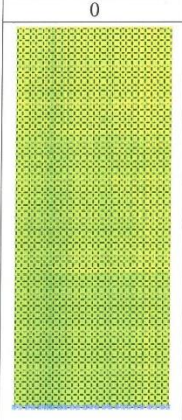
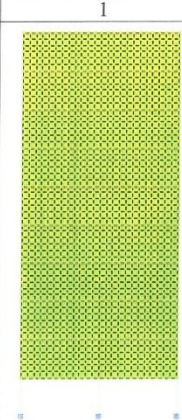
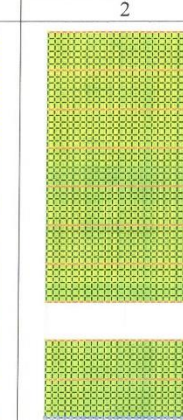
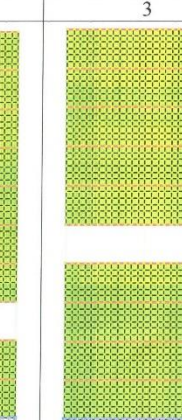
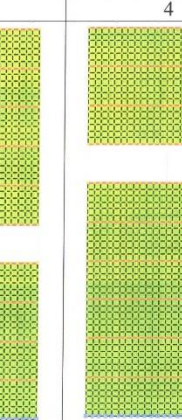
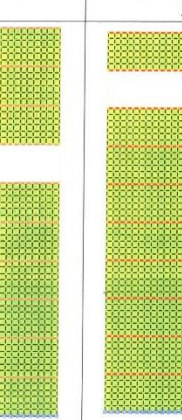
0	1	2	3	4	5
					
Собственный период 0,046с	Собственный период 0,526с	Собственный период 0,469с	Собственный период 0,399с	Собственный период 0,317 с	Собственный период 0,206 с

Рисунок 6 – Принятые в исследовании расчетные схемы

Figure 6 – Calculation schemes used in the study

Анализ полученных результатов подтверждает, что наличие «гибкого этажа» на разных высотных отметках здания приводит к изменению его динамических характеристик, при этом период собственных колебаний варьируется от 0,046 с до 0,526 с, т.е., за счет податливости вводимого конструктивного решения в виде гибких каркасных элементов можно добиться определенного эффекта повышения гибкости здания и ожидать снижения сейсмической нагрузки на здание. Однако характер изменения максимальных усилий, возникающих в стойках «гибкого этажа» свидетельствует о значительном их росте. При расположении «гибкого этажа» в нижней части (схема 1), максимальные усилия в стойках «гибкого этажа» составляли 189 тс, при повышении расположения «гибкого этажа» (схемы 2, 3) максимальные усилия составляли соответственно 154 тс и 113 тс, данные значения приведены при сильных низкочастотных воздействиях. Тот же характер изменения усилий в стойках «гибкого этажа» сохраняется и при воздействиях высокочастотного и среднечастотного характера. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при расположении «гибкого этажа» в нижней части и ближе к середине здания, стойки гибкого этажа испытывают большие вертикальные перегрузки. При значительных перемещениях, характерных, например, для низкочастотных воздействий, вертикальная нагрузка не только перегружает гибкие элементы этажа, но и создает условия для возникновения дополнительных моментов. В результате горизонтальные силы вызывают большие смещения, а собственный вес вышележащих этажей может стать причиной обрушения либо частичного, либо всего здания в целом. Наименьшие усилия возникают в стойках при расположении «гибкого этажа» в верхней части здания. Максимальные усилия в стойках при высокочастотных воздействиях для схемы № 4 соответствовали 6,71 тс, а для схемы № 5 – 1,83 тс. При среднечастотных воздействиях соответственно 10,1 тс и 7,21 тс. Однако для этих схем характерна сильная раскачка: так, максимальные деформации, возникающие в стойках верхнего этажа для схемы 5 при воздействиях низкочастотного характера составили около 33,7 см.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, вводя «гибкий этаж» в конструкции жесткого здания, за счет изменения гибкости вводимого этажа можно

добиться снижения сейсмической нагрузки на здание. Однако обеспечить прочность и устойчивость гибких элементов этажа при сейсмических воздействиях, особенно низкочастотного характера, представляется достаточно сложной инженерной задачей, решение которой возможно при условии введения дополнительных элементов, например, демпфирующих, либо за счет определенных конструктивных мероприятий, направленных на создание надежных узлов сопряжения жестких и гибких частей здания, учитывающих особенности работы такого здания при сейсмических воздействиях различного частотного характера. В этой связи, если по архитектурным или планировочным задачам требуется организация свободных пространств по высоте здания, реализация которых может осуществляться, например, за счет введения каркасных гибких этажей или с использованием других конструктивных элементов, то их устройство в сейсмически опасных районах должно сопровождаться дополнительными исследованиями и конструктивным обоснованием, особенно в той части, которая касается узлов сопряжения жестких и гибких конструкций здания, учитывающих особенности поведения этих зданий в районах сейсмических воздействий. В противном случае, как было описано ранее, может возникнуть ситуация либо частичного, либо полного обрушения здания.

Выводы

1. Применение «гибкого этажа» в зданиях жесткой конструктивной системы может быть использовано не только для решения архитектурно-планировочных задач, но и для выполнения функции сейсмозащиты здания. При этом «гибкий этаж» может располагаться на разных отметках по высоте.

2. Включение «гибкого этажа» в систему сейсмозащиты здания приводит к изменению его частотных характеристик: за счет повышения гибкости элементов снижается сейсмическая нагрузка на здание.

3. Конструктивное исполнение «гибкого этажа» может быть весьма разнообразным, это и каркасные стойки, и кинематические опоры различного вида, а также включение резинометаллических пружинных элементов и т.п. При этом наиболее уязвимым местом становится сопряжение жесткой части здания с гибкими элементами, которые испытывают одновременно значительные вертикальные и горизонтальные нагрузки во время землетрясения.

4. Учитывая непредсказуемость сейсмических воздействий и их сложный частотный состав, рекомендуется более тщательно подходить к проектированию узлов сопряжения рассматриваемых зданий, при этом положительным фактором является введение в конструкции «гибкого этажа» демпфирующих элементов различного вида. Кроме того, в вышележащих этажах предлагается использование облегченных конструкций стен с целью снижения их собственного веса.

Список литературы

1. Корчинский И.Л., Бородин Л.А., Гроссман А.Б. и др. Сейсмостойкое строительство зданий: учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа. 1971. 320 с.
2. Савинов О.А., Сандович Т.А. О некоторых особенностях систем сейсмоизоляции зданий и сооружений // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. Сборник научных трудов. 1982. Т.161. С.26–33.
3. Белаш Т.А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография. Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2017. 175 с.
4. Энергопоглощение в системах сейсмозащиты зданий и сооружений: монография. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС. 2020. 178 с.

5. Цейтлин А.И., Ким Л.И. Сейсмические колебания многоэтажного здания с «гибким» верхним этажом. Снижение материалоемкости и трудоемкости сейсмостойкого строительства. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Москва: Стройиздат; 1982.
6. Хачиян Э.Е. Сейсмическое воздействие и прогноз поведения сооружений. Ереван: Издательство «Гитутюн» НАН РА. 2015. 555 с.
7. Хачиян Э.Е., Мелкумян М.Г., Хлгатян З.М. Исследование сейсмического воздействия на многоэтажное здание с «гибким» верхним этажом // *Промышленность, строительство и архитектура Армении*. 1987. №1. С.45–49.
8. Melkumyan M. New solutions in seismic isolation. Yerevan, 2011.

References

1. Korchinskij I.L., Borodin L.A., Grossman A.B. i dr. Sejsmostojkoe stroitel'stvo zdaniij: uchebnoe posobie dlya vuzov. Moscow: Vysshaya shkola. 1971, 320 p. [In Russian]
2. Savinov O.A., Sandovich T.A. O nekotoryh osobennostyah sistem sejsmoizolyacii zdaniij i sooruzhenij. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. Sbornik nauchnyh trudov. 1982, vol.161, pp. 26–33. [In Russian]
3. Belash T.A. Netradicionnye sposoby sejsmozashchity transportnyh zdaniij i sooruzhenij: monografiya. Moskva: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zhelezodorozhnom transporte». 2017, 175 p. [In Russian]
4. Energopogloshchenie v sistemah sejsmozashchity zdaniij i sooruzhenij: monografiya. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS. 2020, 178 p. [In Russian]
5. Tsejtlin A.I., Kim L.I. Sejsmicheskie kolebaniya mnogoetazhnogo zdaniya s «gibkim» verhnim etazhom. Snizhenie materialoemkosti i trudnoemkosti sejsmostojkogo stroitel'stva. Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya. Moscow: Strojizdat; 1982. [In Russian]
6. Khachiyan E.E. Sejsmicheskoe vozdejstvie i prognoz povedeniya sooruzhenij. Yerevan: Izdatel'stvo «Gitutyun» NAN RA. 2015, 555 p. [In Russian]
7. Khachiyan E.E., Melkumyan M.G., Hlgatyan Z.M. Issledovanie sejsmicheskogo vozdejstviya na mnogoetazhnoe zdanie s «gibkim» verhnim etazhom. *Promyshlennost', stroitel'stvo i arhitektura Armenii*. 1987, no.1, pp.45–49. [In Russian]
8. Melkumyan M. New solutions in seismic isolation. Yerevan, 2011. [In English]

Информация об авторах / Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «Научно-исследовательский центр «Строительство». Москва, Российская Федерация
belashta@mail.ru

Tatiana A. Belash, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

УДК 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-54-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-66)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвешенного типа в районах высокой сейсмической активности

Белаш Татьяна Александровна¹, Свитлик Илья Владимирович²

¹ АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: В связи с ростом населения городов, недостатком земельных участков и их высокой стоимостью всё большее распространение получают высотные здания. Среди высотных зданий наиболее надёжной системой, как показывает практика, является ствольная конструктивная система, разновидностью которой является ствольно-подвесная система. Эта система была реализована во многих высотных зданиях и получила широкое распространение за рубежом, в частности, в районах сейсмических воздействий. В России эта система имеет ограниченное применение, отсутствуют рекомендации по её использованию, нет сведений о характере её поведения в районах высокой сейсмической активности. Последние серьёзные исследования ствольной системы проводились в 80-х – 90-х годах 20-го века. Между тем, эта система имеет ряд важных преимуществ перед другими системами. К ним относятся существенная податливость этих конструкций, период колебаний этих систем может превышать одну секунду, что приводит к снижению сейсмической нагрузки на строительные конструкции. Кроме того, ствольная система при её реализации в виде подвесных конструкций обладает важным преимуществом, которое заключается в том, что во время колебательного процесса эти конструкции могут выполнять функции динамического гашения колебаний. Это даёт возможность не устраивать специальных дополнительных демпферных устройств при опасных сейсмических воздействиях. Между тем эта конструктивная система уязвима при сейсмических воздействиях низкочастотного характера, сопровождающихся значительными смещениями грунта. Для дальнейшего развития этой системы и возможности использования её в сейсмических районах требуется проведение дополнительных исследований, некоторые результаты которых представлены в данной статье.

Ключевые слова: высотные здания, подвесные конструкции, сейсмическое воздействие

Для цитирования: Белаш Т.А., Свитлик И.В. К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвешенного типа в районах высокой сейсмической активности // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С. 54–66.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-54-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-66)

@ T.A.Belash, I.V.Svitlik, 2023

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

On the issue of improving the seismic resistance of suspended buildings in areas of high seismic activity

Tatiana A. Belash¹, Ilya V. Svitlik²

¹ JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation.

² FSFEI HE Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: The widespread use of high-rise buildings was caused by the growing population of cities and the lack of land. As practice shows, the structural system of high-rise buildings with a load-bearing core is one of the most reliable. A variety of such buildings are buildings with suspended structures. This structural system has found application in many high-rise buildings around the world, including in seismically active areas. At the same time, such a constructive solution is rarely found in Russia. We have no recommendations on the use of this structural system, and there is also no information about the behavior of suspended structures with high seismic activity. The greatest interest in the study of buildings with a load-bearing core occurred in the 80s – 90s of the 20th century. It is worth mentioning a number of important advantages of the considered constructive system. First of all, these structures have significant flexibility, which leads to an increase in the natural period of oscillations and a decrease in the seismic load on the load-bearing elements. In some cases, suspended structures of buildings with a load-bearing core act as dynamic absorbers. This makes it possible to ensure the stability and reliability of the entire building without the use of special devices. This article presents the results of some studies conducted to use a structural system with a load-bearing core and suspended floors in seismic construction areas.

Keywords: high-rise buildings; suspended structures; seismic impact

For citation: T.A. Belash, I.V. Svitlik On the issue of improving the seismic resistance of suspended buildings in areas of high seismic activity. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 54–66. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-54-66](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-66)

Введение

Здания с подвесными конструкциями на протяжении долгого времени являлись объектом научного интереса инженерного сообщества. Это обуславливалось их ключевой особенностью: податливостью подвешенных элементов здания, которая обеспечивает снижение усилий в несущих конструкциях при сейсмическом воздействии. Наиболее широкое распространение здания подвешеного типа получили среди многоэтажных зданий с жёстким ядром (рис. 1).

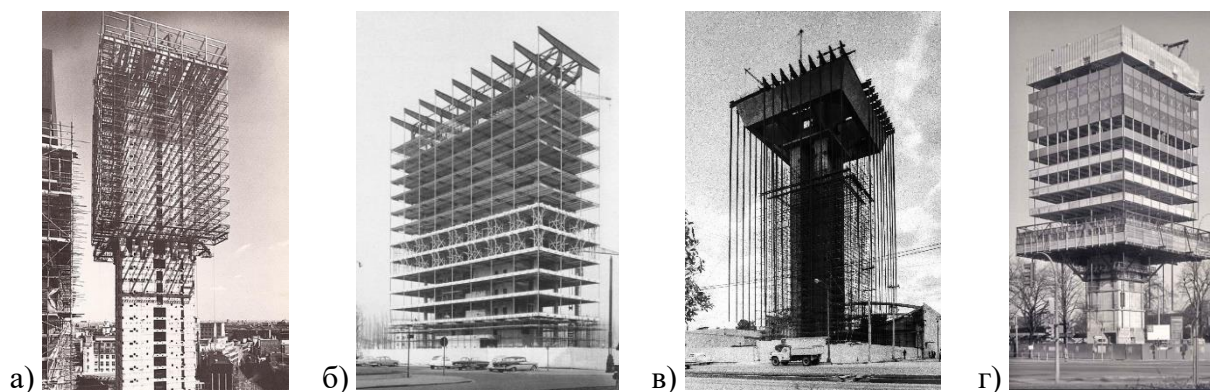


Рисунок 1 – Возведение зданий: а) St. Helen's в Лондоне; б) BP Building в Антверпене; в) Celanese Mexicana в Мехико; г) Finlandhaus в Гамбурге

Figure 1 – Construction of buildings: a) St. Helen's in London; б) BP Building in Antwerp; в) Celanese Mexicana in Mexico City; г) Finlandhaus in Hamburg

На данный момент существует достаточно большое количество предложений по обеспечению сейсмозащиты зданий с подвесными конструкциями. Так, например, повысить сейсмостойкость здания возможно за счёт установки амортизирующих устройств между подвешенными и несущими конструкциями, что предложил в Корчинский И.Л. в патенте [1] (рис. 2). Схожий подход к повышению сейсмостойкости подвесных зданий с несущим ядром можно обнаружить в ряде других отечественных патентов [2, 3, 4, 5]. Ключевым недостатком такого подхода является сложность устройства подобных соединений, а также высокая стоимость устройств с демпфирующими свойствами. В ряде работ описывается положительный эффект от внедрения в ствольно-подвесную несущую систему вязких демпферов [6, 7], полужёстких [8, 9, 10] и упругих [11, 12] соединений. Широкий диапазон характеристик подобных устройств позволяет регулировать колебания как основной, так и подвешенной части здания. Но стоит отметить, что установка большого количества демпферов, способных выдержать значительные усилия, возникающие при взаимном смещении несущего ствола и подвешенных этажей, неизбежно приведёт к существенному росту затрат на возведение здания.

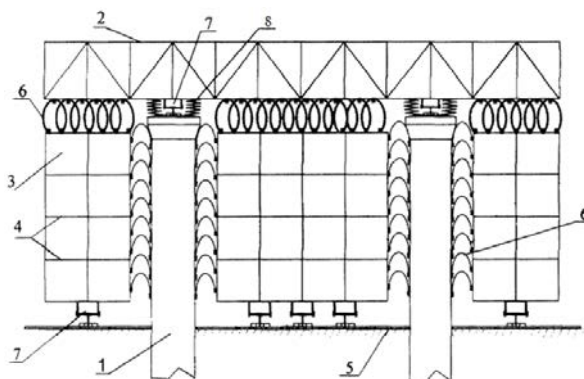


Рисунок 2 – Сейсмостойкое здание подвесного типа: 1 – опорный ствол; 2 – двухконсольная ферма; 3 – подвесная часть; 4 – перекрытия; 5 – фундамент; 6 – упругие элементы; 7 – корректоры жёсткости; 8 – сейсмоизоляционное устройство

Figure 2 – Earthquake-resistant suspended building: 1 – supporting trunk; 2 – double-pole truss; 3 – suspended part; 4 – ceilings; 5 – foundation; 6 – elastic elements; 7 – stiffness correctors; 8 – seismic isolation device

Известно, что характерной чертой зданий подвесного типа являются большие периоды собственных колебаний по сравнению со зданиями традиционного конструктивного исполнения. Эта особенность позволяет им переносить высоко- и среднечастотные землетрясения без повреждений, угрожающих целостности здания [13, 14]. При этом ствольные здания подвесного типа уязвимы при низкочастотных сейсмических воздействиях. Характерные таким землетрясениям значительные смещения грунта передаются на подвешенные конструкции, вызывая их раскачку.

Снижение перемещений подвесных конструкций может осуществляться различными способами. Одним из них является введение между подвешенными конструкциями связей, включающихся при низкочастотных сейсмических воздействиях. Увеличивая жёсткость подвешенной части, такие элементы понижают период собственных колебаний здания, тем самым снижая и его отклик на низкочастотное сейсмическое воздействие. Результаты оценки эффективности такого подхода представлены в настоящей статье.

Методы

Для проведения расчётов было смоделировано многоэтажное здание ствольно-подвесного типа. Расчётная модель представляет собой 17-этажное здание высотой 58,3 метра с несущими железобетонными ядром и консольным оголовком на его вершине. Перекрытия подвешены к оголовку при помощи 48 подвесок, выполненных из стальных канатов, по внутреннему и внешнему контуру. Перекрытия и несущий ствол здания имеют круглую форму, диаметр ствола равен 19 метрам, диаметр перекрытия – 38 метрам.

В качестве материала несущих конструкций ствола и оголовка здания принят бетон марки В45. Толщина стен ядра принята равной 500 мм. Конструкции консольного ростверка имеют различную толщину в диапазоне от 500 до 1000 мм. Толщина плит перекрытия ядра здания равна 300 мм, подвешенные плиты перекрытия обладают сечением 200 мм. Конструкции перегородок и подвешенных плит перекрытий выполнены из бетона класса по прочности В30. Балки перекрытий выполнены из стального двутавра класса С285. Для подвесок подобраны плетёные стальные канаты.

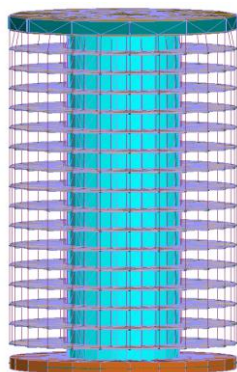


Рисунок 3 – Расчётная модель здания

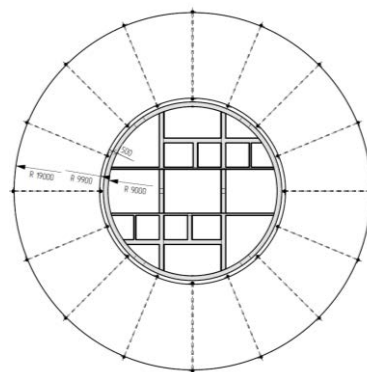


Рисунок 4 – План типового этажа моделируемого здания

Figure 3 – Calculation model of the building

Figure 4 – Plan of a typical floor of a simulated building

Для повышения сопротивляемости здания низкочастотным воздействиям разработаны расчётные модели с дополнительными связями. В первом рассматриваемом варианте в качестве включающейся связи, устанавливаемой между подвешенными этажами, используется труба круглого сечения. Круглое сечение трубы целесообразно по причине того, что она в равной степени повысит жёсткость подвесной конструкции при сейсмическом воздействии, распространяющемся в любом направлении. Однако для протяжённых в плане зданий, имеющих конкретное опасное направление распространения сейсмического воздействия, возможно использовать профили с различной жёсткостью по осям сечения. Схема расположения трубных связей в плане расчётной модели, в которой применяется первая рассматриваемая конструктивная схема, представлена на рисунке 5.

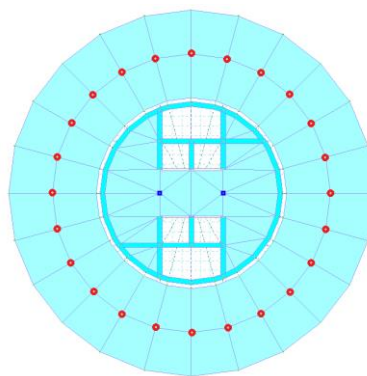


Рисунок 5 – Схема расположения трубных связей на плане

Figure 5 – Layout of pipe connections on the plan

Во втором варианте включающиеся в работу элементы выполнены в виде жёсткой вертикальной связи, устраиваемой между соседними подвешенными перекрытиями. Вертикальная связь работает только в своей плоскости, поэтому их необходимо равномерно размещать по различным направлениям. В модели с устройством жёстких вертикальных связей между подвешенными этажами план этажа условно делится на четыре части. Вертикальные связи устанавливаются между этими объемами этажа, при этом на соседних этажах эти связи повернуты на 45 градусов относительно центральной оси здания для обеспечения лучшей пространственной работы подвешенных конструкций (рис. 6).

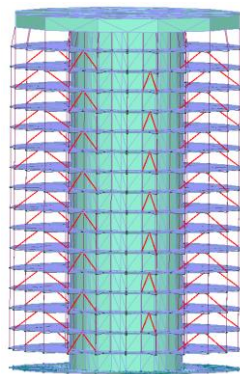


Рисунок 6 – Вертикальные связи в расчётной модели

Figure 6 – Vertical connections in the calculation model

Расчёт производился в программном комплексе ЛИРА 10.12 с использованием модуля Динамика плюс. Данный модуль позволяет производить моделирование отклика конструкции на динамические воздействия и выполнять расчёт во временной области с применением инструментальных сейсмограмм. При задании динамического нагружения сейсмограммы прикладывались к основаниям расчётных моделей как узловые нагрузки. В качестве допущения не учитывалась совместная работа здания и основания. Соединение фундаментной плиты и основания условно принято жёстким. Для канатных подвесок в расчётной модели применены геометрически нелинейные конечные элементы 304 типа «нить». Метод приложения нагрузки, то есть определение величины шага дробления нагрузки, при этом автоматически определяется программным комплексом. Для расчётных исследований в веб-базе данных о движении грунта Тихоокеанского центра инженерных исследований землетрясений были подобраны две сейсмограммы землетрясений с различными спектрами реакции: высокочастотного землетрясения, произошедшего в области Фриули, и низкочастотного, зарегистрированного в горах св. Ильи (рис. 7).

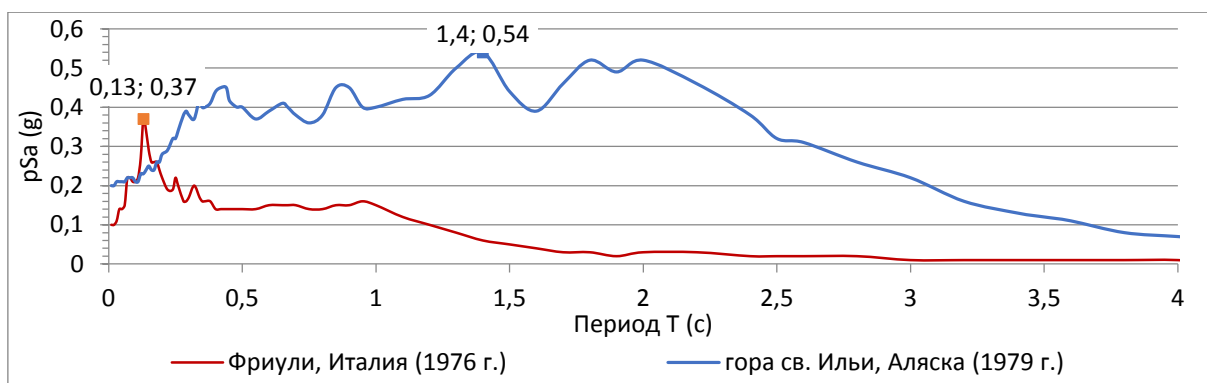


Рисунок 7 – Спектры реакции землетрясений

Figure 7 – Earthquake reaction spectra

Для анализа эффективности предлагаемых конструктивных решений были выбраны такие критерии, как усилия, возникающие в стенах ядра здания и несущих подвесках, а также перемещения элементов расчётной модели в общей системе координат.

Для иллюстрации различий в поведении подвесных конструкций при землетрясениях с различными спектрами реакции был произведён расчёт исходной модели со свободной подвеской перекрытий без связей (рис. 8). По диаграмме видно, что верх несущего ствола

здания, на котором находится консольный ростверк, при низкочастотном землетрясении перемещается примерно в 6,1 раза дальше, чем при высокочастотном. Подвешенные перекрытия при низкочастотном землетрясении перемещаются на расстояние в 8,4 раза большее, чем при высокочастотном, что свидетельствует о возникающем эффекте раскачки. Именно для снижения этого эффекта в расчётную модель вводятся элементы, увеличивающие жёсткость подвешенной конструкции.

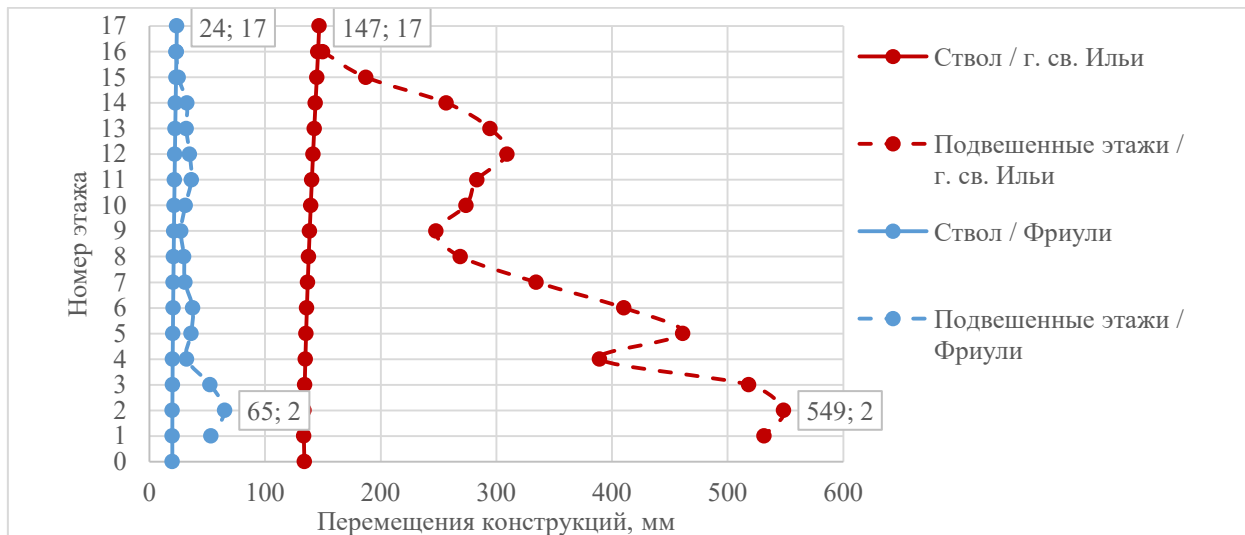


Рисунок 8 – Перемещения конструкций при сейсмическом воздействии в горах св. Ильи и районе Фриули

Figure 8 – Displacement of structures under seismic impact in the mountains of St. Elias and the Friuli region

Так как жёсткость вводимых связей, выполненных из труб, напрямую влияет на жёсткость подвешенных конструкций и, следовательно, на формы их колебаний, для расчётного исследования из сортамента ГОСТ 10704-76 были выбраны трубы следующих профилей: 219 x 8, 273 x 8, 325 x 8, 377 x 9, 530 x 9, 630 x 9. Для устройства вертикальных жёстких связей использованы квадратные трубы профиля 100 x 100 x 9.

Результаты

Фрагмент расчётного исследования представлен на рисунке 9. На данной диаграмме отображены максимальные перемещения конструкций ствола и подвешенных перекрытий расчётной модели без применения трубных связей, а также расчётной модели с трубными связями.

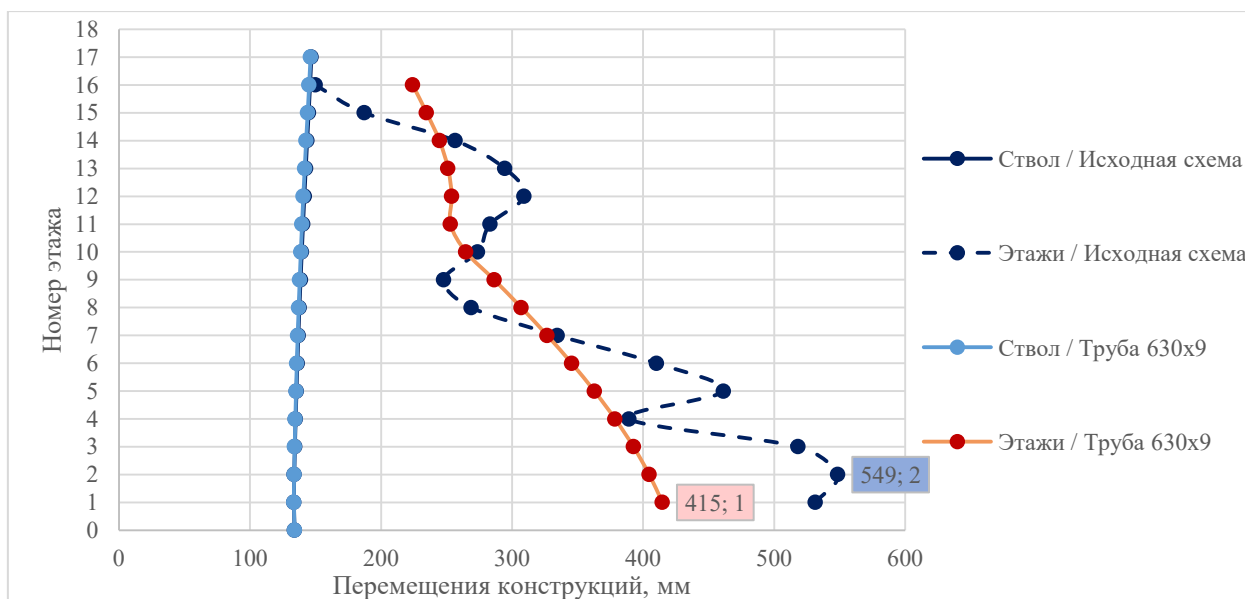


Рисунок 9 – Перемещения конструкций ствола и подвешенных перекрытий расчётных моделей при сейсмическом воздействии в горах св. Ильи

Figure 9 – Displacement of trunk structures and suspended ceilings of calculation models under seismic impact in the mountains of St. Elias

Для анализа зависимости напряжённо-деформированного состояния расчётных моделей от жёсткости связей, были вычислены суммарные жёсткости труб, добавляемых в пределах одного этажа (табл. 1).

Таблица 1 – Поперечная жёсткость связей, внедряемых в расчётную схему

Table 1 – Transverse stiffness of the links embedded in the design scheme

Схема	Момент инерции трубы I_y , см^4	Модуль упругости материала E , Н/м^2	Количество труб	Общая поперечная жёсткость, $\text{кН}\cdot\text{м}^2$
Исходная	-	-	0	0
С трубами 219 x 8	2955,4	$2 \cdot 10^{11}$	24	141859,2
С трубами 273 x 8	5851,7			280881,6
С трубами 325 x 8	10014			480672
С трубами 377 x 9	17624			845952
С трубами 530 x 9	49997			2399856
С трубами 630 x 9	66478			3190944

По результатам расчётов в программном комплексе были построены диаграммы, отражающие зависимости максимальных перемещений, ускорений и усилий в несущих элементах для исходной расчётной модели и моделей с установленными трубными связями (рис. 10–12).

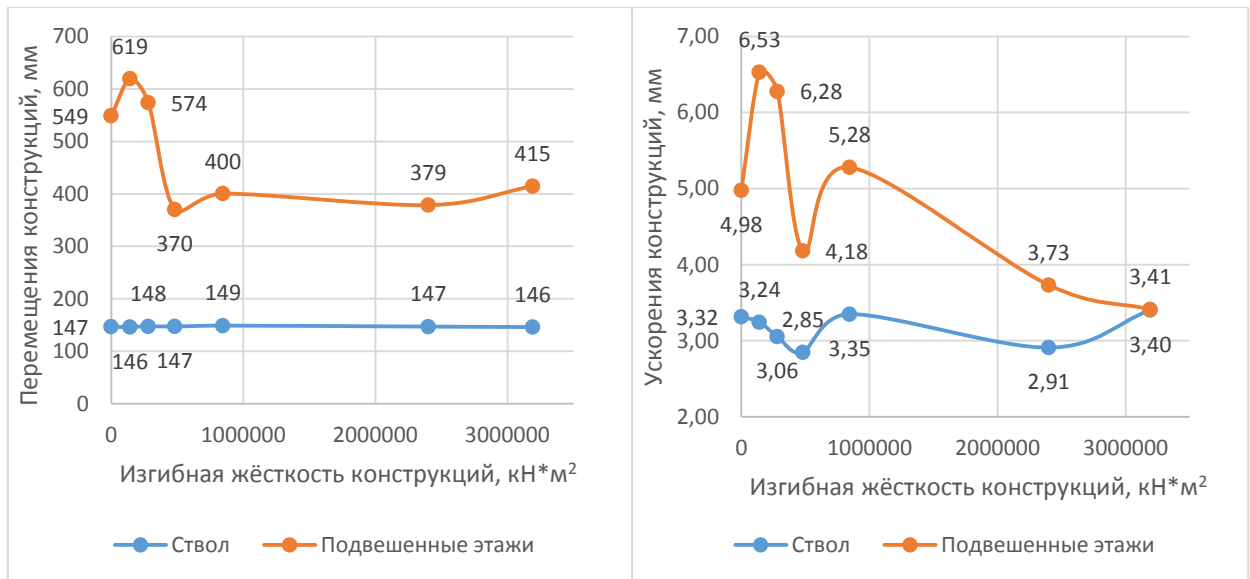


Рисунок 10 – Диаграммы максимальных: а) перемещений; б) ускорений конструкций расчётных моделей

Figure 10 – Diagrams of the maximum: a) displacements; b) accelerations of designs of computational models

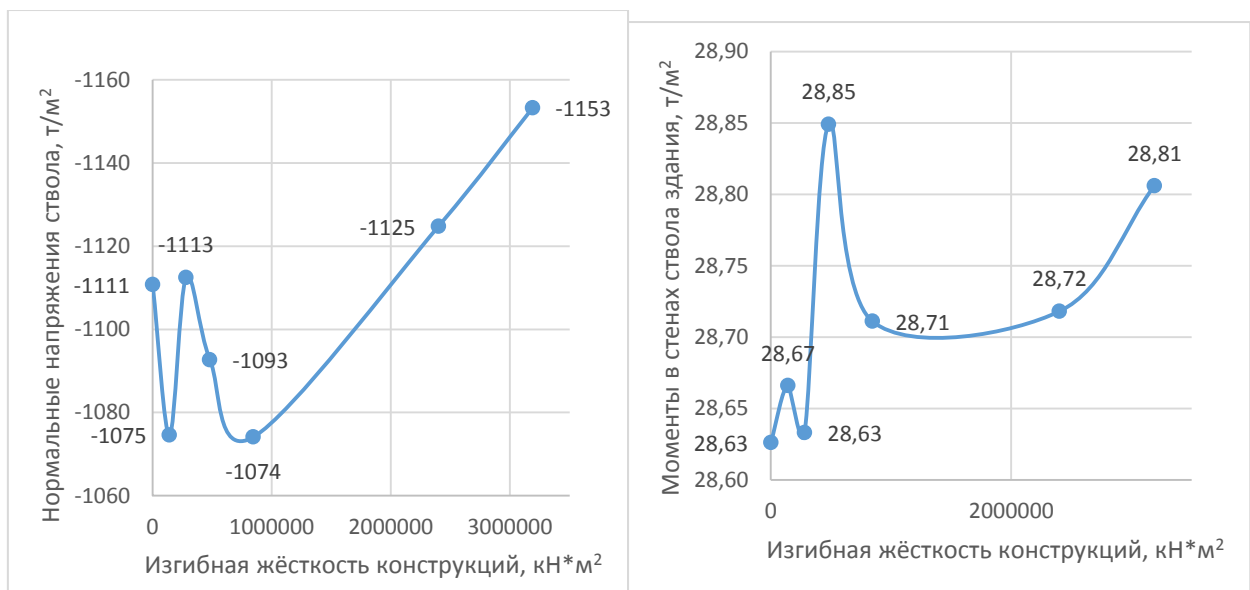


Рисунок 11 – Диаграммы максимальных а) нормальных напряжений стен ствoла моделей вдоль вертикальной оси; б) моментов, действующих на сечение ортогональное оси, в стенах ствoла моделей

Figure 11 – Diagrams of the maximum a) normal stresses of the walls of the trunk of models along the vertical axis; b) moments acting on the section orthogonal to the axis in the walls of the trunk of models

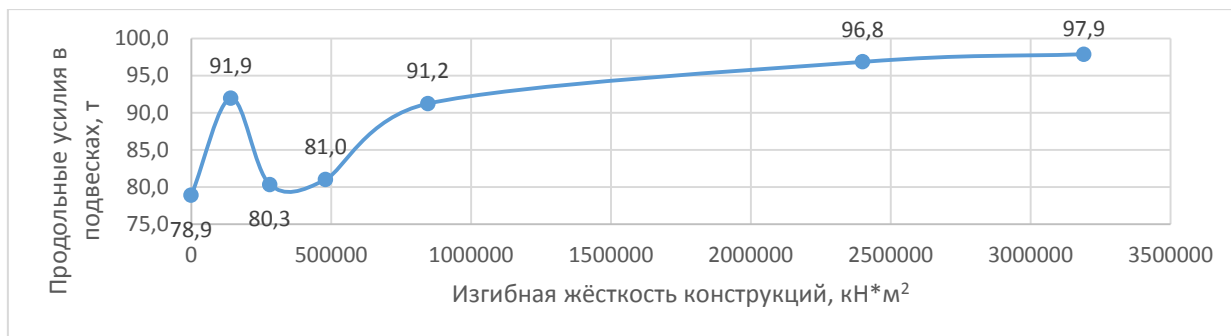


Рисунок 12 – Диаграмма максимальных продольных усилий в подвесках

Figure 12 – Diagram of maximum longitudinal forces in suspensions

В рамках расчётного исследования второго конструктивного решения, предусматривающего установку жёстких вертикальных связей между подвешенными перекрытиями, также были проведено сравнение напряжённо-деформированного состояния исходной и изменённой расчётной модели. Результаты этого сравнения представлены на диаграммах (рис. 13) и в таблице 2.

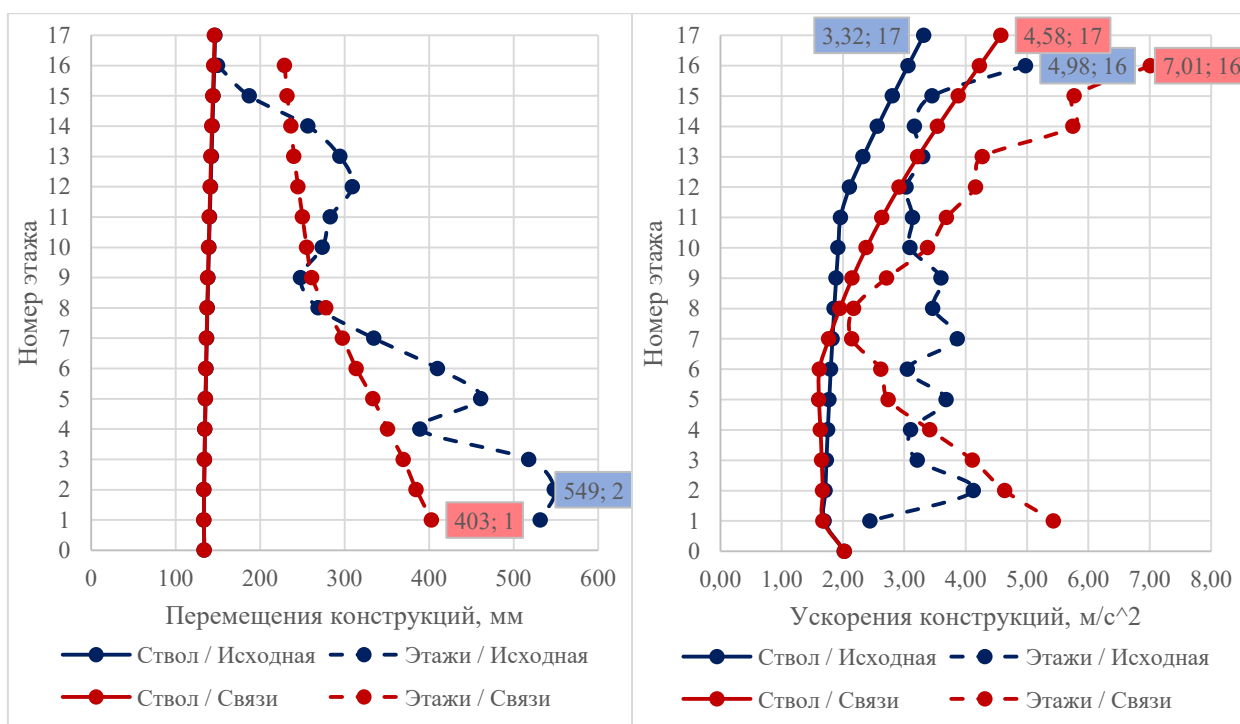


Рисунок 13 – Диаграммы а) перемещений; б) ускорений конструкций при сейсмическом воздействии в горах св. Ильи

Figure 13 – Diagrams of a) displacements; b) accelerations of structures under seismic action in the mountains of St. Elias

Таблица 2 – Сравнение параметров напряжённо-деформированного состояния исходной расчётной модели и модели с внедрёнными вертикальными связями

Table 2 – Comparison of the parameters of the stress-strain state of the initial computational model and the model with embedded vertical links

Параметры НДС	Исходная модель	Модель с вертикальными связями
Максимальное перемещение конструкций ствола, мм	147	146
Максимальное перемещение подвешенных перекрытий, мм	549	403
Максимальное ускорение конструкций ствола, мм	3,32	4,58
Максимальное ускорение подвешенных перекрытий, мм	4,98	7,01
Максимальные нормальные напряжения стен ствола моделей вдоль вертикальной оси, т/м ²	-1111	-1090,4
Максимальные моменты, действующие на сечение ортогональной оси, в стенах ствола моделей, т/м ²	28,63	28,45
Максимальные продольные усилия в подвесках, т	78,9	111,1

Заключение

1. Установка включающихся связей не влияет на перемещение конструкций ядра здания, но позволяет добиться уменьшения опасных перемещений подвешенных этажей. Более высокая жёсткость включающихся связей обеспечивает лучшие результаты в устранении эффекта раскачки перекрытий.
2. Введение включающихся связей приводит к увеличению жёсткости подвесной структуры и усилий, возникающих в несущих элементах системы.
3. Жёсткость вводимых трубных связей следует определять по расчёту, стремясь при этом уменьшить деформации конструкций без существенного увеличения усилий, возникающих в элементах системы.
4. Наименьшие значения взаимных смещений подвешенных перекрытий установлены при рассмотрении жёстких вертикальных связей. При этом введение таких связей может привести к увеличению продольных усилий в подвесках.

Список литературы

1. Патент № 477227 SU МПК E04H 9/02. Подвесное здание: № 1691920: заявл. 29.07.1971: опубл. 15.07.1975 / Корчинский И.Л., Грилль А.А., Чернявский И.З., Попов И.В., Каплан В.Е., Фридбург В.И. 2 с.
2. Патент № 1 173 027 SU МПК E04H 9/02. Многоэтажное сейсмостойкое здание: № 3676356: заявл. 22.12.1983: опубл. 15.08.1985 / Дуброва Е.П., Щербина В.И., Тимофеенко Л.П., Гордеев И.П. 5 с.
3. Патент № 1 176 052 SU МПК E04H 9/02. Многоэтажное сейсмостойкое здание: № 3718469: заявл. 29.03.1984: опубл. 30.08.1985 / Щербина В.И., Тимофеенко Л.П. 4 с.
4. Патент № 2 074 303 RU МПК E04H 9/02. Подвесное здание повышенной этажности: № 94039800/3: заявл. 24.10.1994: опубл. 27.02.1997 / Таланов Б.П. 5 с.
5. Патент № 2 186 183 RU МПК E04H 9/02. Сейсмостойкое здание подвешенного типа: № 2000112693/03: заявл. 22.05.2000: опубл. 27.07.2002 / Остроменский П.И., Никифоров И.С., Болотов А.С. 10 с.

6. Wang C., Lu Z., Tu Y. Dynamic Responses of Core-Tubes with Semi-Flexible Suspension Systems Linked by Viscoelastic Dampers under Earthquake Excitation. *Advances in Structural Engineering*. 2011, no. 14 (5), pp. 801–813. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.5.801>
7. Cai W., Yu B., Kaewunruen S. Shaking Table Tests of Suspended Structures Equipped with Viscous Dampers. *Applied Sciences*. 2019, no. 9 (13), pp. 2612–2627. <https://doi.org/10.3390/app9132616>
8. Cao W., Lu Z., Zhang J., et al. Shaking table test and analysis of core-tube partial suspension structures. *China Civil Engineering Journal*. 2007, no. 40 (3), pp. 40–45.
9. Liu Y., Lu Z. Seismic Performance and Storey-Based Stability of Suspended Buildings. *Advances in Structural Engineering*. 2014, no. 17 (10), pp. 1531–1550. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.10.1531>
10. Liu Y., Lu Z. Seismic behavior of suspended building structures with semi-rigid connections. *Earthquakes and Structures*. 2014, no.7, pp. 415–448. <https://doi.org/10.12989/EAS.2014.7.4.415>
11. Belash T., Rybakov P. Buildings with suspended structures in seismic areas. *Magazine of Civil Engineering*. 2016, no. 5, pp. 17–26. <https://doi.org/10.5862/MCE.65.2>
12. He Q., Yin A., Fan Z., He L. Seismic responses analysis of multi-story suspended floors system. *Vibroengineering*. 2021, no. 23, pp. 167–182. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21478>
13. Белаш Т.А., Свитлик И.В. Перспективное использование конструктивных систем зданий подвешенного типа в сейсмических районах // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. №5. С. 64–72. [In Russian]
14. Belash T., Svitlik I. Damping of structures of earthquake resistant suspended buildings. *Proceedings of the 6 th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2022*. Sochi: Springer, Cham, 2023, pp. 289–297.

References

1. Patent № 477227 SU MPK E04H 9/02. Podvesnoe zdanie: № 1691920: zayavl. 29.07.1971: opubl. 15.07.1975 / Korchinskij I.L., Grill' A.A., Chernyavskij I.Z., Popov I.V., Kaplan V.E., Fridburg V.I. 2 s.
2. Patent № 1 173 027 SU MPK E04H 9/02. Mnogoetazhnoe sejsmostojkoe zdanie: № 3676356: zayavl. 22.12.1983: opubl. 15.08.1985 / Dubrova E.P., Shcherbina V.I., Timofeenko L.P., Gordeev I.P. 5 s.
3. Patent № 1 176 052 SU MPK E04H 9/02. Mnogoetazhnoe sejsmostojkoe zdanie: № 3718469: zayavl. 29.03.1984: opubl. 30.08.1985 / Shcherbina V.I., Timofeenko L.P. 4 s.
4. Patent № 2 074 303 RU MPK E04H 9/02. Podvesnoe zdanie povyshennoj ehtazhnosti: № 94039800/3: zayavl. 24.10.1994: opubl. 27.02.1997 / Talanov B.P. 5 s.
5. Patent № 2 186 183 RU MPK E04H 9/02. Sejsmostojkoe zdanie podvesnogo tipa: № 2000112693/03: zayavl. 22.05.2000: opubl. 27.07.2002 / Ostromenskij P.I., Nikiforov I.S., Bolotov A.S. 10 s.
6. Wang C., Lu Z., Tu Y. Dynamic Responses of Core-Tubes with Semi-Flexible Suspension Systems Linked by Viscoelastic Dampers under Earthquake Excitation. *Advances in Structural Engineering*. 2011, no. 14 (5), pp. 801–813. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.5.801>
7. Cai W., Yu B., Kaewunruen S. Shaking Table Tests of Suspended Structures Equipped with Viscous Dampers. *Applied Sciences*. 2019, no. 9 (13), pp. 2612–2627. <https://doi.org/10.3390/app9132616>
8. Cao W., Lu Z., Zhang J., et al. Shaking table test and analysis of core-tube partial suspension structures. *China Civil Engineering Journal*. 2007, no. 40 (3), pp. 40–45.

9. Liu Y., Lu Z. Seismic Performance and Storey-Based Stability of Suspended Buildings. *Advances in Structural Engineering*. 2014, no. 17 (10), pp. 1531–1550. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.10.1531>
10. Liu Y., Lu Z. Seismic behavior of suspended building structures with semi-rigid connections. *Earthquakes and Structures*. 2014, no.7, pp. 415–448. <https://doi.org/10.12989/EAS.2014.7.4.415>
11. Belash T., Rybakov P. Buildings with suspended structures in seismic areas. *Magazine of Civil Engineering*. 2016, no. 5, pp. 17–26. <https://doi.org/10.5862/MCE.65.2>
12. He Q., Yin A., Fan Z., He L. Seismic responses analysis of multi-story suspended floors system. *Vibroengineering*. 2021, no. 23, pp. 167–182. <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21478>
13. Belash T.A., Svitlik I.V. Perspektivnoe ispol'zovanie konstruktivnykh sistem zdaniy podvesnogo tipa v sejsmicheskikh rajonakh. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo Bezopasnost' sooruzhenij*. 2021, no. 5, pp. 64–72. [In Russian]
14. Belash T., Svitlik I. Damping of structures of earthquake resistant suspended buildings. *Proceedings of the 6 th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2022*. Sochi: Springer, Cham, 2023, pp. 289–297.

Информация об авторах /Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «Научно-исследовательский центр «Строительство». Москва, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

Свитлик Илья Владимирович, аспирант кафедры «Металлические и деревянные конструкции», ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, Российская Федерация svitlik.i@yandex.ru

Ilya V. Svitlik, postgraduate student, Department of Metal and Timber Constructions, St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg, Russian Federation

УДК 699.8

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-67-78](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-67-78)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Повышение эксплуатационной надёжности и безопасности каналов в сборной облицовке из бетона на некондиционных заполнителях

Васильева Елена Викторовна¹, Федоров Виктор Матвеевич²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова.
Новочеркасск, Российская Федерация

²Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова – филиал
Донского государственного аграрного университета.
Новочеркасск, Российская Федерация

Аннотация: Статья посвящена проблеме надежности и безопасности каналов водохозяйственных систем. Состояние значительной части таких каналов на территории Северного Кавказа является сегодня крайне неудовлетворительным, что приводит к подъему уровня грунтовых вод, засолению и заболачиванию прилегающих земель, загрязнению мест проживания населения. Для ремонта и восстановления каналов водохозяйственных систем и недопущения экологического вреда компонентам окружающей среды, посредством минимизации потерь на фильтрацию, как в нормальных условиях эксплуатации, так и при сейсмических воздействиях, предложены сборные облицовки каналов из бетона на недорогих некондиционных заполнителях. Несмотря на относительно невысокое качество и доступность заполнителей, бетоны и изготовленные из него плиты, лотки и трубы, отличаясь высоким ресурсосберегающим эффектом, отвечают требованиям надежности и безопасности. Достигается требуемое качество добавлением в бетонную смесь пластификатора формиатно-спиртового, обладающего суперразжижающим эффектом, снижающим водопотребность бетонной смеси (водоредуцирующий эффект) и повышающим конструктивно-технические и эксплуатационные свойства, в том числе, и снижение сейсмической реакции. Рекомендованные меры позволят значительно снизить потери подаваемой потребителям воды в нормальных и экстремальных (при сейсмическом воздействии) условиях эксплуатации, предотвратить подтопление, загрязнение и заболачивание прилегающих территорий.

Ключевые слова: безопасность, надежность, сейсмостойкость, водохозяйственная система, сборные элементы, бетон, заболачивание, подтопление, засоление, экологический вред, некондиционные заполнители, планирование эксперимента, прочность, морозостойкость, геометрический образ

Для цитирования: Васильева Е.В., Федоров В.М. Повышение эксплуатационной надёжности и безопасности каналов в сборной облицовке из бетона на некондиционных заполнителях // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 2. С. 67–78. DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-67-78](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-67-78)

@ E.V. Vasilyeva, V.M. Fedorov, 2023

Design, construction and reconstruction of earthquake-resistant buildings and structures

Improving the operational reliability and safety of channels in precast concrete cladding on substandard aggregates

Elena V. Vasilyeva¹, Viktor M. Fedorov²

¹South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov.
Novocherkassk, Russian Federation

²Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov –
Branch of Don State Agrarian University.
Novocherkassk, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the problem of safety and reliability of water management systems. Most of these systems in the North Caucasus are in unsatisfactory condition, which leads to a rise in the groundwater level, salinization and contamination of adjacent lands, flooding of territories, pollution of places of residence and a decrease in the standard of living of the population. For the repair and restoration of systems and prevention of environmental damage to environmental components, by reducing filtration losses, both under normal operating conditions and under seismic impacts, precast concrete elements on inexpensive non-composite aggregates are proposed. Despite their (aggregates) relatively low quality and availability, concretes and trays, pipes and slabs made of it are characterized by a high resource-saving effect and meet the requirements of safety and reliability. This is achieved by adding a formiate-alcohol plasticizer to the concrete mixture, which has a super-liquefying effect that reduces the water consumption of the concrete mixture (water-reducing effect) and increasing the construction, technical and operational properties, including the reduction of seismic activity. The recommended proposals will significantly reduce the losses of water supplied to consumers, both in normal and extreme operating conditions, prevent flooding, pollution and waterlogging of adjacent territories, and improve the living conditions of the population.

Keywords: safety, reliability, seismic resistance, water management system, prefabricated elements, concrete, waterlogging, flooding, salinization, environmental damage, substandard aggregates, experiment planning, strength, frost resistance, geometric image of the model

For citation: Vasilyeva E.V., Fedorov V.M. Improving the operational reliability and safety of channels in precast concrete cladding on substandard aggregates. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 2, pp. 67-78. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-67-78](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-67-78)

Введение

Водохозяйственные системы представляет собой совокупность линейно-протяженных сооружений (каналов) и разбросанных на большой территории малых гидротехнических и других сооружений. Возведение их из монолитного бетона сопряжено с большими трудностями, связанными с доставкой небольших порций бетонной смеси, проведением на месте опалубочных и арматурных работ, с укладкой, уплотнением и уходом за бетоном в полевых условиях. Это влечет за собой низкую производительность труда, длительные сроки строительства, низкоэффективное использование строительных машин, затрудненный контроль качества работ. Невысокое качество работ негативно отражается на эксплуатации систем, не говоря уже о функционировании сооружений в условиях сейсмического воздействия [16, 14, 2].

Переход на сборные железобетонные сооружения позволит значительно сократить сроки их возведения, снизить материалоемкость сооружений, перенести в заводские условия большую часть строительных операций, на 40–50% снизить численность работающих, повысить производительность труда и качество работ, что положительно скажется на безопасности, надежности и сейсмостойкости водохозяйственных систем [16, 3, 11].

К основным потребителям сборных железобетонных элементов на водохозяйственных системах относятся межхозяйственные и хозяйственные каналы, лотковые каналы, трубопроводы и сооружения на них. Только на Северном Кавказе протяженность всей сети каналов достигает 80 тыс. км. Около 70% не облицованы, пятая часть лотковых каналов и 40% трубопроводов не подлежат ремонту и требуют замены. В сложившейся ситуации необходимо наращивание производства железобетонных плит, лотков, труб и других сборных элементов (рис.1) для использования при выполнении ремонтно-восстановительных работ и улучшения, тем самым, технического состояния систем [2, 5, 6, 10, 11, 12].

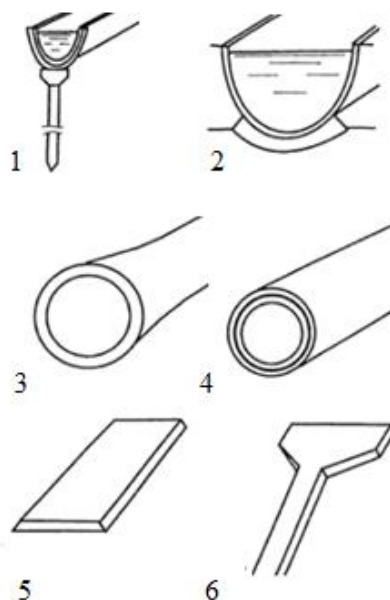


Рисунок 1 – Сборные элементы водохозяйственных систем

1 – лотки раструбные на сваях; 2 – лотки-оболочки крупногабаритные; 3 – безнапорные трубы; 4 – трубы с металлическим сердечником; 5 – плиты напряжённые; 6 – сваи-колонны

Figure 1 – Prefabricated elements of water management systems

1 – bell-shaped trays on piles; 2 - large-sized shell trays; 3 – pressure-free pipes; 4 – pipes with a metal core; 5 – stressed plates; 6 – piles-columns

Значимость проблемы предполагает наращивание производства бетона на предприятиях стройиндустрии, что предусматривает добычу, переработку и транспортировку большого количества минерального сырья. В современных условиях затраты на это должны быть минимизированы, так как одной из основных задач строительства и водохозяйственного строительства в частности, является возведение объектов с наименьшими затратами [16, 8, 9].

Задача эта может быть решена с применением ресурсосберегающих технологий, позволяющих решать вопросы использования в качестве сырья дешевых местных строи-

тельных материалов. Практически во всех регионах страны имеются месторождения некондиционных нерудных полезных ископаемых, которые сегодня должны рассматриваться как дополнительные источники сырья с целью получения заполнителей для бетона, который, как известно, остается основным строительным материалом и в 21 веке [13, 9, 7, 2].

Целью работы является обоснование целесообразности применения местных некондиционных заполнителей для бетона в сборных облицовках каналов водохозяйственных систем, установление влияния рецептурных факторов на расход цемента, прочностные и эксплуатационные качества бетона с выявлением эффективности пластификатора формиатно-спиртового.

Материалы и методы

На территории Ростовской области наиболее востребованы нерудные материалы Потаповского, Быстрореченского и Жирновского месторождений. Щебень и высевка (отход дробления) из каменных пород этих месторождений используются в качестве заполнителей для бетона. Известняковые заполнители Быстрореченского и Жирновского месторождений, отличаются высокой прочностью и чистотой, а особенности их кристаллохимического строения обеспечивают физико-химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента, что положительным образом сказывается на прочностных и эксплуатационных качествах бетона. Поэтому известняковые заполнители и пользуются большим спросом у строителей. Что касается заполнителей из песчаника Потаповского месторождения, то несмотря на их относительную дешевизну (на 20–30%), спрос на них существенно ниже. Связано это с повышенным содержанием в заполнителях загрязняющих (пылевидных и глинистых) частиц: в щебне фракции 5–40 мм содержится 3,3–3,8%, а в высевке, определяемой отмучиванием, свыше 15% [9, 7, 2]. Эти частицы отрицательно влияют на свойства бетона, поэтому чаще всего стремятся к использованию чистых заполнителей, что на практике, по ряду причин, не всегда удается. Отрицательное влияние «грязных» заполнителей компенсируют перерасходом цемента, что, во-первых, недопустимо, а во-вторых, ведет к удорожанию бетона и бетонных работ [7, 1]. Важно и то, что загрязняющие частицы не обеспечивают требуемой удобоукладываемости бетонной смеси. Приходится увеличивать её (смеси) водосодержание, приводящее, однако, к снижению качества бетона и перерасходу цемента. Для экономии цемента и снижения начального водосодержания смеси без ухудшения строительно-технических и технологических свойств бетона, рекомендовано использование в составе смеси пластификатора формиатно-спиртового (ПФС), который является побочным продуктом производства пентаэритрита, представляющего собой водный раствор формиата натрия, сиропообразующих веществ и полиспиртов – монопентаэритрита и полипентаэритритов. ПФС, более чем на порядок дешевле С-3, СМФ, ЛСТМ и других подобных им суперпластификаторов, и применяется в виде водного раствора [3, 10, 14].

Для выявления влияния физико-химического воздействия водного раствора ПФС на прочностные и эксплуатационные свойства бетона на заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц использовался Новороссийский портландцемент марки 500, заполнителями служили щебень-песчаник фракции 5–40 мм Потаповского месторождения с содержанием пылевидных и глинистых частиц в количестве 3,3–3,8%, и отход камнедробления песчаника фракции 0–5 мм (высевка) Потаповского месторождения с модулем крупности 2,50 с содержанием пылевидных и глинистых частиц свыше 15%. Для решения рецептурно-технологических задач применялись методы планирования эксперимента с построением геометрического образа функции отклика способами линейной алгебры [4, 15]. При этом соблюдались соотношения: $C+Выс = 950 \text{ кг/м}^3$, $Щ = 1270 \text{ кг/м}^3$, где: C , $Выс$, $Щ$ – соответственно, расходы цемента, высевки, щебня.

Условия кодирования и варьирования факторов планируемого экспериментального исследования принимались с учетом составов бетона плит, лотков, труб и свай и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование и варьирование факторов

Table 1 – Coding and variation of factors

Факторы	Код X_i	Основной уровень, X_0 , %	Интервал варьирования, ΔX_i	Нижний уровень, «-»	Верхний уровень, «+»
Цемент	X_1	400	150	250	550
ПФС	X_2	3,0	2,0	1,0	5,0

Графический план эксперимента представлен на рисунке 2, а матрица планирования и условия эксперимента приведены в таблице 2.

Из рисунка 2 видно, что точки принятого плана эксперимента имеют координаты вершин правильного шестиугольника, построенного в пределах варьирования факторов ± 1 в кодированной форме. Выбранный план удобен тем, что переход от кодированных значений факторов к натуральным и наоборот можно осуществить графически по соответственным осям (рис. 2). По результатам семи опытов (шесть вершин и центр шестиугольника) вычисляются неизвестные коэффициенты уравнения регрессии второго порядка [4,15]:

$$\hat{y}_R = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (1)$$

где: $b_0 = (0y) - \sum_{i=1}^k (i i y); b_i = 1/3(i y); b_{ij} = 4/3(i j y);$

$$b_{ii} = 2/3(i i y) + 5/6 \sum_{i=1}^k (i i y) - (0y). \quad (2)$$

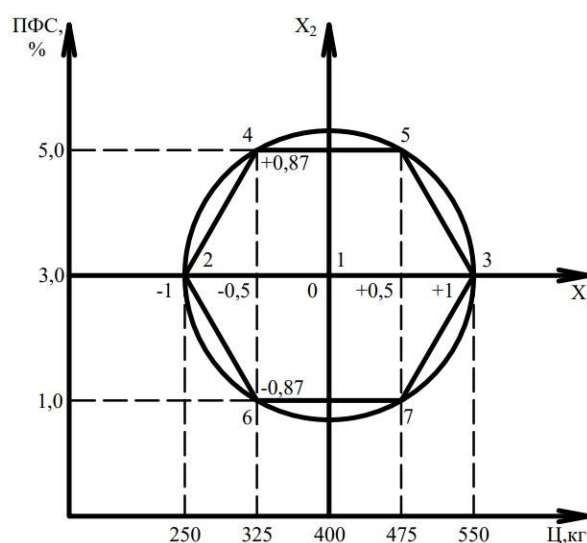


Рисунок 2 – План эксперимента на шестиугольнике

Figure 2 – The plan of the experiment on the hexagon

Таблица 2 – Матрица планирования и условия эксперимента

Table 2 – Planning matrix and experimental conditions

Номер опыта	План		X_1^2	X_2^2	X_1X_2	Факторы	
	X_1	X_2				X_1 (Ц)	X_2 (ПФС)
1	0	0	0	0	0	400	3,0
2	-1	0	1	0	0	250	3,0
3	1	0	1	0	0	550	3,0
4	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43	325	5,0
5	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43	475	5,0
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	325	1,0
7	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	475	1,0

По формулам (2) были подсчитаны коэффициенты уравнения регрессии второго порядка, расчётные значения которых приведены ниже:

$$b_0 = 174,9 - (77,0 + 63,0) = 34,9; \quad b_1 = 35,3/3 = 11,77;$$

$$b_2 = 2,44/3 = 0,82; \quad b_{12} = 4/3 \cdot (0,26) = 0,35;$$

$$b_{11} = 2/3 \cdot (77,0) + 5/6 \cdot (77,0 + 63,0) - 174,9 = -6,89;$$

$$b_{22} = 2/3 \cdot (63,0) + 5/6 \cdot (77,0 + 63,0) - 174,9 = -16,23.$$

Для прочности бетона на сжатие после тепловлажностной обработки было получено регрессионное уравнение в виде:

$$\hat{y}_R = 34,9 + 11,77X_1 + 0,82X_2 - 6,89X_1^2 - 16,23X_2^2 + 0,35X_1X_2 \quad (3)$$

Регрессионный анализ модели (3) произведём после определения ошибки эксперимента и расчёта ошибок коэффициентов уравнения. С учётом трёхкратной повторности опытов, ошибка проведённого эксперимента по воспроизводимости составила

$$S_{эв} = \sqrt{S_{эв}^2} = 0,18.$$

Таблица 3 – Расчёт ошибок коэффициентов

Table 3 – Calculation of error coefficients

b_m	b_0	b_i	b_{ii}	b_{ij}
T_i	1,0	0,577	1,224	1,155
$T_i \cdot S_{эв}$	0,18	0,104	0,220	0,208
$t \cdot T_i \cdot S_{эв}$	0,317	0,183	0,387	0,366

Таблица 4 – Регрессионный анализ модели

Table 4 – Regression analysis of the model

b_m	Начальная модель	$b_{кр}$	Конечная модель	ijy	$b_{ij}(ijy)$
b_0	34,9	0,317	34,9	174,9	6104,01
b_1	11,77	0,183	11,77	35,3	415,48
b_2	0,82	0,183	0,82	2,44	2,00
b_{11}	-6,89	0,387	-6,89	77,0	-530,53
b_{22}	-16,23	0,387	-16,23	63,0	-1022,49
b_{12}	0,35	0,366	0	0,26	0

Сумма квадратов SS_{mod} :

$$SS_{mod} = 4968,47;$$

$$SS_{эв} = 0,448.$$

Сумма квадратов $SS = SS_{mod} + SS_{эв} = 4968,92$.

Проводим проверку адекватности модели при риске $\alpha = 0,05$, и числе степеней свободы $f_{на} = 7 - 5 = 2$ и $f_э = N(n - 1) = 14$. Сумма квадратов $SS_{на}$:

$$SS_{на} = (yy) - (SS_{mod} + SS_{эв}) = 4969,13 - (4968,47 + 0,448) = 0,212,$$

– дисперсия неадекватности $S_{на}^2$:

$$S_{на}^2 = SS_{на} / f_{на} = 0,212 / (7 - 5) = 0,106 ,$$

– критерий Фишера:

$$F_a = 3,31 < F_T = 3,76.$$

Таким образом, можно допустить, что математическая модель (4)

$$\hat{y}_R = 34,9 + 11,77X_1 + 0,82X_2 - 6,89X_1^2 - 16,23X_2^2, \quad (4)$$

с риском $\alpha = 0,05$ адекватно описывает результаты эксперимента. Анализ модели (4) произведём после определения её типа и построения соответствующего ей геометрического образа. Для этого, воспользуемся общей теорией поверхностей второго порядка [4,15], принимая:

$$b_0 - y = a_0; \quad b_{ij} = 2a_{ij}; \quad b_i = 2a_i; \quad b_{ii} = a_{ii}. \quad (5)$$

Инварианты кривой второго порядка составят:

– сумма коэффициентов при квадратичных членах:

$$S = b_{11} + b_{22} = -6,89 - 16,23 = -23,12;$$

– определитель, составленный из коэффициентов при старших членах:

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -6,89 & 0 \\ 0 & -16,23 \end{vmatrix} = 111,83; \quad (6)$$

– определитель третьего порядка, составленный из всех коэффициентов:

$$\Delta = \begin{bmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6,89 & 0 & 5,89 \\ 0 & -16,23 & 0,41 \\ 5,89 & 0,41 & 34,9 \end{bmatrix} = 4466,92 \quad (7)$$

Принимая во внимание, что $\delta > 0$, $\Delta \neq 0$, $S\Delta < 0$ уравнение (4) описывает эллиптическую поверхность отклика.

Используя инварианты (5), (6) и (7), приведём уравнение (4) к удобной для анализа и геометрической интерпретации канонической форме:

$$\lambda_1 \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \bar{X}_2^2 + C = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты канонической формы вычисляем через инварианты:

$$C = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{4466,92}{111,83} = 39,94 \quad (9)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{s}{2} \pm \sqrt{\frac{s^2}{4} - \delta} = -11,56 \pm 4,67; \quad (10)$$

$$\lambda_1 = -6,89; \lambda_2 = -16,23.$$

С геометрической точки зрения переход к уравнению (8) означает перенос начала координат в центр кривой (поверхности) и поворот их на некоторый угол до совмещения с главными осями кривой (поверхностями) второго порядка.

С учётом (9) и (10) каноническая форма уравнения (4) примет вид:

$$-6,89 \bar{X}_1^2 - 16,23 + 39,94 = R_{ТВО}, \quad (11)$$

а координаты центра поверхности отклика определяются по формулам:

$$\bar{X}_{01} = \frac{\begin{vmatrix} -0,5b_1 & 0,5b_{12} \\ -0,5b_2 & b_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -5,89 & 0 \\ -0,41 & -16,23 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -6,89 & 0 \\ 0 & -16,23 \end{vmatrix}} = \frac{95,59}{111,83} = 0,86,$$

$$\bar{X}_{02} = \frac{\begin{vmatrix} b_{11} & -0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & -0,5b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -6,89 & -5,89 \\ 0 & -0,41 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -6,89 & 0 \\ 0 & -16,23 \end{vmatrix}} = \frac{2,825}{111,83} = 0,025. \quad (12)$$

Так как коэффициент b_{12} равен нулю, то нет поворота новых осей относительно первоначальных.

По канонической форме (11) полуоси эллипсов определяются из нижеследующих соотношений:

$$a = \sqrt{\frac{39,94 - R_{ТВО}}{6,89}}; \quad b = \sqrt{\frac{39,94 - R_{ТВО}}{16,23}}. \quad (13)$$

Задаваясь для функции отклика шагом $\Delta \hat{y}_R = 1,0$, получим ряд сечений, проекции которых на факторную плоскость будут эллипсами с полуосями, определяемыми по формулам (13).

$$\text{Для } R_{ТВО} = 38,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 38,0}{6,89}} = 0,53; b = \sqrt{\frac{39,94 - 38,0}{16,23}} = 0,35;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 36,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 36,0}{6,89}} = 0,76; b = \sqrt{\frac{39,94 - 36,0}{16,23}} = 0,49;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 32,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 32,0}{6,89}} = 1,07; b = \sqrt{\frac{39,94 - 32,0}{16,23}} = 0,70;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 28,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 28,0}{6,89}} = 1,32; b = \sqrt{\frac{39,94 - 28,0}{16,23}} = 0,86;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 24,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 24,0}{6,89}} = 1,52; b = \sqrt{\frac{39,94 - 24,0}{16,23}} = 0,99;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 20,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 20,0}{6,89}} = 1,70; b = \sqrt{\frac{39,94 - 20,0}{16,23}} = 1,11;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 16,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 16,0}{6,89}} = 1,86; b = \sqrt{\frac{39,94 - 16,0}{16,23}} = 1,22;$$

$$\text{Для } R_{ТВО} = 14,0; a = \sqrt{\frac{39,94 - 14,0}{6,89}} = 1,94; b = \sqrt{\frac{39,94 - 14,0}{16,23}} = 1,26.$$

Геометрический образ модели $\hat{y}_R (R_{ТВО})$ изображен на рисунке 3.

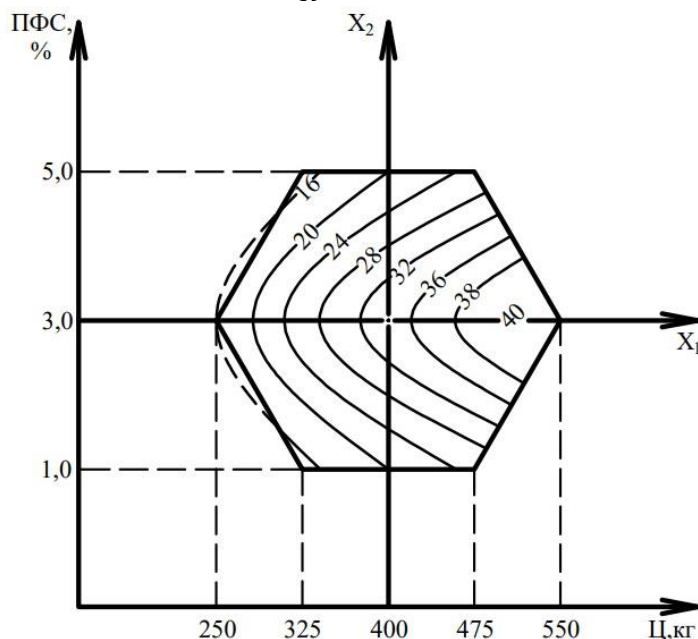


Рисунок 3 – Геометрический образ модели \hat{y}_R прочности бетона после тепловлажностной обработки (ТВО)

Figure 3 – Geometric image of the concrete strength model after heat and moisture treatment

Результаты и обсуждение

В пользу предложенных для сборных железобетонных элементов бетонов свидетельствуют и результаты сравнительных испытаний бетонных образцов-кубов с расходами цемента 400 кг/м^3 и 475 кг/м^3 с такими же заполнителями, но без добавления в смесь пластификатора ПФС. Прочность образцов после ТВО, имеющих дозировку цемента в количестве 400 кг/м^3 , соответствовала $19,3 \text{ МПа}$, а в количестве 475 кг/м^3 – $24,2 \text{ МПа}$. При наличии в смеси пластификатора ПФС (3%), прочностные показатели бетонов с расходами цемента 400 кг/м^3 и 475 кг/м^3 , достигают, соответственно, $34,9 \text{ МПа}$ и $39,1 \text{ МПа}$. Такой (60–80%) прирост прочности объясняется тем, что пылевидные и глинистые частицы в присутствии пластификатора ПФС играют в смеси роль микрозаполнителя, способного выполнять функции дополнительных центров кристаллизации и проявлять дефлокулирующее действие в гидратирующейся системе «цемент-вода» [7,1].

Морозостойкость бетона оценивалась способностью выдерживать в насыщенном растворе соли состоянии многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения и существенного снижения прочности [14]. Нормируемые характеристики определялись по результатам испытаний бетонных образцов-кубов с ребром 100 мм 28-суточного возраста. Насыщение и оттаивание образцов осуществлялось в ваннах с 5% водным раствором хлорида натрия температурой 20°C , а замораживание – в морозильной камере, обеспечивающей достижение и поддержание температуры воздуха и среды замораживания минус 50°C . Состав бетона: $\text{Ц}=475 \text{ кг/м}^3$, $\text{Выс}=475 \text{ кг/м}^3$, $\text{Щ}=1270 \text{ кг/м}^3$, $\text{В}=180 \text{ л/м}^3$, $\text{ПФС}=14,3 \text{ кг/м}^3$.

Результаты испытаний при 37 циклах попеременного замораживания и оттаивания:

- среднее значение прочности R_{cp} контрольных образцов – $47,6 \text{ МПа}$, основных – $48,2 \text{ МПа}$;
- среднее квадратичное отклонение σ_n для контрольных образцов – $1,87 \text{ МПа}$, для основных – $1,33 \text{ МПа}$;

– коэффициент вариации V_m прочности для контрольных образцов – 3,93%, для основных – 2,76%;

– нижняя граница доверительного интервала прочности при критерии Стьюдента 2,57 для контрольных образцов: $47,6 - 2,57 \cdot 1,87 = 42,8$ МПа; для основных: $48,2 - 2,57 \cdot 1,33 = 44,7$ МПа.

Таким образом, образцы бетона с упомянутым выше составом выдержали 37 циклов испытаний, что соответствует марке бетона по морозостойкости 300.

В результате проведенных исследований появляется возможность использования в бетоне недорогих некондиционных заполнителей и расширения, таким образом, сырьевой базы для производства плит, лотков, труб, свай и других сборных железобетонных элементов для широкого их применения при проведении ремонтных и восстановительных работ на каналах водохозяйственных систем, снижения стоимости работ и сокращения сроков их выполнения.

Выводы

Применение сборных железобетонных элементов на ремонтируемых или восстанавливаемых каналах водохозяйственных систем позволит сократить сроки ремонтно-восстановительных работ, повысить производительность и качество выполняемых работ, что положительным образом скажется на надежности и сейсмостойкости систем. Проведенными исследованиями установлено, что использование недорогих некондиционных заполнителей в производстве плит, лотков, труб и других сборных железобетонных элементов обеспечит снижение затрат при их изготовлении без снижения качества изделий. Для экономии цемента и снижения начального водосодержания бетонных смесей на заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц предложено добавление в смесь пластификатора формиатно-спиртового, являющегося отходом производства пентаэритрита. Установлено положительное его влияние на прочностные и эксплуатационные свойства бетона, отвечающего установленным требованиям. Методом планирования эксперимента получена полиномиальная модель второго порядка, адекватно на 5%-ном уровне значимости описывающая зависимость прочности бетона на недорогих некондиционных заполнителях с повышенным содержанием загрязняющих частиц от расхода цемента и дозировки пластификатора ПФС: при расходе цемента от 250 до 550 кг/м³ дозировку пластификатора в виде водного раствора в количестве 2,8–3,2% от массы цемента, следует считать оптимальной; добавление пластификатора ПФС в состав смеси повысило прочность бетона после тепловой обработки на 60–80%. Ускоренными испытаниями бетонных образцов на морозостойкость в растворе хлорида натрия подтверждено соответствие бетона на недорогих местных заполнителях с повышенным содержанием пылевидных и глинистых частиц марке 300.

Результаты проведенных исследований выявили возможность расширения сырьевой базы для производства плит, лотков, труб и других сборных железобетонных элементов за счет использования в бетоне недорогих местных некондиционных заполнителей с повышенным содержанием загрязняющих частиц.

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных сооружений. Москва: Стройиздат. 1984. 671 с.
2. Бондаренко В.Л., Ключкович З.А. Прогнозирование и методика расчёта ущерба при чрезвычайных ситуациях для объектов народного хозяйства: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Изд-во О.О.О. Тарра. 2001. 79 с.
3. Волосухин В.А., Бондаренко В.Л., Свистунов Ю.А. Безопасность гидротехниче-

- ских сооружений. Краснодар: НГМА – КГАУ. 2001. 89 с.
4. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва: Финансы и статистика. 1981. 262 с.
 5. Дворкин А.Н., Дворкин О.Л. Физическое обоснование правила постоянства водопотребности бетонной смеси // *Технология бетонов*. 2008. № 12. С. 51–53.
 6. Иванов Е.С. Организация и производство гидротехнических работ. Москва: Агропромиздат. 1985. 398 с.
 7. Маилян Р.Л. Бетон на карбонатных заполнителях. Ростовск. гос. универ. Ростов-на-Дону: РГУ. 1967. 272 с.
 8. Несветаев Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 23–25.
 9. Розанов Н.П. Гидротехнические сооружения. Москва: Агропромиздат. 1985. 431 с.
 10. Сиротин Ю.Г. Основы строительного производства: учебное пособие / Ю.Г. Сиротин. Екатеринбург: УралГАХА. 2013. 169 с.: табл., схем., граф. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=473891> (дата обращения: 29.06.2021). ISBN 978-5-6231-2972-1. Текст: электронный.
 11. Турлов А.Г. Строительство и реконструкция водохозяйственных сооружений: учебное пособие / А.Г. Турлов. Йошкар-Ола: ПГТУ. 2014. 113 с.: табл., схем., граф. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=473891> (дата обращения: 29.06.2021). ISBN 978-5-8271-1957-1. Текст: электронный.
 12. Федоров В.М. Оценка надёжности водопроводящей сети оросительных систем // *Научный журнал КубГАУ*. 2011. № 65(01).10 с.
 13. Федоров В.М., Васильева Е.В., Яковенко Е.А. Безопасные и надежные сооружения водохозяйственных систем из укатанных бетонов. Новочеркасск: Лик. 2019. 166 с.
 14. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Косиченко Ю.М. Эксплуатационная надёжность оросительных систем. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦВШ. 2004. 388 с.
 15. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка результатов. Краснодар: КГАУ. 2004. 239 с.
 16. Ясинецкий В.Г. Организация и технология гидромелиоративных работ / В.Г. Ясинецкий, Н.К. Фенин, 3-е изд. Москва: Агропромиздат. 1986. 352 с.

References

1. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. *Tekhnologiya betonnyh i zhelezobetonnyh sooruzhenij*. Moscow: Strojizdat. 1984. 671 p. [In Russian]
2. Bondarenko V.L., Klyukovich Z.A. *Prognozirovanie i metodika raschyota ushcherba pri chrezvychajnyh situatsiyah dlya ob"ektov narodnogo hozyajstva: Uchebnoe posobie*. Rostov-na-Donu: Izd-vo O.O.O. Tarra. 2001. 79 p. [In Russian]
3. Volosuhin V.A., Bondarenko V.L., Svistunov Yu.A. *Bezopasnost' gidrotekhnicheskikh sooruzhenij*. Krasnodar: NGMA – KGAU. 2001. 89 p. [In Russian]
4. Voznesenskij V.A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah*. Moscow: Finansy i statistika. 1981. 262 p. [In Russian]
5. Dvorkin A.N., Dvorkin O.L. *Fizicheskoe obosnovanie pravila postoyanstva vodopotrebnosti betonnoj smesi. Tekhnologiya betonov*. 2008, no. 12, p. 51–53. [In Russian]
6. Ivanov E.S. *Organizatsiya i proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot*. Moscow: Agropromizdat. 1985. 398 p. [In Russian]
7. Mailyan R.L. *Beton na karbonatnyh zapolnitelyah*. Rostovsk. gos. univer. Rostov-na-Donu: RGU. 1967. 272 p. [In Russian]

8. Nesvetaev G.V. Effektivnost' primeneniya superplastifikatorov v betonah. *Stroitel'nye materialy*. 2006, no.10, pp. 23–25. [In Russian]
9. Rozanov N.P. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. Moskva: Agropromizdat. 1985. 431 p.
10. Sirotin Yu.G. *Osnovy stroitel'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie/ Yu.G. Sirotin*. Ekaterinburg: UralGAHA. 2013. 169 p.: tabl., skhem., graf. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=473891> (data obrashcheniya: 29.06.2021). ISBN 978-5-6231-2972-1. Tekst: elektronnyj. [In Russian]
11. Turlov A.G. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya vodohozyajstvennyh sooruzhenij: uchebnoe posobie / A.G. Turlov*. Jshkar-Ola: PGTU. 2014. 113 p.: tabl., skhem., graf. URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=473891> (data obrashcheniya: 29.06.2021). ISBN 978-5-8271-1957-1. Tekst: elektronnyj. [In Russian]
12. Fedorov V.M. Otsenka nadyozhnosti vodoprovodyashchej seti orositel'nyh sistem. *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2011, no. 65(01), 10 p. [In Russian]
13. Fedorov V.M., Vasil'eva E.V., Yakovenko E.A. Bezopasnye i nadezhnye sooruzheniya vodohozyajstvennyh sistem iz ukatannyh betonov. Novocherkassk: Lik. 2019. 166 p. [In Russian]
14. Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Kosichenko Yu.M. *Ekspluatacionnaya nadezhnost' orositel'nyh sistem*. Rostov-na-Donu: Izd-vo SKNCVSH. 2004. 388 p. [In Russian]
15. Yudin M.I. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka rezul'tatov*. Krasnodar: KGAU. 2004. 239 p. [In Russian]
16. Yasinetskij V.G. *Organizatsiya i tekhnologiya gidromeliorativnyh rabot / V.G. Yasinetskij, N.K. Fenin, 3-e izd.* Moscow: Agropromizdat. 1986. 352 p. [In Russian]

Информация об авторах/Information about the authors

Васильева Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экологии и промышленной безопасности» Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова. Новочеркасск, Российская Федерация
karalenka5@yandex.ru

Elena V. Vasilyeva, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of ecology and industrial safety, South Russian State Polytechnic University named after M.I. Platov. Novocherkassk, Russian Federation

Фёдоров Виктор Матвеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность и нефтегазовое дело» Новочеркасского инженерно-мелиоративного института имени А.К. Кортунова – филиала Донского государственного аграрного университета. Новочеркасск, Российская Федерация
viktor-fedorov1955@yandex.ru

Viktor M. Fedorov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department "Technosphere Safety and Oil and Gas Business", Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov – branch of Don State Agrarian University. Novocherkassk, Russian Federation