



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

DOI: 10.17818/2618-9285

EARTHQUAKE ENGINEERING, CONSTRUCTION SAFETY

ISSN 2618-9285

01 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seisrjournal.construction.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, мерзотоведение 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 29.03.2025 г. под номером 2275.

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 № 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.ru>).

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.ru

Периодичность: 6 раз в год

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

**Earthquake Engineering, Construction Safety,
Scientific and technical journal**

«Earthquake engineering, Construction 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) (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 or 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 29.03.2023 listed under the 2275 position.

Since May 14, 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 77-7274 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 man-made hazards (RAEE) (<http://raee.su>).

The Founder: A. A. P. IIS.

Website of the online publication: <http://seismococonstruction.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; 8-499-174-76-65. 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

Губин А.А.
(Москва, Российская Федерация)

Степеньственный секретарь редколлегии

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

Редакционная коллегия

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

Алехин 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)

Клименте 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)

Нерузинжал Фархатгисан, 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)

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

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

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

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

EARTHQUAKE ENGINEERING, CONSTRUCTIONS SAFETY

Editor-in-Chief

Vedyakov I.I., DSc, Professor
(Moscow, Russian Federation)

Deputy editor-in-Chief

Bubis A.A.,
(Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary

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

Editorial board

Akulov N.I., DSc in Geology, Professor (Irkutsk, Russian Federation)

Aleshin A.S., DSc in Mathematics and Physics, Professor (Moscow, Russian Federation)

Belash T.A., DSc, Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

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

Voznesenski E.A., DSc in Geology, Professor (Moscow, Russian Federation)

Gurev B.V., DSc, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zakharov V.S., DSc in Geology, Professor (Moscow, Russian Federation)

Pichev V.A., DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)

Krivtsov Yu.V., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

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

Nemchinov Yu.I., DSc, Professor (Kyiv, Ukraine)

Noroozinejad Parsangi Ehsan, PhD of Civil Eng., Professor (Kerman, Iran)

Paylonko O.V., DSc in Mathematics and Physics (Moscow, Russian Federation)

Rimshin V.I., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Semenov V.A., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Tonkikh G.P., DSc, Professor (Moscow, Russian Federation)

Uzdin A.M., DSc, Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

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

Khachiyani E.E., DSc, Professor (Yerevan, Republic of Armenia)

Cheverev V.G., DSc in Geology, Professor (Moscow, Russian Federation)

Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)

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

СОДЕРЖАНИЕ

№ 1 - 2023

Теоретические и экспериментальные исследования

Миняев О.П.

О зависимости трения грунта от интенсивности воздействия в расчётах подпорной стены на сейсмическую нагрузку 8

Низомов Д.Н., Сангинов С.И.

Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при сейсмических воздействиях 29

Белаш Т.А., Сафин Р.Р.

Проектирование коротковолновых радиопередающих антенн в особых климатических условиях 38

Теоретическое регулирование и разработка норм проектирования

Нефёдов С.С., Шовченко С.А.

Атласная программа для расчёта строительных конструкций объектов непользования атомной энергии в Ростехнадзоре 41

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Сабирова О.Б., Зенченко Д.В.

Пневмозащита водонапорных башен 54

Фото на обложке и в тексте из открытых источников.

CONTENTS
№ 1 – 2023

Theoretical and experimental studies

O.P. Minaev

On the dependence of soil friction on the intensity of pressure in the calculations of a retaining wall for a seismic load

8

D.N. Nizomov, A.M. Sanginov

Simulation of the interaction of the structure with the foundation under seismic impacts

29

T.A. Belash, R.R. Safin

Design of short-wave radio transmitting antennas in special climatic conditions

38

Technical regulation and design standards development

S.S. Nefedov, S.A. Shevchenko

Certification of programs for the analysis of building constructions of nuclear energy facilities at Rostechinform

44

Seismic protection and seismic isolation of buildings and structures

O.B. Sabirova, D.V. Zenchukova

Pneumatic protection of water towers

51

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

УДК 699.841: 626/627: 024

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-1-9-28](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-9-28)

Теоретические и экспериментальные исследования

О зависимости трения грунта от интенсивности воздействия в расчетах подпорной стенки на сейсмическую нагрузку

Минаев Олег Петрович^{1,2}

¹Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрущева, военный институт (инженерно-технический)

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.С. Макарова, институт водного транспорта

Аннотация: В работе приведены результаты расчёта гравитационных подпорных стенок различного типа (железобетонной консольной с передней консолью и массивной армированной бетонной) без учёта и с учётом трения грунта при расчёте на эксплуатационную статическую и сейсмическую нагрузки. Расчёты были проведены для заданных размеров подпорных стенок на характерных грунтах обратной засыпки из песчаных грунтов на слабых или средних грунтах основания. На основании этого была получена зависимость для определения угла трения грунта о тыловую поверхность стенки при сейсмической нагрузке различной интенсивности. В работе отмечается, что полученные результаты расчёта вполне согласуются с данными исследований о поведении песчаных грунтов при динамических волновых нагрузках.

Ключевые слова: подпорная стенка, трение грунта, нагрузка эксплуатационная, сейсмическая, волновая, интенсивность

Для цитирования: Минаев С.П. О зависимости трения грунта от интенсивности воздействия в расчетах подпорной стенки на сейсмическую нагрузку // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 1. С. 9–28.
DOI: [10.37153/2618-9283-2023-1-9-28](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-9-28)

Theoretical and experimental studies

On the dependence of soil friction on the intensity of pressure in the calculations of a retaining wall on a seismic load

Oleg P. Minaev^{1,2}

¹Military academy of logistics named army General A.V. Khruchev, Military institute (engineering and technical)

²Admiral Makarov State university of maritime, Institute of water transport

Abstract: The paper presents the results of the calculation of gravity retaining walls of various types (reinforced concrete corner with a front console and massive reinforced concrete) without taking

@ Минаев О.П., 2023

into account and taking into account soil friction when calculating operational static and seismic loads. Calculations were carried out for given dimensions of retaining walls and characteristics of backfill soils from sandy soils to weak clay base soils. Based on this, a dependence was obtained to determine the angle of friction of the soil on the rear surface of the wall under seismic loading of various intensities. The paper emphasizes that the obtained calculation results are in good agreement with research data on the behavior of sandy soils under dynamic wave loads.

Keywords: retaining wall, soil friction, load, operational, seismic, wave, intensity

For citation: Minaev O.P. On the dependence of soil friction on the intensity of pressure in the calculations of a retaining wall on a seismic load. *Earthquake engineering. Constructions safety* 2023, No. 1, pp. 9–28 (In Russian).
DOI: [10.57153/2618-9233/23-1-9-28](https://doi.org/10.57153/2618-9233/23-1-9-28)

1. ВВЕДЕНИЕ

Основные принципы и результаты расчетов и проектирования естественно-основанной и свайного фундамента гравитационной подпорной стенки на статическую (строительную и эксплуатационную) нагрузку хорошо известны [1–6], а на динамическую, в частности на сейсмическую нагрузку, требуют дальнейшей разработки – всестороннего осмысления по результатам расчета [1].

В работах [7–9] были представлены результаты расчета гравитационных подпорных стенок различного типа для широкого диапазона грунтовых условий в ее основании и песчаной грунтовой обратной засыпки на сейсмическую нагрузку. Однако эти расчеты были выполнены без учета трения грунта о тыловую поверхность подпорной стенки.

Известно [1–6], что трение грунта о тыловую поверхность подпорной стенки существенно влияет на результаты расчета подпорной стенки по несущей способности и устойчивости на статическую нагрузку.

Обычно, см., например [2], в расчетах угол трения грунта о подпорную стенку условно принимается равным углу φ внутреннего трения грунта обратной засыпки или его половине, $\varphi/2$.

С учетом полного характера динамического воздействия на подпорную стенку представлялось, что такая условность в назначении угла внутреннего трения грунта о подпорную стенку вряд ли должна иметь место при расчете на сейсмическую нагрузку.

Кроме того, в ряде работ, см., например, [1], существовало мнение, что уменьшение сопротивления сдвигу вызывается уменьшением угла внутреннего трения грунта при сейсмической нагрузке. Это ошибочное представление вошло в учебники и нормативные документы [4]. По утверждению проф. Иванова П.Л. [4] ошибка заключалась в том, что не учитывалось изменение σ в период действия динамических волновых нагрузок. Данное утверждение было подтверждено экспериментальными исследованиями, выполненными под руководством проф. Иванова П.Л. в лаборатории механики грунтов кафедры подземных сооружений, оснований и фундаментов Санкт – Петербургского Политехнического университета Петра Великого. Многочисленные исследования были проведены для проверки влияния динамической волновой нагрузки на трение песчаного грунта о полость вибрирующего штампа, установленного на поверхности грунта [4]. Применялся механический вибратор с электрическим приводом вала для возбуждения вращений кулачков

вибратора с заданным эксцентриситетом. В опытах на плоский сдвиг механический вибратор к статическим напряжениям от штамп и вибратор добавлял динамические напряжения от вращения кулачков вибратора действующие по гармоническому закону. Механический вибратор вертикального действия изменял напряжения в пределах значений $\pm \Delta\sigma$. При этом амплитуда динамического давления регулировалась путём изменения эксцентриситета кулачков вибратора, а частота – скоростью их вращения. Учет сопротивления сдвигу по зависимости Кулона в виде $\tau = \sigma - \Delta\sigma) \operatorname{tg} \phi$ свидетельствует о периодическом сдвиге штампа по поверхности песка.

В результате проведенных испытаний было установлено, что в диапазоне ускорений колебаний до 1.0 g угол внутреннего трения грунта не изменяется, а снижение сопротивления сдвигу должно учитываться изменением нормальных напряжений по подошве штампа. Таким образом, при вибрационных и сейсмических воздействиях устойчивость сооружений на сдвиг должна проверяться с учётом динамической составляющей напряжений при постоянном значении угла внутреннего трения грунта, положенных на статические испытания.

Целью настоящей работы является выявление особенностей расчёта и проектирования естественного основания и свайного фундамента подпорной стенки без учёта и с учётом трения грунта о тыловую поверхность стенки на сейсмическую нагрузку различной балльности и обоснование результатов полученных расчётов для определения угла трения грунта о вертикальную тыловую поверхность стенки – нормальных напряжений от сейсмической нагрузки. С учётом известных данных исследований проф. Иванова П.Л. о закономерностях поведения песчаных грунтов от нормальных напряжений на штамп под динамическими боковыми нагрузками, получены зависимости для вычисления угла трения грунта о подпорную стенку при сейсмической нагрузке различной интенсивности.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

Определение ширины b подошвы подпорных стенок различного типа (железобетонная угловая стенка с перпендикулярной консолью или массивная армированная бетонная стенка) в расчётах на статическую нагрузку обычно осуществляется с использованием формулы А.С. Сагха – Кириллова В.М. [5, 10, 11], которая имеет вид для стенки железобетонно-угловой

$$b = 2,2 \sqrt{\frac{E_a y_a}{(h_g + h_z)(0,75 \gamma_{cm} - \gamma_w) + \gamma_0}}, \quad (1)$$

массивной армированной бетонной

$$b = 2,6 \sqrt{\frac{E_a y_a}{h_g (0,8 \gamma_{cm} - \gamma_w) + h_0 \gamma_0}}, \quad (2)$$

где E_a – сила бокового давления на подпорную стенку, кН; y_a – высота приложения силы бокового давления относительно подошвы стенки, м; h_g – глубина водоёма у среза набережной, м; h_z – глубина заложения передней консоли стенки, м; h_0 – возвышение стенки над уровнем акватории, м; γ_{cm} – удельный вес материала стенки, кН/м³; γ_w – удельный вес воды; γ_0 – коэффициент влияния возвышения h_0 стенки над уровнем акватории, принимаемый равным 1 кН/м³. Формулы (1) и (2) взяты из работы проф. Кириллова В.М. (Методические указания на тему «Расчёт и проектирование естественного основания и свайного фундамента гравитационной подпорной стенки на статическую и сейсмическую нагрузку»

Института водных коммунальных, ЛИВТ, 2006). По мнению автора статьи, в формуле (2) учитывается конструктивное уменьшение ширины подошвы стенки на 0.5 м (см. рис. 2). Кроме того, автором статьи введен коэффициент γ_0 влияния возвышения h_0 стенки над уровнем акватории, позволяющий установить правильную размерность в формулах (1) и (2). В формулах (1) и (2) для определения ширины b подошвы стенки при сейсмической нагрузке значения E_a и u_a необходимо заменить соответственно на значения E_a^c и u_a^c .

При проектировании гидротехнических сооружений, возводимых в сейсмических районах, необходимо учитывать отдельно сейсмическое давление грунта и воды (в зависимости расположения грунта под водой) на стенку при сейсмических воздействиях.

В общем случае расположения грунта засыпки выше уровня воды и под водой предлагается использовать зависимость для определения ординаты e_a^c силы бокового давления грунта и воды

$$e_a^c = \left(q + \gamma_w h_w + \sum \gamma_i^c y_i \right) \lambda_a^c, \quad (3)$$

где γ_i^c – равнодействующая гравитационной силы удельного веса γ_i грунта – объемной (приходящейся на единицу объема) сейсмической силы; h_w – глубина воды от уровня грунтовых вод (ЛВ) засыпки до подошвы стенки; принимаемая равной глубине водоёма у берега набережной; y_i – мощность i -го слоя грунта засыпки; λ_a^c – коэффициент активного бокового давления (рапора) при сейсмическом воздействии.

Величина e_a^c является ординатой эпюр сейсмического давления грунта и свободной воды на поверхности стенки. Значения включают в себя как давление e_a грунта в обычных статических условиях, так и дополнительное сейсмическое давление на неё грунта и воды.

Коэффициент бокового активного давления λ_a^c с учётом угла ω трения грунта и подпорную стенку при сейсмическом воздействии определяется по зависимости

$$\lambda_a^c = \frac{\cos^2(\varphi - \varepsilon)}{(1 + \sqrt{\varepsilon})^2 \cos(\varphi + \varepsilon)}, \quad (4)$$

$$z = \frac{\sin(\varphi - \varepsilon) \sin(\varphi - \omega)}{\cos(\omega + \varepsilon)}. \quad (5)$$

Согласно существующим нормам расчёта подпорной стенки на сейсмическую нагрузку [12, 13] наиболее опасным является горизонтальное направление сейсмического давления грунта. Для этого случая

$$\lambda_a^c = \frac{\gamma_i}{\cos \varepsilon} \quad (6)$$

где $\varepsilon = \arctg AK_1$ – угол отклонения от вертикали равнодействующей удельного веса γ_i грунта и сейсмической силы $\gamma_i^c AK_1$, K_1 – коэффициент, значения которого следует принимать равными 0.1; 0.2; 0.3 соответственно для расчётной сейсмичности 7, 8 и 9 баллов, K_1 – коэффициент учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, принимаемый для гидротехнических сооружений равным 0.2. Все обозначения и их расшифровка приведены в соответствии со СП [12].

В случае определения бокового активного давления водонасыщенного грунта на подпорные стенки при сейсмическом воздействии формулы такие как и при эксплуатационной нагрузке следует вводить вес насыщенного $\gamma_{нас}$ грунта, а сейсмическую силу $\gamma_{нас} AK_1$ определять по плотности насыщенного водой $\gamma_{нас}$ грунта. При этом угол $\varepsilon_{нас}$ отклонения равнодействующей определяется по формуле

$$\varepsilon_{нас} = \arctg \frac{\gamma_{нас}^c AK_1}{\gamma_{нас}} \quad (7)$$

Проверка устойчивости подпорной стенки на скольжение при плоском сдвиге в горизонте подошвы при действии сейсмической нагрузки выполняется по формуле

$$K^{пл} = \frac{N_{экспл} \operatorname{tg} \varphi + bc}{E^c_a} \geq 1,5, \quad (8)$$

где $K^{пл}$ – коэффициент запаса устойчивости при плоском сдвиге; φ и c – соответственно расчетный угол внутреннего трения и сцепления грунта основания.

Проверка устойчивости стенки на глубинный сдвиг выполняется по способу, когда линия скольжения, ограничивающая область предельного состояния грунта основания, принимается в виде двух отрезков прямых, соединенных между собой криволинейной эвольвентой описываемой уравнением параболы. Действительный эксцентриситет относительно нагруженного фундамента заменяется эквивалентным центральным с приведенной шириной $b_{пр}$, равной $b_{пр} = b - 2e_{экспл}$, где $e_{экспл}$ – эксцентриситет приложения вертикальной силы $N_{экспл}$ от веса стенки и грунта засыпки в эксплуатационном случае при сейсмической нагрузке.

В результате строится график несущей способности основания $\tau_{пр} = f(\sigma)$, где $\tau_{пр}$ – предельное сопротивление грунтов сдвигу. По заданному $\sigma_{экспл} = N_{экспл} / b_{пр}$ в эксплуатационном случае при сейсмической нагрузке определяется соответствующее предельное сдвигающее напряжение $\tau_{пр}^{экспл}$. Коэффициент запаса на глубинный сдвиг $K_{гд}$ окончательно вычисляется из соотношения

$$K_{гд} = \tau_{пр}^{экспл} b_{пр} / E^c_a \geq 1,15. \quad (9)$$

Более подробно теоретические зависимости для расчета подпорной стенки по данной методике изложены в работах [7–9].

Действующий в настоящее время СП регламентирует расчёт гидротехнических сооружений на устойчивость производить по методике ВНИИГ, основанной на теории предельного равновесия.

3. ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Сравнительные расчёты проводились для различных типов подпорных стенок: железобетонной уголковой с передней консолью и массивной армированной бетонной стенкой. В соответствии с рекомендациями проф. Булина А.Я. [2] угол ω трения грунта о подпорную стенку задавался равным углу φ внутреннего трения грунта обратной засыпки или его половине $\varphi/2$.

Для сравнения были использованы данные ранее проведенных расчетов на сейсмическую нагрузку без учёта трения грунта о подпорную стенку ($\varphi=0$).

Считалось, что расчётная сейсмичность составляла 7, 8 или 9 баллов. Ниже достаточно подробно приведены результаты расчётов подпорной стенки по несущей способности и устойчивости при максимальной сейсмичности 9 баллов.

3.2. ЖЕЛЕЗБЕТОННАЯ УГОЛКОВАЯ СТЕНКА

Расчёты железобетонной уголковой подпорной стенки с передней консолью проводились для общей высоты подпорной стенки 7.4 м, при глубине воды h_b у набережной 6.1 м и высоте возвышения h_c стенки над уровнем акватории 3 м. В качестве грунтов засыпки принят средний песок с удельным весом $\gamma_{гр} = 18.4 \text{ кН/м}^3$ и влажностью $W = 14\%$. Основание подпорных стенок сложено водонасыщенными глинистыми грунтами (суглинками мягкопластичными) с удельным весом $\gamma_{гр} = 20 \text{ кН/м}^3$ влажностью $W = 27\%$, влажностью глинистых грунтов на границе текучести $W_L = 60.2\%$, на границе раскатывания $W_p = 0.16$. Расчётный угол внутреннего трения песчаных грунтов составлял 32° , а глинистых – 17° при сцеплении $c = 16.67 \text{ кПа}$. Модуль деформации E песчаных грунтов составлял 31 МПа, глинистых – 17 МПа.

Величина полезной нагрузки q на поверхности основания (на кордоне) равнялась 29 кПа. Проведенные расчёты коэффициентов активного бокового давления λ_a по формулам

(4) – (7) для всех вариантов расчёта сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Table

№ п/п	Угол трения грунта о стенку, ω	Коэффициент активного бокового давления грунта на стенку		
		Эксплуатационная нагрузка, λ_a	Сейсмическая нагрузка	
			надводная зона, $\lambda_{a_1}^c$	подводная зона, $\lambda_{a_2}^c$
		3	4	5
1	0	0,307	0,365	0,431
2	$\varphi/2$	0,308	0,340	0,412
3	φ	0,347	0,347	0,434

Из данных таблицы видно, что значения коэффициента активного бокового давления λ_a при эксплуатационной нагрузке существенно отличаются с $\lambda_a = 0,307$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_a = 0,278$ (0,277) при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ (0,5). При сейсмической нагрузке коэффициент активного бокового давления λ^c в надводной зоне снижается с $\lambda_{a_1}^c = 0,365$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_{a_1}^c = 0,340$ и $\lambda_{a_1}^c = 0,347$ при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ и φ , а в подводной зоне может не только уменьшаться с $\lambda_{a_2}^c = 0,412$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_{a_2}^c = 0,412$ при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, но и повышаться до $\lambda_{a_2}^c = 0,434$ при угле трения грунта о стенку φ .

Характерная эпюра активного давления, построенная для проведённой через переднюю грань подпорной стенки вертикальной плоскости, при сейсмической нагрузке представлена на рис. 1.

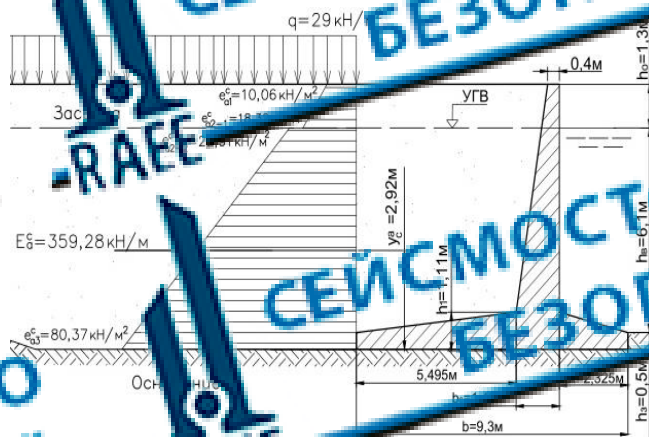


Рисунок 1 – График активного бокового давления на железобетонную уголковую подпорную стенку при сейсмической нагрузке при угле трения грунта о теловую поверхность $\omega = 0$

Figure 1 – Plot of active lateral pressure on a reinforced concrete corner retaining wall under seismic load at the angle of friction of the soil on the real surface $\omega = 0$

Согласно проведенным расчетам сила E_0^c бокового активного давления на железобетонную уголковую подпорную стенку при сейсмическом воздействии 9 баллов составила 341.65, 357.91 и 359.28 кН/м при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, $\varphi = 0$ и φ . Соответствующая сила E_0^c бокового активного давления на железобетонную уголковую подпорную стенку при эксплуатационной статической нагрузке разнялась 172.52, 190.56 и 171.09 кН/м.

При этом в проведенных расчетах железобетонной уголковой подпорной стенки при сейсмическом воздействии 8 баллов сила E_0^c бокового активного давления на подпорную стенку снижалась до 283.49, 104.53 и 289.05 кН/м, а при сейсмическом воздействии 7 баллов – ещё до 257.47, 280.93 и 259.81 кН/м соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, $\varphi = 0$ и φ .

3.3. МАССИВНАЯ БЕТОННАЯ СТЕНКА С АРМИРОВАНИЕМ

Расчеты массивной бетонной подпорной стенки с армированием проводились для общей высоты подпорной стенки 8.6 м, при глубине водопонижения у набережной 7.1 м и высоте возвышения h_0 стенки над уровнем квартории 1.5 м. В качестве грунтов засыпки принят крупный песок с удельным весом $\gamma_{гр} = 19.8$ кН/м³ и влажностью $W = 14\%$. Основание подпорной стенки сложено волочащими глинистыми грунтами (суглинками мелкопластичными) с удельным весом $\gamma = 26.9$ кН/м³ влажностью $W = 28\%$, влажностью глинистых грунтов на границе текучести $W_L = 0.35$ и на границе раскатывания $W_p = 0.20$. Расчетный угол φ внутреннего трения песчаных грунтов составлял 36° а глинистых – 14° при сцеплении $c = 44.47$ кПа. Модуль деформации E песчаных грунтов составлял 39 МПа, а глинистых – 9.2 МПа.

Величина полезной нагрузки q на поверхности основания (за кордоне) равнялась 20 кПа.

Проведенные подсчеты коэффициентов активного бокового давления для всех вариантов расчёта сведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

№ п/п	Угол трения грунта о стенку, ω	Коэффициент активного бокового давления грунта на стенку		Сейсмическая нагрузка	
		Эксплуатационная нагрузка,		надводная зона, $\lambda_{a_1}^c$	подводная зона, $\lambda_{a_2}^c$
1	2			3	5
1	0	0,260		0,313	0,370
2	$\varphi/2$	0,236		0,292	0,355
3	φ	0,241		0,307	0,385

Из данных таблицы видно, что значения коэффициента активного бокового давления λ_a при эксплуатационной нагрузке существенно снижаются с $\lambda_a = 0.260$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_a = 0.236(0.241)$ при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ (φ). При сейсмической нагрузке коэффициент активного бокового давления $\lambda_{a_1}^c$ в надводной зоне снижается с $\lambda_{a_1}^c = 0.313$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_{a_1}^c = 0.292$ и $\lambda_{a_1}^c = 0.307$ при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ и φ , а в подводной зоне может не только уменьшаться с $\lambda_{a_2}^c = 0.370$ без учёта трения грунта о стенку до $\lambda_{a_2}^c = 0.355$ при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, но и повышаться до $\lambda_{a_2}^c = 0.385$ при угле трения грунта о стенку φ .

Характерная эпюра бокового давления грунта при сейсмической нагрузке представлена на рис. 2.

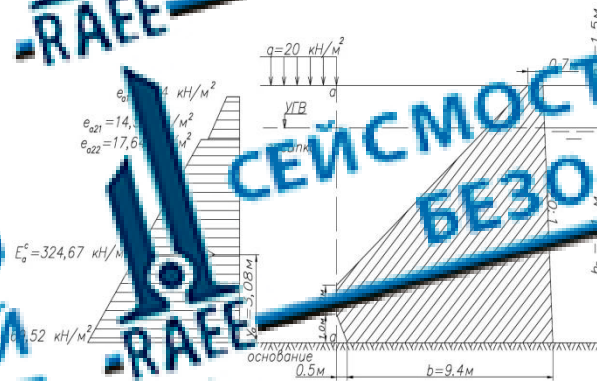


Рисунок 2 – Эпюра активного бокового давления на массивную армированную бетонную подпорную стенку при сейсмической нагрузке при угле трения грунта с тыльной поверхностью $\omega = \varphi / 2$

Figure 2 – Plot of active lateral pressure on a massive reinforced concrete retaining wall under seismic load at the angle of friction of the soil on the rear surface $\omega = \varphi / 2$

Согласно проведенным расчетам сила E_a бокового активного давления на массивную бетонную подпорную стенку при сейсмическом воздействии 9 баллов составила 324.67, 349.78 и 349.95 кН/м при угле трения грунта с тыльной поверхности $\varphi/2$, φ и φ . Соответствующая сила E_a бокового активного давления на массивную бетонную стенку при эксплуатационной статической нагрузке равнялась 158.53, 161.92 и 165 кН/м.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расчёты были проведены в соответствии с нормативными документами [14–16]. В целом расчёты показали достаточно близкие результаты, с учётом трения грунта о тыльную поверхность подпорной стенки при сейсмичности 9 баллов. Более детальные результаты этих расчётов изложены ниже.

4.1. ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ УГЛОВАЯ СТЕНКА

Результаты расчётов по формуле (1) показали, что ширина подошвы железобетонной угловой подпорной стенки с передней консолью составляет 9.1 и 9.3 м соответственно при угле трения грунта с тыльной поверхности $\varphi/2$ и φ , равняясь в последнем случае ширине подошвы подпорной стенки при расчёте без учёта трения грунта о стенку.

Проверка возможности возведения железобетонной угловой подпорной стенки на грунтах естественного основания для строительного и эксплуатационного (при статической и сейсмической нагрузке) случаев по расчетному давлению на основании показала, что

значения максимальных напряжений σ_{\max} под подошвой подпорной стенки не превышают предельного расчётного давления R^p на грунты основания, также как и средние значения напряжений $0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ не превышают $1,2 R^p$. С учётом проверки по расчётному сопротивлению грунтов основания по возведению подпорной стенки данного типа непосредственно на грунты естественного основания возможно.

В то же время построение диаграммы φ_k -изолиний с выделением зон пластических деформаций в основании подпорной стенки, разработанной профессором Киреевым В.М. [5], выявило их распространение на глубину 0,63 и 0,66 м соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ и φ (и $\varphi=0$).

Наличие зон пластических деформаций в основании подпорной стенки потребовало замены слабых грунтов основания на песчаную подушку грунтов засыпки с их уплотнением известными вибродинамическими методами уплотнения [17, 18].

При этом ширина песчаной подушки назначается равной 4,34 (2.32) м при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ и 4,66 (2.33) м при φ (и $\varphi=0$).

Проверка устойчивости подпорной стенки на скольжение при плоском сдвиге в плоскости подошвы при действии сейсмической нагрузки показала, что значения коэффициента запаса устойчивости K^u при плоском сдвиге составляют 1,08, 1,07 и 1,05 соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

Результаты расчётов показали, что по толщине слоя песчаной подушки, равной 2,32 (2.33) м, коэффициент запаса устойчивости по сдвигу до 1,23 для всех расчётных случаев.

Расчётная схема к проверке устойчивости железобетонной уголкового подпорной стенки на глубинный сдвиг приведена на рис. 3. На рис. 3 жёлтым цветом выделена зона выора грунта с пригрузкой грунтом засыпки и грунтом основания на толщину песчаной подушки.



Рисунок 3 – Расчётная схема к проверке устойчивости подпорной стенки на глубинный сдвиг при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ в устройстве песчаной подушки толщиной $h'_n = 2.32$ м

Figure 3 – Calculation scheme for checking the stability of the retaining wall for a deep shift at the angle of friction of the soil against the wall $\varphi/2$ with a sand cushion device with a thickness $h'_n = 2.32$ m

В результате проведения расчётов подпорной стенки на глубинный сдвиг было выявлено ещё большее снижение коэффициента $K_{ГЛ}$ запаса устойчивости до значений около 1 при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

При этом устройство песчаной подушки толщиной слоя, равного 2.32 и 2.33 м, позволило увеличить коэффициент запаса устойчивости с 1.02 до 1.18 и с (0.99/0.97) до 1.15 соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$ и φ (и $\varphi=0$).

Характерные графики несущей способности оснований под подошвой подпорной стенки при варианте расчёта без пригрузки зон выноса грунта и при её наличии с устройством песчаной подушки толщиной 2.32 м представлены на рис. 4.

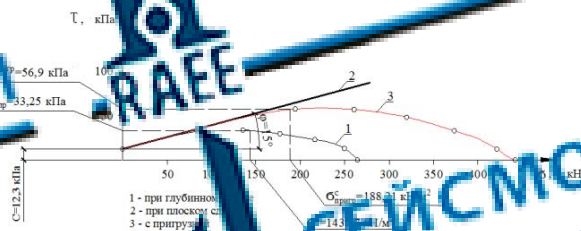


Рисунок 4 – Графики несущей способности основания железобетонной угловой подпорной стенки при глубинному сдвигу при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$

Figure 4 – Graphs of the bearing capacity of the base of a reinforced concrete corner retaining wall at deep shear and the angle of friction of the soil against the wall

Необходимое количество свай в основании железобетонной угловой подпорной стенки составило 81, 87 и 83 штуки на 10 погонных метров подпорной стенки соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

4.2. МАССИВНАЯ БЕТОННАЯ СТЕНКА С АРМИРОВАНИЕМ

Результаты расчётов по формуле (2) показали, что ширина подошвы массивной армированной подпорной стенки составляет 9.4, 9.8 и 10.7 м соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

Проверка возможности возведения массивной армированной бетонной стенки на грунтах естественного основания по расчетному давлению на основание показала, что значения максимальных напряжений σ_{max} под подошвой подпорной стенки превышают предельное расчетное давление $R_{под}$ на грунты основания, также как и средние значения напряжений $0,5(\sigma_{max} + \sigma_{min})$ величины $1.2 R_{под}$. Следовательно, проверка показала, что возведение подпорной стенки данного типа на грунтах естественного основания не допускается по существующим нормам.

В этом случае проверка возможности возведения стенки по расчетному давлению на основание должна производиться при устройстве песчаной подушки.

Проведенные расчёты показали, что значения максимальных напряжений $\sigma_{max}^{под}$ под подошвой подпорной стенки не превышают предельного расчетного давления $R_{под}$ на грунты основания, также как и средние значения напряжений $0,5(\sigma_{max}^{под} + \sigma_{min}^{под})$ величины $1.2 R_{под}$ при устройстве песчаной подушки толщиной $h_{п.}$ равной половине максимальной её ширины.

Построение диаграмм φ_k – изолиний с выделением зон пластических деформаций в основании подпорной стенки привело их распространение на глубину 12.03, 12.15 и 12.06 м соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

При этом ширина песчаной подушки назначается равной 8.42 (4.21) м при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, 8.51 (4.26) м при φ и 8.44 (4.22) м при $\varphi=0$.

Характерная техногенная песчаная подушка в основании подпорной стенки, построенная по результатам расчёта данного варианта расчёта при угле трения грунта о подпорную стенку φ , изображена на рис.5.

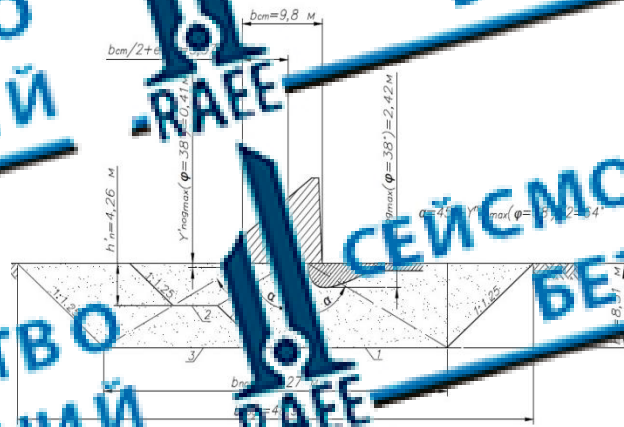


Рис.5 – Техногенная песчаная подушка в основании подпорной стенки при угле трения грунта о стенку φ , построенная на основании:

- 1 – диаграммы φ_k – изолиний с очертанием зон областей сдвига, 2 – по расчетному давлению на грунты естественного основания, 3 – по расчёту на глущинный сдвиг

Figure 5 – Technogenic sand cushion at the base of the retaining wall at the angle of friction of the soil against the wall φ on the base:

- 1 – diagrams of φ_k – isolines with the outline of the zones of the shear regions, 2 – according to the calculated pressure on the soils of the natural base, 3 – according to the calculation of the deep shift

Проверка устойчивости подпорной стенки на скольжение при плоском сдвиге в плоскости подошвы при действии сейсмической нагрузки показала, что значения коэффициента запаса устойчивости $I_{уст}$ при плоском сдвиге составляют от 1.21, 1.17 и 1.20 соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

В результате проведенных расчётов массивной бетонной подпорной стенки на глубинный сдвиг было выявлено снижение коэффициента $K_{гл}$ запаса устойчивости до значений меньше 1 при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

При этом устройство песчаной подушки толщиной слоя равной 4.21 (4.26) и 4.22 м, позволило увеличить коэффициент запаса устойчивости лишь до значения 1.12 во всех расчетных случаях. Тогда как только устройство песчаной подушки толщиной слоя равного 8.42, 8.51 и 8.44 м, позволило увеличить коэффициент запаса устойчивости до значений 1.61, 1.57 и 1.58 при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$ соответственно.

Необходимое количество свай в основании массивной бетонной стенки составило 78, 86 и 80 штук на 10 погонных метров подпорной стенки соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, φ и $\varphi=0$.

Схема к размещению свай в поперечном ряду массивной бетонной подпорной стенки представлена на рис. 6.

При свайном варианте фундамента устойчивость стенки на глубинный сдвиг значительно повышается до значений $K_{гд}$ более 2. Это достигается за счёт того, что проверка устойчивости стенки на глубинный сдвиг при устройстве свайного фундамента проводится на устойчивость условного массивного фундамента в основании подпорной стенки с размерами $b_{услф}$ и $h_{услф}$, где $b_{услф}$ – ширина подошвы условного фундамента, $h_{услф}$ – высота условного фундамента, равная глубине погружения свай. Ширина подошвы условного фундамента, определяемая по зависимости $b_{услф} = b + h_{услф} \operatorname{tg}\psi$, где ψ – угол между наружной стороной подпорной стенки и осью крайней наклонной сваи на уровне дна или ее погружения. Высота условного фундамента определяется по зависимости $h_{услф} = l_{св} \cos\alpha$, где $l_{св}$ – длина свай, α – расчётный угол погружения свай.

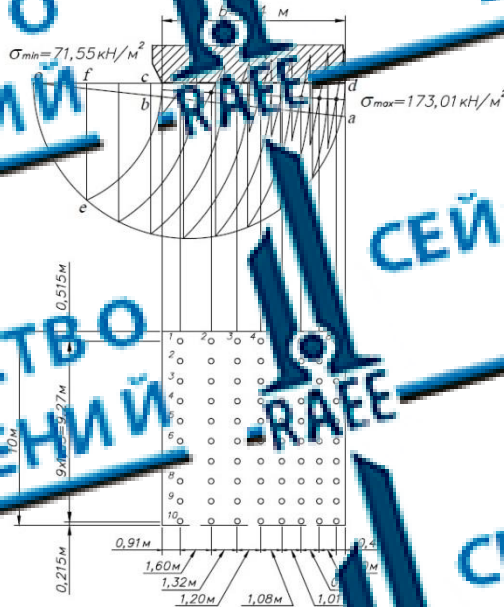


Рисунок 6 – План-схема к размещению свай в поперечном ряду ширины массивной подпорной стенки при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$

Figure 6 – Schema diagram for the placement of piles in a transverse row of the width of a massive retaining wall at the angle of friction of the soil against the wall $\varphi/2$

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ПОСЛЕ СЛЕДОВАНИЯМ ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ

На основании исследований, изложенных в работе [4], автором статьи был проведён анализ результатов проведенных расчётов подпорной стенки.

Согласно проведенным расчётам сила E_a^c бокового активного давления на железобетонную уголковую подпорную стенку при сейсмическом воздействии составила 341.65, 357.89 и 359.28 кН/м, а на массивную бетонную – 324.67, 318.75 и 348.92 кН/м при угле трения грунта о стенку φ/φ_0 и φ . Соответствующая сила $F_{\text{бокового}}$ активного давления на железобетонную уголковую подпорную стенку при эксплуатационной статической нагрузке равнялась 192.97, 190.56 и 171.98 кН/м, а на массивную бетонную – 51.53, 161.92 и 171.65 кН/м. Среднее значение $e_a^{\text{стат}}$ бокового давления при эксплуатационной статической нагрузке на железобетонную уголковую подпорную стенку составит 23.21, 25.75 и 23.24 кН/м², а на массивную бетонную – 18.43, 18.83 и 20.31 кН/м². Тогда соответствующее среднее значение дополнительного $e_a^{\text{дин}}$ бокового давления при сейсмическом воздействии на железобетонную уголковую подпорную стенку составит 22.86, 22.61 и 25.31 кН/м², а на массивную бетонную – 19.32, 21.73 и 20.27 кН/м².

Из проведенной проверки видно, что значения дополнительного $e_a^{\text{дин}}$ бокового давления при сейсмическом воздействии на подпорную стенку либо незначительно меньше значений значения $e_a^{\text{стат}}$ бокового давления при эксплуатационной статической нагрузке либо их превышают. Это свидетельствует о том, что при сейсмическом воздействии сопротивление трению грунта о тыловую поверхность подпорной стенки является очень незначительным или вообще отсутствует.

Характерный график динамического волнового воздействия на подпорную стенку представлен на рис. 7.

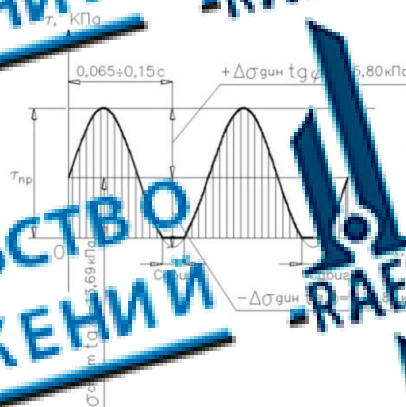


Рисунок 7 – График динамического волнового воздействия на массивную бетонную подпорную стенку при сейсмичности 9 баллов

Figure 7 – Graph of dynamic wave action on a massive concrete retaining wall with a seismicity of 9 points

Из условия равенства сопротивлению сдвигу системы «тыловая поверхность стенки – грунт обратной засыпки» запишем

$$\frac{E_a}{h_{ст}} \operatorname{tg} \omega = \left(\frac{E_{ст}}{h_{ст}} - \frac{\Delta \sigma_{дин}}{h_{ст}} \right) \operatorname{tg} \varphi, \quad (10)$$

где $E_{ст}$ – нормальные статические напряжения на тыловую поверхность стенки; $\Delta \sigma_{дин}$ – дополнительные нормальные динамические напряжения; ω – угол трения грунта о тыловую поверхность стенки; φ – угол внутреннего трения грунта обратной засыпки.

Преобразуя (10), имеем

$$\frac{E_a}{h_{ст}} \operatorname{tg} \omega = \left(\frac{E_{ст}}{h_{ст}} - \frac{\Delta E_a^c}{h_{ст}} \right) \operatorname{tg} \varphi.$$

или

$$\operatorname{tg} \omega = \left[\frac{E_a - \left(\frac{E_{ст}}{h_{ст}} - \frac{\Delta E_a^c}{h_{ст}} \right) \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} \right]$$

где E_a – боковое давление грунта от эксплуатационной статической нагрузки на 1 погонный метр длины подпорной стенки; $(E_a^c - E_{ст}^c)$ – дополнительное боковое давление грунта от сейсмической нагрузки на 1 погонный метр длины подпорной стенки; $h_{ст}$ – высота подпорной стенки.

В окончательном виде автором была получена зависимость, для определения угла трения грунта о подпорную стенку при различном значении сил E_a^c бокового давления грунта при сейсмической нагрузке, в виде

$$\omega = \arctan \left(\frac{E_a - \left(\frac{E_{ст}}{h_{ст}} - \frac{\Delta E_a^c}{h_{ст}} \right) \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi} \right), \quad (11)$$

где E_a – сила бокового давления грунта на подпорную стенку при эксплуатационной статической нагрузке, кН; E_a^c – сила бокового давления грунта на подпорную стенку при сейсмической нагрузке, включающая силу бокового давления грунта при эксплуатационной статической нагрузке; φ – угол внутреннего трения грунта обратной засыпки.

При отрицательном значении выражения в скобках угол трения грунта о подпорную стенку прилагается равным 0. В этом случае при волновых динамических воздействиях в период времени, когда сила давления грунта при колебаниях грунта от сейсмического воздействия направлена от тыловой поверхности стенки, возможен сдвиг (проскальзывание) грунта обратной засыпки вдоль поверхности стенки под действием силы тяжести грунта и полезной нагрузки. Данный фактор считается отсутствием трения грунта о подпорную стенку при сейсмическом воздействии.

Подтверждением сказанного могут служить результаты экспериментальных исследований к закамским плечам, выполненных под руководством профессора Хомякова В.А. [9], при гармоническом колебании подпорной стенки, вызываемых вращением диска с выступами, соприкасающейся с тыльной частью ограждающей части подпорной стенки. Данные результаты направлены на колебания стенки, имитирующие волновое воздействие грунта при сейсмической нагрузке, вызвали периодический отрыв грунта обратной засыпки и его проскальзывание по тыловой поверхности подпорной стенки с выпором грунта обратной засыпки.

При этом в проведенных расчетах автора статьи при сейсмическом воздействии 8 баллов сила E_a^c бокового активного давления на подпорную стенку снижалась до 283.49, 304.53 и 289.05 кН/м, при сейсмическом воздействии 7 баллов – соответственно до 257.47, 280.93 и 259.81 кН/м соответственно при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, $\varphi=0$ и φ . Следовательно соответствующее среднее значение дополнительного $e_{ас}^{дин}$ бокового давления при сейсмическом воздействии в 8 баллов на подпорную стенку уменьшилось до 14.05, 14.3 и 14.82 кН/м², а при сейсмическом воздействии в 7 баллов – до 10.5, 11.44 и 11.12 кН/м².

При этом очевидно, что сила E_a бокового активного давления на подпорную стенку при эксплуатационной статической нагрузке должна приниматься прежней, равной 172.52, 190.56 и 171.98 кН/м, а соответствующее им среднее значение $e_{ас}^{стат}$ бокового давления при эксплуатационной статической нагрузке на подпорную стенку составит 21.84, 24.12 и 21.77 кН/м² при угле трения грунта о стенку $\varphi/2$, $\varphi=0$ и φ .

В результате расчетов по полученным данным по силе бокового активного давления E_a^c на подпорную стенку при сейсмической нагрузке 7 и 8 баллов получены значения угла ω трения грунта о подпорную стенку, соответственно равные 0.569φ и 0.440φ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые в статье была получена зависимость для определения угла трения грунта о тыловую поверхность подпорной стенки при сейсмической нагрузке различной интенсивности, характеризующая волновой характер динамического воздействия на подпорную стенку.
2. По результатам проведенных исследований также достаточно убедительно представляется то, что расчёт подпорной стенки по несущей способности и устойчивости на сейсмическую нагрузку 9 баллов может производиться без учёта трения грунта.
3. При сейсмической нагрузке 7 и 8 (и менее) баллов угол трения грунта о тыловую поверхность подпорной стенки должен определяться по зависимости (11), приведённой в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульмач Н.П. Морские гидротехнические сооружения. Часть II: приливные, шельфовые и берегозащитные сооружения / П.П. Кульмач, В.З. Сидоренко, Н.Г. Зариговский. М.: СВВВСУ. 1991. 391 с.
2. Будин А.Я. Городские и портовые набережные. СПб.: Политехника. 2014. 424 с.

3. Яковлев П.И. Устойчивость транспортных гидротехнических сооружений. М.: Транспорт. 191 с.
4. Иванов П.П. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 1991. 441 с.
5. Кириллов В.М. Механика грунтов. СПб.: СПГУВК. 2006. 228 с.
6. Семенов С.Л., Жотов Ю.Н. Железобетонные подпорные стенки // *Вестник Белорусского – Российского Университета*. 2011. № 4 (61). С. 86–101.
7. Минаев О.П. Наиболее важные аспекты расчета и проектирования основания гравитационной подпорной стенки на сейсмическую нагрузку // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. № 6. С. 49–56.
8. Minaev O.P. Features of calculating gravity retaining wall without assumption of base soil liquefaction. *Proceedings in Earth and Geotechnics «Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, structures, technologies and calculations (GFAC 2019)»*. Saint Petersburg, Russia, 6–8 February 2019. Editors: R. Mangushov, A. Zhussupbekov, Y. Iwasaki, I. Sakharov. CRC Press / Balkema the Netherlands, Taylor and Francis Group, London, 2019, vol. 2, pp. 182–186.
9. Minaev O.P. Features of calculating stability of retaining wall with significant horizontal load on base soil. *Proceedings in Earth and Geotechnics «Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New materials, structures, technologies and calculations» (GFAC 2019)»*. Saint Petersburg, Russia, 6–8 February 2019. Editors: R. Mangushov, A. Zhussupbekov, Y. Iwasaki, I. Sakharov. CRC Press / Balkema the Netherlands, Taylor and Francis Group, London, 2019, vol. 2, pp. 187–192.
10. Зархи А.З. Экспериментальное исследование распределения реактивных давлений грунта на пилонную стену и одиночную сваю при действии горизонтальной силы. Труды ЛИИВТ. Л., 1954. № 21. С. 146–164.
11. Зархи А.З. Метод расчета одиночной сваи на горизонтальную нагрузку по условиям деформации. Труды ЛИИВТ. Л., 1959. № 26. С. 112–125.
12. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмически активных районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Минстрой России. 2018.
13. Ставицкий Л.Г. Сейсмостойкость оснований фундаментов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2010. 448 с.
14. СП 23.13330.2011. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85* (взамен СНиП II-16-76). М.: Минрегион РФ. 2011.
15. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (взамен СНиП II-15-74 и СН 475-75). М.: Стандартинформ. 2017.
16. СП 24.13330.2021 «СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» (взамен СНиП II-17-77), (взамен СНиП II-16-76). М.: Минстрой России. 2021.
17. Minaev O.P. Development of vibratory method for soil compaction during construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, vol. 48, no. 5, pp. 190 – 195.
18. Minaev O.P. Development of Dynamic Methods for Deep Compaction of Slightly Cohesive Bed Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 251–254.
19. Khomyakov V., Bessimbyev E. Research of stability of slope on soil models in the conditions of static and seismic influence. 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, 2015, pp. 924–929.

REFERENCES

1. Kul'mach V.P. Morskie gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Chast' II: prichal'nye, shel'fovye i beregoukrepitel'nye sooruzheniya / V.P. Kul'mach, V.Z. Filippyonok, N.G. Zaritskiy. L.: LVVISHU, 1991. 391 p. [In Russian]
2. Pudin A.Ya. Gornskie i portovye naberezhnye. SPb.: Politehnika, 2014. 124 p. [In Russian]
3. Yakovlev P.I. Ustojchivost' transportnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. M.: Transport, 191 p. [In Russian]
4. Ivanov P.L. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Mekhanika gruntov. M.: Vysshaya shkola, 1991. 441 p. [In Russian]
5. Kirillov V.M. Mekhanika gruntov. SPb.: SPGUVK, 2006. 226 p. [In Russian]
6. Senenok S.D., Kotov Yu.N. Betonozobetonnye podpornye stenki. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo Universiteta*. 2018, no. 4 (67), pp. 86 – 101. [In Russian]
7. Minaev O.P. Naibolee vazhnye aspekty raschyota i proektirovaniya osnovaniya gravitacionnoj podpornoj stenki na seismicheskuyu nagruzku. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2019, no. 6, pp. 49–56. [In Russian]
8. Minaev O.P. Features of calculating gravity retaining wall without a supposition of base soil liquefaction. *Proceedings in Earth and geosciences «Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New materials, structures, technologies and calculations (GFAC 2019)»*. Saint Peterburg, Russia, 6 – 8 February 2019. Editors: R. Mangushev, A. Zhussupbekov, Y. Iwasaki, I. Sakharov. CRC Press/ Balkema the Netherlands, Taylor and Francis Group, London, 2019, vol. 2, pp. 181–186.
9. Minaev O.P. Features of calculating stability of retaining wall with significant horizontal load on base soil. *Proceedings in Earth and geosciences «Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New materials, structures, technologies and calculations (GFAC 2019)»*. Saint Petersburg, Russia, 6 – 8 February 2019. Editors: R. Mangushev, A. Zhussupbekov, Y. Iwasaki, I. Sakharov. CRC Press/ Balkema the Netherlands, Taylor and Francis Group, London, 2019, vol. 2, pp. 187–192.
10. Zarkhi A.Z. Eksperimental'nye issledovaniya rasprezheniya reaktivnykh davlenij grunta na shpuntuuyu berku i odinochnuyu svayu pri dostizhenii horizontal'noj sily. *Trudy JIIVT*. L., 1954, no. 21, pp. 146–164. [In Russian]
11. Zarkhi A.Z. Metod rascheta samochnoj svai na horizontal'nyuyu nagruzku po usloviyu deformacii. *Trudy JIIVT*. L., 1959, no. 26, pp. 112–125. [In Russian]
12. SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonakh. Aktualizirovannaya redakciya SNIP II-7-81*. M.: Ministroy Rossii. 2018. [In Russian]
13. Stavnitser L.R. Sejsmostojkost' osnovanij i fundamentov. M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nykh vuzov. 2010. 448 p. [In Russian]
14. SP 23.13330.2011. Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 2.02.02-83* (vzamen SNIP II-16-75). M.: Minregiony. 2011. [In Russian]
15. SP 12.13330.2016. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 2.02.01-83* (vzamen SNIP II-15-74 i SN 475-75). M.: Standartinform. 2017. [In Russian]
16. SP 24.13330.2021 «SNIP 2.02.03-85 Svajnye fundamenty» (vzamen SNIP II-16-76). M.: Ministroy Rossii. 2022. [In Russian]
17. Minaev O.P. Development of vibratory method for soil compaction during construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, vol. 48, no. 5, pp. 190 – 195. [In Russian]

18. Minaev O.P. Development of dynamic Methods for deep Compression of Slightly Cohesive Bed Soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 251–254. [In Russian]
19. Khomyakov V., Bessimbyev E. Research of stability of slopes on soil models in the conditions of static and seismic influence. 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, 2015, pp. 924–929.

Информация об авторе

Минаев Олег Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления строительством и эксплуатацией объектов военной инфраструктуры Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала А. Б. Хрулева, кафедры гидротехнических сооружений, конструкции гидравлики Института водного транспорта Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Oleg P. Minaev, Cand. Sci. (Engineering), associate professor of the Department of construction and operation management of military infrastructure facilities of Military Institute (Engineering and technical) of Military academy of logistics, army general A. V. Khrulev & of the Departments of hydrotechnical facilities, structures and hydraulics of the Institute of water transport of Admiral Makarov State University of maritime. Saint-Petersburg, Russian Federation

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9783-2023-1-29-37](https://doi.org/10.37153/2618-9783-2023-1-29-37)

Theoretical and experimental studies

Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при сейсмических воздействиях

Низомов Джахонгир Низомович^{1,2}, Сангинов Абдусамат Мирвафоевич^{1,2}
Институт геологии, сейсмологии и строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

Аннотация: Задача взаимодействия сооружения с упругим полупространством представляет практический интерес по ряду причин. Во-первых, сооружение и грунт, на котором оно покоится, образуют связанную динамическую систему, и существенно может быть обратная связь от сооружения к пластм грунта. В этом случае, например, сейсмическое воздействие не может определяться независимо от характеристик сооружения. Во-вторых, не всегда удается выбрать или смоделировать записи колебаний грунта, которые являются представительными для определенных почвенных условий строительной площадки. В этом случае желательно при расчетах учитывать характеристики массива фундамента. В-третьих, грунт также может взаимодействовать с сооружением, вызывая изменения в его напряженном состоянии.

Проблема динамического взаимодействия сооружений с основанием и передачи колебаний через грунт связана с такими задачами как инженерная сейсмология, теория сейсмостойкости, механика деформируемого твердого тела. В настоящей статье рассматривается проблема задания расчетного сейсмического воздействия на сооружение.

Ключевые слова: землетрясение, взаимодействие с основанием, кинематическое возмущение, основание сооружения, сейсмическое воздействие

Для цитирования: Низомов Д.Н., Сангинов А.М. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием при сейсмических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 1. С. 29-37.

DOI [10.37153/2618-9783-2023-1-29-37](https://doi.org/10.37153/2618-9783-2023-1-29-37)

Theoretical and experimental studies

Simulation of the interaction of the structure with the foundation under seismic impacts

Djahongir N. Nizomov¹, Abdusamad M. Sanginov²

^{1,2} Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan NAST, Dushanbe, Republic of Tajikistan

Abstract: The problem of the interaction of a structure with a elastic half-space is of practical interest for a number of reasons. Firstly, the structure and the soil, which it rests from a

@ D.N. Nizomov, A.M. Sanginov, 2023

connected dynamic system, and the feedback from the structure to the soil layers can be significant. In this case, for example, the seismic action cannot be determined independently of the characteristics of the structure. Second, it is not always possible to select or model ground motion records that are representative of the specific ground conditions of a construction site. In this case, it is desirable to take into account the characteristics of the foundation array in the calculations. Thirdly, the soil can also interact with the structure, causing changes in its stress state.

The problem of dynamic interaction of structures with the foundation and the transmission of vibrations through the ground is associated with such sciences as engineering seismology, theory of seismic resistance, mechanics of deformable solid body. This article deals with the problem of setting the design seismic impact on the structure.

Keywords: earthquake interaction with the base, kinematic perturbation, structure base, seismic impact

For citation: Низомов Д.Н., Сагитов А.М. Моделирование взаимодействия сооружения с основанием под сейсмическими воздействиями. *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023, no. 1, pp. 29-37 (In Russian) DOI [10.37153/2619-2833-2023-1-29-37](https://doi.org/10.37153/2619-2833-2023-1-29-37)

Возможно различное математическое моделирование задачи о совместных колебаниях двух различных систем – сооружения и грунтов под основанием.

- 1) использование единой динамической модели, объединившей обе системы в одну, и решение задачи о колебаниях единой системы;
- 2) решение задач о колебаниях каждой из систем без связи с другой и затем использование условий совместности для решения задачи о связанных колебаниях.

В настоящее время существуют два основных подхода к решению проблемы взаимодействия сооружения с основанием:

- 1) использование эквивалентных динамических характеристик основания;
- 2) прямой метод, в котором колебания сооружения и основания рассматриваются совместно.

По первому подходу могут быть три варианта решения задачи:

- 1) определение сейсмического воздействия на фундамент исследуемого объекта, исходя из направления падения сейсмических волн и геометрии фундамента;
- 2) определение эквивалентных динамических характеристик основания (модели Винклера, Власова-Леонтьева и т.п.).

В практических расчетах предполагается, что основание состоит из горизонтальных слоев и нижнего подстилающего скального слоя, который представляет собой однородное полупространство. При этом направление падения сейсмических волн принимается вертикальным. Грунт рассматривается как линейно упруго-вязкая среда. В этом случае проблема передачи сейсмического воздействия через слоистое основание сводится к решению одномерной задачи распространения упругих волн.

Рассмотрим задачу о колебаниях штампа, лежащего на упругом полупространстве с однородным поверхностным слоем при действии поперечной волны. Предполагается, что штамп жестко связан с упругим телом и перемещение его определяет поперечные границы упругого тела. На поверхности упругого тела вне штампа нормальная и тангенциальная составляющие напряжений равны нулю. Поверхностный слой толщиной h имеет плотность ρ_1 , и скорость распространения волны c_1 , а подстилающей им соответственно имеет ρ_2 и c_2 . Для принятой системы координат (рис. 1) динамическое состояние полупространства описывается плоскими волновыми уравнениями

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \frac{1}{c_2^2} \cdot \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \quad u_y = u_y(x, t)$$

Данное уравнение – дифференциальное уравнение плоской поперечной волны, распространяющейся по оси Ox . Можно легко показать, что функция (1) является его решением.

Предположим, что подстилающего слоя вверх движется синусоидальная поперечная волна с амплитудой A_0 и частотой ω

$$A_2(x, t) = A_0 \exp \left[i \omega \left(t - \frac{x}{c_2} \right) \right], \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{G_2}{\rho_2}}, \quad (1)$$

а в поверхностном слое приобретает вид

$$A_1(x, t) = A_1 \exp \left[i \omega \left(t - \frac{x}{c_1} \right) \right], \quad c_1 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{G_1}{\rho_1}}, \quad (2)$$

c_1, c_2 – скорости поперечных волн соответственно в поверхностном и подстилающем слоях. Поперечная волна, достигая поверхности $x = -h$, приводит к выжатию штампа, а затем отражаясь от него, создает волну

$$B_1(x, t) = B_1 \exp \left[i \omega \left(t - \frac{x}{c_1} \right) \right], \quad (3)$$

которая в подстилающем слое записывается в виде

$$B_2(x, t) = B_2 \exp \left[i \omega \left(t - \frac{x}{c_2} \right) \right]. \quad (4)$$

В формулах (1) – (4) A_0 – заданная амплитуда волны; A_1, B_1, B_2 – неизвестные амплитуды; c_1, c_2 – скорости поперечных волн соответственно в поверхностном и подстилающих слоях

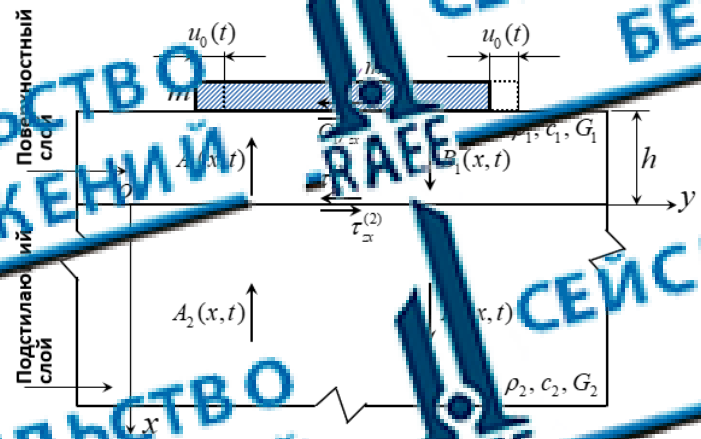


Рисунок 1 – Двухслойная полуплоскость при действии поперечной волны

Figure 1 – Two-layer half-plane under the action of a transverse wave

Перемещение грунта в поверхностном и подстилающем слоях состоит из суммы прямой и отраженной волны:

$$u_y^{(1)} = u_1(x, t) = A_1 e^{i \omega \left(t + \frac{x}{c_1} \right)} + B_1 e^{i \omega \left(t - \frac{x}{c_1} \right)}, \quad (5)$$

$$u_y^{(2)} = u_2(x, t) = A_2 e^{i \omega \left(t + \frac{x}{c_2} \right)} + B_2 e^{i \omega \left(t - \frac{x}{c_2} \right)}. \quad (6)$$

Граничные условия задачи с учетом штампа записываются в виде

$$1) G_1 \frac{\partial u}{\partial x} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{при } x = -h, \quad 2) u_x = u_{xy} = u_{xy}^{(2)} = u_{xy}^{(1)} = 0, \quad \text{при } x = 0, \quad (7)$$

где G_1 – модуль сдвига поверхностного слоя; m – масса единицы площади штампа. Из трех граничных условий (7) с учетом (5) и (6) получим систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} A_1 \theta_1 e^{-i\omega \left(t - \frac{h}{c_1} \right)} + B_2 \theta_2 e^{i\omega \left(t + \frac{h}{c_1} \right)} &= 0, \\ A_1 + B_1 - B_2 &= A_0, \\ k_0 A_1 - k_1 B_1 - B_2 &= A_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где $k_0 = \frac{G_1 c_2}{G_2 c_1}$; $\theta_1 = \frac{\omega^2 + i \frac{\omega}{c_1}}$, $\theta_2 = m \frac{\omega^2 - i \frac{\omega}{c_1}}{c_1}$, $m^* = \frac{m}{G_1}$.

Из совместного решения (8) найдем амплитуды колебаний:

$$A_1 = \frac{z A_0}{z_1}, \quad B_1 = -\frac{2 A_0 z e^{-i\omega \frac{2h}{c_1}}}{z_1}, \quad B_2 = \frac{A_0 \left[(1 - k_0) - (1 + k_0) z \cdot e^{-i\omega \frac{2h}{c_1}} \right]}{z_1}, \quad (9)$$

где $z_1 = (1 + k_0) - (1 - k_0) \cdot e^{-i\omega \frac{2h}{c_1}}$, $z = \frac{\theta_1}{\theta_2}$.

Внося A_1 и B_1 в (5), получим формулы определения перемещений в поверхностном слое, откуда при $x = -h$ будем иметь горизонтальное перемещение штампа

$$u_0(t) = \frac{2 A_0 (1 + z)}{z_1 \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{h}{c_1} \right) \right]} = \frac{2 A_0}{x + iy}, \quad (10)$$

$$x = \cos \omega t \cdot \cos \frac{\omega h}{c_1} - k_0 \sin \omega t \sin \frac{\omega h}{c_1} + k_m \sin \omega t \cos \frac{\omega h}{c_1} + k_m \cos \omega t \sin \frac{\omega h}{c_1};$$

$$y = k_0 k_m \cos \omega t \cos \frac{\omega h}{c_1} - k_m \sin \omega t \sin \frac{\omega h}{c_1} - \sin \omega t \cos \frac{\omega h}{c_1} - k_0 \cos \omega t \sin \frac{\omega h}{c_1},$$

$$k = \frac{G_1 c_1}{G_2 c_2} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}, \quad k_m = \frac{k}{k_1}, \quad k_1 = \frac{\omega}{c_1}, \quad k_2 = m^* \omega^2.$$

Амплитуда колебаний штампа, равная модулю $u_0(t)$ выражается так

$$u_0 = \frac{2 A_0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{2 A_0}{\sqrt{k^2 (\sin \beta + k_m \cos \beta)^2 + (\cos \beta - k_m \sin \beta)^2}}, \quad (11)$$

где $\beta = \omega h / c_1 = k_1 \cdot h$

коэффициент k_m учитывающий влияние штампа на амплитуду колебаний поверхности при $x = -h$, можно выразить либо через длину волны $l = 2\pi / k$, либо через параметр β :

$$k_m = \frac{k_2}{k_1} = \frac{2\pi m}{\rho_1 l} = \frac{m}{\rho_1 h}. \quad (12)$$

Переходя на границе между поверхностным слоем и грунтом основания, последнее из (6) при $x = 0$, с учетом (9) записывается так

$$u_2(t) = 2 A_0 \frac{(1 - z)(\cos \beta - k_m \sin \beta)}{z_1 \exp \left[-i\omega \left(t - \frac{h}{c_1} \right) \right]}, \quad (13)$$

откуда, отделив действительную и мнимую части, находим амплитуду горизонтальных колебаний в плоскости

$$u_{12} = \frac{2A_0(\cos\beta - k_m \sin\beta)}{\sqrt{k_0^2(\sin\beta + k_m \cos\beta)^2 + (\cos\beta - k_m \sin\beta)^2}}, \quad (14)$$

Отношение амплитуд

$$u_0 / u_{12} = 1 / (\cos\beta - k_m \sin\beta) \quad (15)$$

в зависимости от β и k_m может принимать значения от 0 до ∞ . Следует заметить, что при $k_m = 0$, что соответствует отсутствию штампа, из (11), (14) и (15) мы получим известные решения [1]

$$u_0 = \frac{2A_0}{\sqrt{\cos^2\beta + k_0 \sin^2\beta}}, \quad u_{12} = \frac{2A_0 \cos\beta}{\sqrt{\cos^2\beta + k_0 \sin^2\beta}}, \quad \frac{u_0}{u_{12}} = \sec\beta.$$

Амплитуду колебаний касательных напряжений на линии сцепления штампа с упругим телом определим с помощью (5), откуда при $x = -h$, получаем

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2A_0 \frac{\rho_1 c_1 (1+z)}{z_1} \exp\left[i\omega\left(t - \frac{h}{c_1}\right)\right] \frac{2A_0 m \omega^2}{\sqrt{k_0^2(\sin\beta + k_m \cos\beta)^2 + (\cos\beta - k_m \sin\beta)^2}}. \quad (16)$$

$$k_0 = \frac{G_1 c_1}{G_2 c_2} = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} (\sigma/\rho), \quad k_1 = \frac{\omega}{c_1} (\text{м}^{-1}), \quad m^* = \frac{m}{G_1} (c^2/\text{М}), \quad k_m = n^* \omega^2 (\text{м}^{-1}),$$

$$k_m = \frac{k_2}{k_1} = \frac{m \omega^2}{G_1}, \quad \beta = \frac{\omega h}{c_1} = k_1 \cdot h.$$

Как следует из полученных результатов, усиление колебаний штампа происходит при движении волны с периодом ($\beta = 1,314$)

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi h}{c_1 \beta} = 4,78 \frac{h}{c_1} = 4,78 t_0, \quad t_0 = \frac{h}{c_1},$$

который в 4,78 раза больше t_0 – времени прохождения волны через поперечный слой.

В табл. 1 представлены значения касательных напряжений, полученных по формуле (16) при $k_m = 0,2\beta$ и различных значениях k_0 . Если правую часть формулы (16) представить как произведение динамического коэффициента на u_{12} , при определенных значениях k_m , коэффициент k_0 играет роль параметра затухания. Следовательно, с увеличением плотности (жесткости) грунта поверхностного слоя амплитуда колебаний штампа уменьшается.

Таблица 1 – Безразмерные значения касательных напряжений $\tau_{xy} / A_0 m \omega^2$ на контактной линии в зависимости от k_0 и β

Table 1 – Dimensionless values of tangential stresses $\tau_{xy} / A_0 m \omega^2$ on the contact line depending on k_0 and β

k_0	$\beta = \omega h_1$					
	0	$\pi/4$	1,14	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
0	2	3,6	∞	6,56	1,92	2
0,2	2	3,6	7,72	4,98	1,92	1,98
0,5	2	2,8	3,86	3,38	1,90	1,90
1,0	2	2,0	1,93	2,58	1,80	1,70
2,0	2	1,14	0,96	0,98	1,56	1,2

Из полученных результатов (табл. 1) следует, что при $\beta > 0$ и с увеличением k_0 касательные напряжения на контактной поверхности уменьшаются.

Предположим, что основание состоит из двух упругих тел, гладко соединенных в точках поверхности $x = 0$ и $x = h_2$ действует динамическая нагрузка $q(t)$. Обе части упругого основания имеют разные плотности ρ_1 и ρ_2 и разные волновые скорости c_1 и c_2 . Волна бегущая по образованию, в точке $x = 0$ сталкивается со скачком импеданса, часть падающей волны отразится, а другая часть пройдет в область с импедансом $\rho_2 c_2$. Граничные условия задачи для принятой системы координат (2) записываются в виде

$$G_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = m \omega^2 u_1 \quad \text{при } x = -h_1;$$

$$u_1(x, t) = u_2(x, t) \quad \text{при } x = 0,$$

$$G_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -q(t) \quad \text{при } x = h_2.$$

В результате аналитического решения поставленной задачи получим модуль амплитуды горизонтальных колебаний штампа

$$u_0 = \frac{k_0 q^*}{k_0 (m \omega^2 \cos \alpha \cdot \cos \beta + k_1 G_1 \sin \alpha \cdot \cos \beta) - m \omega^2 \sin \alpha \cdot \sin \beta + k_1 G_1 \cos \alpha \cdot \sin \beta}, \quad (17, a)$$

где $q^* = q(t) e^{-i \omega t}$, $\alpha = k_1 h_1$, $\beta = k_2 h_2$, что при $k_0 = 1$, $\alpha + \beta = kh$ совпадает с решением для однослойного основания.

Далее переходим к решению задачи методом граничных уравнений [2]. Используя систему координат, представленную на рис. 2, запишем уравнение

$$u(\xi) = u_0^*(\xi) \varphi_0 - \varphi_0^*(\xi) u_0 + u_1 \varphi_0^*(\xi) - u_1^*(\xi) \varphi_1,$$

где $\varphi = du/dx$, $\varphi^* = du^*/dx$, u_0, u_1 – искомого перемещения соответственно в точках $x = 0$, $x = h$, для двух слоев основания

$$\begin{aligned} u(\xi) &= u_0^*(\xi) \varphi_0 - \varphi_0^*(\xi) u_0 - \varphi_1^*(\xi) u_1 - u_1^*(\xi) \varphi_1, & 0 \leq \xi < h_1, \\ u(\xi) &= u_2^*(\xi) \varphi_2 - \varphi_2^*(\xi) u_2 - \varphi_3^*(\xi) u_3 - u_3^*(\xi) \varphi_3, & h_1 \leq \xi < h. \end{aligned} \quad (18)$$

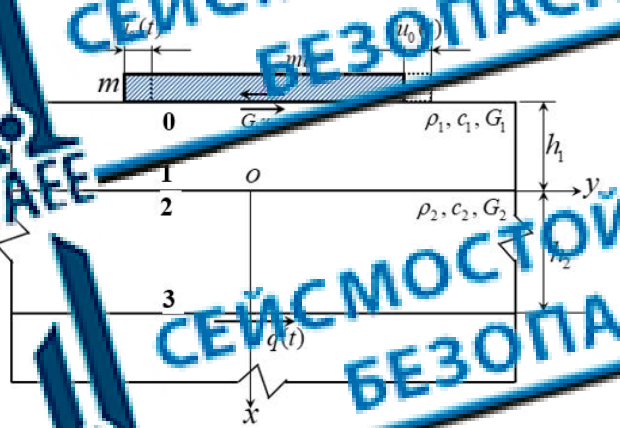


Рисунок 2 — К решению задачи о штампе, лежащем на двухслойном основании при действии гармонической нагрузки

Figure 2 — To the solution of the problem of a stamp lying on a two-layer base under the action of a harmonic load

Используя предельный переход и (18) получим систему уравнений

$$\begin{aligned} (1 + \varphi_{00}^* u_0 + \varphi_{10}^* u_1 + u_{10}^* \varphi_1) &= u_{00}^* \varphi_0, \\ \varphi_{01}^* u_0 + (\varphi_{11}^* u_1 + u_{11}^* \varphi_1) &= u_{10}^* \varphi_0, \\ (1 + \varphi_{22}^* u_2 + \varphi_{23}^* u_3) - u_{22}^* \varphi_2 &= -u_{32}^* \varphi_3, \\ \varphi_{23}^* u_2 + (1 - \varphi_{33}^*) u_3 - u_{23}^* \varphi_2 &= -u_{33}^* \varphi_3. \end{aligned} \quad (19)$$

Записав граничные условия в виде

$$G_1 \varphi_0 = -m \omega^2 u_0, \quad u_1 = u_2, \quad G_1 \varphi_1 = G_2 \varphi_2, \quad G_2 \varphi_3 = -q^*, \quad (20)$$

и внося их в систему (19), получаем граничные параметры

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{k_0 q^*}{k_0 d_1 + d_2}, \quad u_1 = u_2 = \frac{(k_1 G_1 \cos \alpha - m \omega^2 \sin \alpha)}{k_2 G_2 (k_0 d_1 + d_2)}, \quad u_3 = \frac{a^* (1 - \alpha_3 - d_4)}{k_2 G_2 (k_0 d_1 + d_2)}, \\ \varphi_1 &= -\frac{k_0 (k_1 G_1 \sin \alpha - m \omega^2 \cos \alpha) q^*}{G_1 (k_0 d_1 + d_2)}, \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} d_1 &= k_1 G_1 \sin \alpha \cdot \cos \beta + m \omega^2 \cos \alpha \cdot \cos \beta, \\ d_2 &= k_1 G_1 \cos \alpha \cdot \sin \beta - m \omega^2 \sin \alpha \cdot \sin \beta, \\ d_3 &= k_1 G_1 \sin \alpha \cdot \sin \beta + m \omega^2 \cos \alpha \cdot \sin \beta, \\ d_4 &= k_1 G_1 \cos \alpha \cdot \cos \beta - m \omega^2 \sin \alpha \cdot \cos \beta. \end{aligned}$$

Можно заметить, что полученная амплитуда колебаний штампа методом граничных уравнений совпадает с классическим решением (17, а).

В таблице приведены значения амплитуды колебаний штампа в зависимости от α и β при различных значениях k_m и $k_0 = 0,25$.

Таблица 2 – Амплитуды колебания штампа при $k_0 = 0,25$

Table 2 – The amplitudes of the stamp oscillation at $k_0 = 0,25$

α	$k_m = 0,25$					$k_m = 0,5$				
	β	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	β	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
0	4	1,13	1,0	1,88	-4,0	0,94	1,0	0,94	-2,0	-2,0
$\pi/4$	2,83	4,0	∞	-4,0	-2,83	1,88	-8,0	1,41	-2,65	-1,88
$\pi/2$	4	-2,83	-1,0	1,13	-4,0	1,0	0,81	0,5	-0,63	-4,0
$3\pi/4$	∞	0,10	-0,7	1,0	∞	-5,65	-0,62	-0,47	-0,53	5,65
π	-4	-1,13	-1,0	1,88	4,0	-2,0	-0,94	-1,0	-0,94	2,0

Из полученных результатов, приведенных в таблице 2, следует, что с увеличением k_m , то есть с уменьшением жесткости грунта поверхностного слоя, увеличивается амплитуда колебаний штампа.

Выводы

Получено аналитическое решение задачи о колебаниях штампа, лежащего на упругом неоднородном полупространстве при действии поперечной волны. Установлено, что с увеличением плотности грунта поверхностного слоя амплитуда колебаний штампа уменьшается. Усиление колебаний штампа имеет место в том случае, когда период волны в 4,78 раза больше времени прохождения волны через поверхностный слой. Достоверность полученных результатов подтверждается путем сравнения с известными решениями, полученными для неоднородного полупространства без штампа. Полученные результаты позволяют оценить поведение модуля амплитуды колебаний штампа в зависимости от изменения физических и геометрических параметров двухслойного основания.

Список литературы

1. Окамото Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат. 1980. 342 с.
2. Низомов Д.Н. Метод граничных уравнений и сплайн-аппроксимации в решении статических и динамических задач строительной механики: Дис. докт. техн. наук. М.: МИСИ (МГСУ). 1999. 322 с.
3. Низомов Д.Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики. М.: Изд-во АСВ, 2000. 282 с.

Reference

1. Okamoto Sh. Seismic stability of engineering structures. Moscow: Stroyizdat, 1980. 342 p. (In Russian)
2. Nizomov D.N. The method of boundary equations and spline approximation in solving static and dynamic problems of structural mechanics: Diss. doct. tech. Sciences. Moscow: MCSI (MGSU). 1999. 322 p. (In Russian)
3. Nizomov D.N. Method of boundary equations in solving static and dynamic problems of structural mechanics. M. Publishing house ASV, 2000. 282 p. (In Russian)

Информация об авторах / Information about the authors

Низомов Джахонгир Нурович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАНТ, ведущий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений. Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ. Душанбе, Республика Таджикистан ties@mail.ru

Djalongir N. Nizomov, D.Sc. (engineering), professor, Corresponding Member of NAST, Head of the Laboratory of seismic resistance of buildings and structures, Institute of geology, earthquake engineering and seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan (NAST), Dushanbe, Republic of Tajikistan ties@mail.ru

Сангинов Абдусамат Мирворотович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмостойкости зданий и сооружений. Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ. Душанбе, Республика Таджикистан samad80@mail.ru

Abdusamat M. Sanginov, Cand. Sci. (engineering), leading researcher at the Laboratory of seismic resistance of buildings and structures, Institute of geology, earthquake engineering and seismology of the National Academy of sciences of Tajikistan (NAST), Dushanbe, Republic of Tajikistan samad80@mail.ru

УДК 691

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-38-43](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-38-43)

Theoretical and experimental studies

Проектирование коротковолновых радиопередающих антенн в особых климатических условиях

Белаш Татьяна Александровна¹, Сафин Родион Романович²

^{1,2}Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИИ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация. Введение. Показана актуальность выбранной темы. Рассмотрен расчет коротковолновой радиопередающей антенны, установленной на коммуникационном сооружении связи в виде мачты на оттяжках. Площадка строительства характеризуется большими значениями ветрового давления и сейсмичностью 9 баллов с бурями III категории.

Цель. Целью расчета является проверка стойки и оттяжек плечевой мачты, предоставленной заводом с учетом характеристик площадки строительства и оценка ее сейсмостойкости.

Материалы и методы. Расчет выполнен в программе автоматизированного проектирования САД. Сейсмическое воздействие задано автоматически с использованием возможности программного обеспечения. Графики коэффициента динамичности приняты по СП 14.133.0.2018 «Строительство в сейсмических районах».

Результаты. Стойка мачты и оттяжки имеют необходимый запас по прочности и устойчивости и допускаются к установке на площадке, имеющимися климатическими условиями. Сейсмическая нагрузка оказала меньшее влияние, чем комбинация ветровой и гололедной нагрузки.

Выводы. Ветровая нагрузка и сочетание ветровой и гололедной нагрузок с большей вероятностью будут определять конструкцию коммуникационных сооружений, чем сейсмические эффекты. Мачта относительно легкие (расчетные силы ветра будут больше сил гравитации) и поскольку их масса более или менее равномерно распределена с высотой, силы боковой инерции порождаемые сейсмическими возмущениями этой распределенной массы будут не такими значительными, как силы ветра.

Ключевые слова: коммуникационные сооружения, антенно-мачтовые сооружения, мачты связи

Для цитирования: Белаш Т.А., Сафин Р.Р. Проектирование коротковолновых радиопередающих антенн в особых климатических условиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 1. С.38–43.
DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-38-43](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-38-43)

Theoretical and experimental studies

Design of short wave radio transmitting antennas in special climatic conditions

@ Белаш Т.А., Сафин Р.Р., 2023

Tatiana A. Belash^{1,2}, Rodion R. Safin¹

^{1,2} Central Research Institute of Building Structures (TSNIITSK) named after V.A. Kucherenko of JSC "SC Construction". Moscow, Russian Federation

Abstract: Introduction. The relevance of the chosen topic is shown. The calculation of a short-wave radio transmitting antenna installed on a communication structure in the form of a mast on guy wires is considered. The construction site is characterized by high values of wind pressure, seismicity of points and soils of category III.

Goal. The purpose of the calculation is to check the rack and guy ropes of a typical mast provided by the plant, taking into account the characteristics of the construction site and to assess its seismic resistance.

Materials and methods. The calculation was performed in the computer-aided design program SCAD. The seismic impact is set automatically using the capabilities of the software. Graphs of the dynamic coefficient were plotted according to SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas.

Results. The mast stand and the guy ropes have the necessary margin of strength and stability and are allowed to be installed on a site with existing climatic conditions. The seismic load had less impact than the combination of wind and ice load.

Conclusions. Wind load and the combination of wind and ice loads are more likely to determine the design of communication structures than seismic effects. The masts are relatively light (the calculated wind forces will be greater than the gravitational forces) and since their mass is more or less linearly distributed over their height, the lateral inertial forces generated by seismic excitations of this distributed mass will not be as significant as the wind forces.

Keywords: communication structures, antenna-mast structures, communication masts

For citation: Belash T.A., Safin R.R. Design of short-wave radio transmitting antennas in special climatic conditions. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 1, pp. 29–43 (In Russian) DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-38-43](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-38-43)

Введение

Несмотря на бурное развитие мобильной связи, существуют такие места, в которых отсутствует даже радиосигналы. На обширных территориях России, где плотность населения невелика, можно найти немало таких мест. Появление коротковолновых радиопередаточных антенн в таких районах обусловлено необходимостью радиопередачи сигналов в военных и гражданских целях, таких как оповещение населения о чрезвычайных происшествиях, работы скорой помощи, работы в единой инфраструктуре и т.д. В данной статье рассмотрено проектирование коротковолновой радиопередаточной антенны ВМ-230 на территории острова Сахалин. Антенна ВМ-230 совместно работает с радиопередатчиками и излучает горизонтальную осесимметричную электрического поля. Антенна используется в системе радиосвязи как радиопередаточная, так и радиоприемная. Антенна ВМ-230 сконструирована в виде вертикального пространственного излучателя, состоящего из проволочных вибраторов. Геометрическая форма излучателя обеспечена двумя кольцами из стальных труб, которые размещены сверху и снизу опорной мачты, и распорным кольцом, расположенным на центральной части опорной мачты. Среднее кольцо жестко фиксируется в пространстве системой оттяжек, опорная мачта собрана из секций. Горизонтальную жесткость мачты обеспечивают три уровня оттяжек. Общая схема антенны ВМ-230 показана на рис. 1, подобный построенный объект на местности показан на рис. 2.

В качестве особых климатических условий на площадке строительства можно отметить сейсмичность площадки строительства равную 9 баллов по карте Δ [1], а также III категорию грунтов по сейсмическим условиям согласно таблице 8.1 [1].

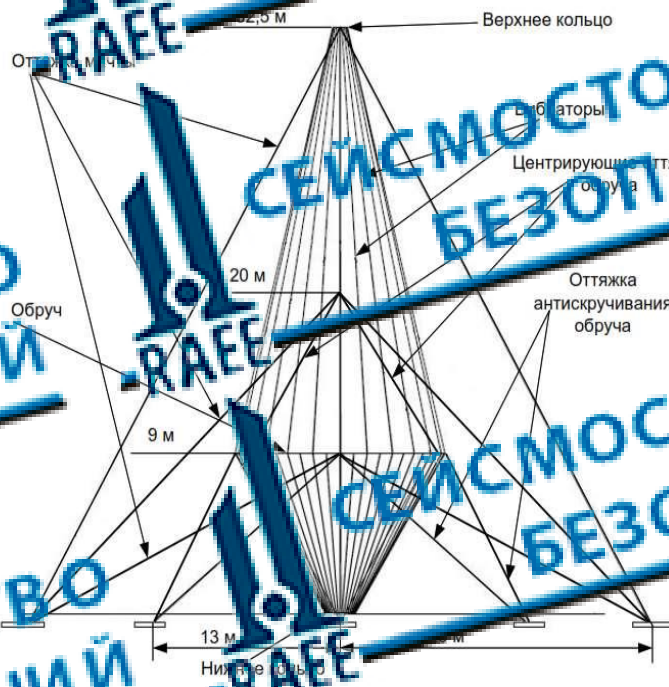


Рисунок 1 – Схема радиопередаточной антенны ВМ-230

Figure 1 – Diagram of the VM-230 radio transmitting antenna



Рисунок 2 – Антенна ВМ-230 на местности [2]

Figure 2 – VM-230 antenna on the ground [2]

Цель, материалы и метод

Целью расчета является проверка стойки и оттяжек типовой мачты, предоставленной заводом с учетом характеристик площадки строительства. Также целью является ответ на вопрос, попадет ли сейсмическая нагрузка в расчетное сочетание и будут ли напряжения в элементах от данной нагрузки больше, чем от комбинации гололеда и ветра. Расчет стойки проведен по первому (по прочности) и второму (по устойчивости) предельным состояниям. Стойка рассчитана как пространственная консольно-стержневая система в программном комплексе «SCAD Office 21.5». Элементы антенны ВМ-230 не моделировались вместе с мачтой, ветровая нагрузка на вибраторы и облучки антенны прикладывалась к мачте в местах крепления облучек.

Результаты

Расчетным сочетанием при определении усилий в элементах мачты и оттяжках является сочетание 25% ветровой нагрузки на открытые гололедом элементы конструкции мачты, оттяжек и элементы антенны ВМ-230 + нагрузка от собственного веса конструкции опоры и элементов антенны ВМ-230 + гололедная нагрузка. Величины продольных усилий от расчетной комбинации показаны на рис. 3. Перемещения ствола мачты от комбинации нормативных нагрузок показаны на рис. 4.

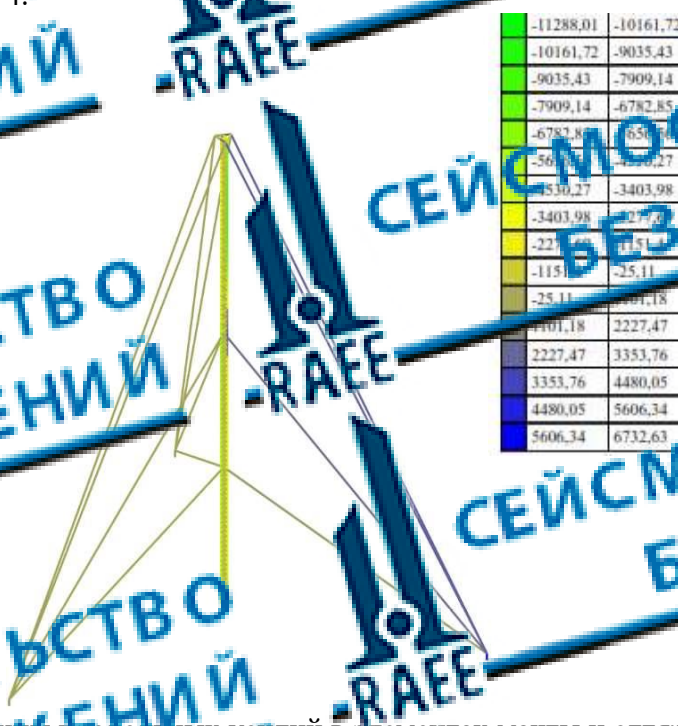


Рисунок 3 – Величины продольных усилий в элементах мачты и оттяжках от РСУ

Figure 3 – The values of longitudinal forces in the mast element and the cables from the calculation efforts combinations

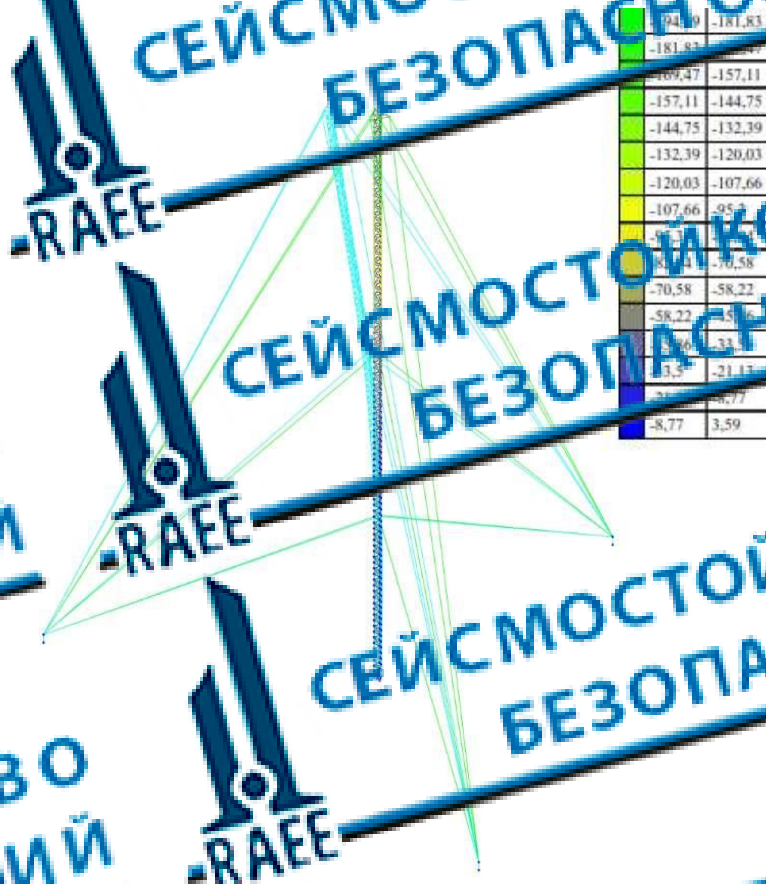


Рисунок 4 - Величины перемещений элементов от комбинации нормативных значений нагрузок

Figure 4 – Values of element displacements from a combination of standard load values

Сейсмические воздействия, к счастью, редко становятся причиной обрушения башен и мачт. Ветровая нагрузка и сочетание ветровой и гололедной нагрузки с большей вероятностью будут определять конструкцию коммуникационных сооружений, чем сейсмические эффекты. Хотя было много случаев разрушения сооружений из-за экстремального ветра и/или гололеда, но в связи с землетрясениями были только единичные случаи. Правильно спроектированные сооружения должны противостоять умеренным землетрясениям без значительных повреждений и крупным землетрясениям без обрушения. На сейсмическую чувствительность сооружений влияет совпадение между ее доминирующими собственными частотами и частотным содержанием возбуждения, в данном случае движения грунта. Прошлые землетрясения имеют типичные доминирующие частоты в диапазоне от 1 до 10 Гц, с концентрацией от 0,3 до 3 Гц для горизонтального движения, в то время как вертикальное движение включает более широкий диапазон частот. Таким образом, первым шагом в оценке чувствительности конструкций к землетрясениям является оценка ее доминирующих собственных частот. В рассмотренной конструкции доминирующая собственная частота равна 2 Гц. Большинство мачт имеют свои собственные частоты в пределах чувствительного диапазона, однако сейсмические эффекты вряд ли будут определять решающее значение. Мачты относительно легкие (расчетные силы ветра будут больше сил гравитации), поскольку их масса более или менее линейно распределена по их высоте, силы инерции, порождаемые сейсмическими возбуждениями этой распределенной массы, будут не такими значительными, как силы ветра. Разрушение крепления створа оттяжки может быть потенциально важным сейсмическим эффектом в мачтах. Это может произойти, когда вертикальное движение земли сочетается с обычным горизонтальным движением при условии, что существует что-то не

совпадение между частотами света и частотами оттяжки мачты, если такие режимы существуют.

Выводы

1. В результате исследования установлено, что принятое конструктивное решение коммуникационного сооружения обеспечивает его сейсмостойкость при 9 баллах.
2. Наибольшее влияние на прочность и устойчивость коммуникационного сооружения проектируемого в сейсмическом районе, оказывает сочетание ветровой и снеговой нагрузок.

Список литературы

1. СП 14.13330.2018. Строит. правил. Строительство в сейсмически районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*
2. Развитие Архангельским филиалом объектов портовой инфраструктуры и флота // Росморпорт URL: https://www.rosmorport.ru/filials/arh_development_of_ports/ (дата обращения: 17.04.2023).

References

1. SP 14.13330.2018. Svod pravil. Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya. SNiP II-7-81*
2. Razvitiye Arkhangel'skim filialom objektov portovoj infrastruktury i flota. Rosmorport URL: https://www.rosmorport.ru/filials/arh_development_of_ports/ (data obrashcheniya: 17.04.2023).

Информация об авторе / Information about author

Белаш Татьяна Александровна, доктор технических наук, советник РААСН, профессор кафедры «Строительство сооружений, конструкции и материалы» АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, Dr. Sci. (Engineering), advisor of the RAACS, professor of the "Building structures, constructions and materials" department of JSC "Construction". Moscow, Russian Federation

Сафин Родион Романович, аспирант, АО «НИЦ «Строительство», главный конструктор по новым разработкам ГК «Новые Башни». Москва, Российская Федерация

Rodion R. Safin, postgraduate student of JSC "Construction", chief designer for new developments of Group of companies "New towers". Moscow, Russian Federation

УДК 624.04: 621.039.5: 6519.686

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-44-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-44-53)

Техническое регулирование и развитие норм проектирования

Аттестация программ для расчёта строительных конструкций объектов использования атомной энергии в Ростехнадзоре

Нефёдов Сергей Сергеевич¹, Шевченко Сергей Александрович²

¹ Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору
«Ростехнадзор», Москва, Российская Федерация
² ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация: Приводятся сведения о системе аттестации программ для ЭВМ (далее программы), которая функционирует в системе Ростехнадзора более 20 лет. Для проведения аттестации создан мультидисциплинарный Экспертный совет, в состав которого входят тематические секции по видам расчётов. Программы для расчёта строительных конструкций рассматриваются на секции «Прочность и надёжность строительных конструкций зданий и сооружений». Задачей секции является экспертиза программ в ходе которой оценивается правильность и точность работы программы. На основе результатов экспертизы секцией готовится проект аттестационного паспорта программы. Окончательное решение по аттестации программы принимается на Президиуме Экспертного совета с учётом результатов её экспертизы на секции.

ключевые слова: объекты использования атомной энергии, строительные конструкции, напряжённо-деформированное состояние, прочность, надёжность, программы для ЭВМ, экспертиза, аттестация

Для цитирования: Нефёдов С.С., Шевченко С.А. Аттестация программ для расчёта строительных конструкций объектов использования атомной энергии в Ростехнадзоре // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. №1. С. 44-53.
DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-44-53](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-44-53)

Technical regulation and design standards development

Certification of programs for the analysis of building construction of nuclear energy facilities at Rostekhnadzor

Sergey S. Nefedov¹, Sergey A. Shevchenko²

¹ Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service,
Moscow, Russian Federation

² Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety,
Moscow, Russian Federation

@ Нефёдов С.С., Шевченко С.А., 2023

Abstract: In this article information is presented about system of certification of computer programs organized at Federal supervision body for nuclear and radiation safety "Rostechnadzor". Special multidisciplinary Expert council is organized to provide this certification. This Expert council includes thematic sections for different types of analysis. Programs for analysis of civil constructions are considered in section "Strength and reliability of construction of buildings and structures". Section provides expertise of programs including analysis of adequacy and accuracy of program in the claimed field of analysis. On the base of results of expertise the draft of certification passport of the program is prepared for the final analysis at Presidium of Expert council.

Keywords: nuclear energy facilities, civil constructions, stress deformation state, strength, reliability, computer programs, expertise, certification

For citation. Nefedov S.S., Shevchenko S.A. Certification of programs for the analysis of building constructions of nuclear energy facilities at Rostechnadzor. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 1, pp. 44-53 (In Russian)
DOI: [10.37153/2542-9283-2023-1-44-53](https://doi.org/10.37153/2542-9283-2023-1-44-53)

Безопасность сооружений в значительной степени определяется правильностью расчёта напряжённо-деформированного состояния, прочности и устойчивости строительных конструкций. Основные расчёты строительных конструкций зданий и сооружений в настоящее время выполняются на ЭВМ. Правильность расчётов определяется адекватностью используемых программ для ЭВМ (далее - программы). Особое значение имеет качество программ, используемых в расчётах строительных конструкций объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в первую очередь тех конструкций, надёжность которых определяет ядерную и радиационную безопасность этих объектов.

В соответствии с ныне действующей редакцией Федерального закона «Об использовании атомной энергии» [1] программы, используемые для обоснований безопасности ОИАЭ, подлежат экспертизе и аттестации. Использование неаттестованных программ в расчётах обоснований безопасности может стать причиной замечаний при экспертизе обоснований ядерной и радиационной безопасности ОИАЭ, а также причиной отказа в выдаче лицензии Ростехнадзора на осуществление деятельности в области использования атомной энергии.

Для проведения аттестации программ при Ростехнадзоре создан Экспертный совет, который объединяет опытных программистов и специалистов, занимающихся расчётными обоснованиями безопасности, из ведущих научных, проектных и эксплуатирующих организаций атомной отрасли. Экспертный совет по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре (далее - Экспертный совет) является общественным органом. Он функционирует на базе федерального бюджетного учреждения «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (ФГУ «НТЦ ЯРБ»), являющегося организацией научно-технической поддержки Ростехнадзора. Председателем Экспертного совета является заместитель директора ФГУ «НТЦ ЯРБ». Деятельность Экспертного совета осуществляется в соответствии с Положением об Экспертном совете по аттестации программ для электронных вычислительных машин при Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденным приказом Ростехнадзора от 27.12.2018 № 655.

Экспертный совет носит мультидисциплинарный характер. В его составе имеются тематические секции по различным видам расчётов – нейтронная физика,

теплогидравлика и др. Программы для расчёта строительных конструкций рассматриваются в секции № 6 «Прочность и надёжность строительных конструкций зданий и сооружений». Структура Экспертного совета показана на рис. 1.

В составе секции «Прочность и надёжность строительных конструкций зданий и сооружений» 29 специалистов из ведущих проектных и научных организаций Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода и других регионов. В их числе 8 докторов наук и 16 кандидатов наук. Принцип работы секции – коллективное обсуждение и совместное принятие решений по вопросам экспертизы программ.

Инициатором или Заказчиком аттестации той или иной программы является организация, использующая данную программу при выполнении расчётов, обосновывающих безопасность ОИАЭ, либо организация-разработчик программы, желающая обеспечить условия применения программы в таких расчётах. Для инициации процесса аттестации Заказчик обращается с соответствующим заявлением в ФБУ «ЦД ЯРБ».

Для проведения аттестации Заказчик разрабатывает и представляет Экспертный совет счёт о верификации и валидации (ОВВ) программы, обосновывающий возможность применения программы в определенной области. ОВВ является основой для проведения экспертизы программы в соответствующей тематической секции. Структура ОВВ и основные требования к его содержанию регламентированы руководящим документом Ростехнадзора [2].

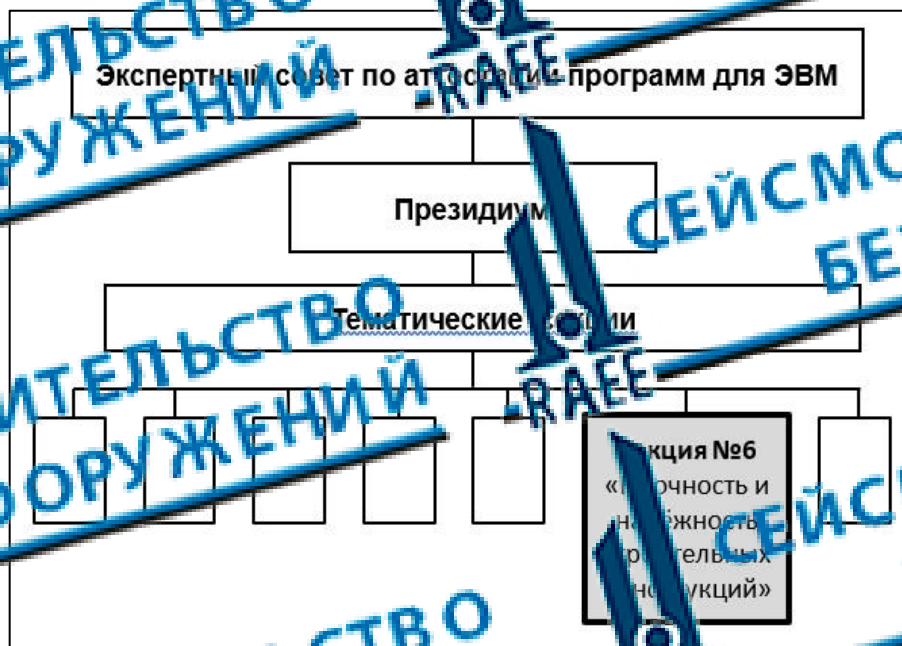


Рисунок 1 – Структура Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре

Figure 1 – Structure of the Expert council for the certification of Computer programs of Rostekhnadzor

В соответствии с [2], в ОВВ должны быть описаны назначение программы и область её применения, методика расчёта и её обоснование, также должны быть описаны тесты, использованные для проверки работы программы, и сведения о погрешностях результатов расчётов, выполняемых при обосновании безопасности ОИАЭ.

При описании назначения программы и области её применения указываются виды расчётов, выполняемых программой: расчёты на напряженно-деформированного состояния конструкций при статических или динамических воздействиях, расчёты осадок и деформаций сооружений, подбор сечения и армирования конструкций и т.п. Также указываются виды рассчитываемых конструкций (балки, пластинки, массивные элементы и т.д.) и основные подходы к их моделированию: учёт геометрической и физической нелинейности, 2-D или 3-D постановка задачи.

При описании методики расчётов представляется математическая база алгоритмов, используемых программой. Для конечно-элементных программ приводятся основные зависимости для аттестуемых конечных элементов. В случае программ для физически нелинейных расчётов даётся также описание моделей материалов, заложенных в программу.

Важнейшим разделом СВО является описание тестов, использованных для проверки работы программы. В качестве тестов могут использоваться расчёты задач, по которым имеются аналитические решения, либо результаты экспериментов, специально поставленных или известных, открыто опубликованных в литературе данных. Также в качестве тестов могут использоваться задачи, по которым имеются решения, полученные с помощью ранее аттестованных программ (кросс-верификация).

Результаты тестирования образуются в форме матрицы верификации и валидации, которая представляет собой таблицу, составленную по видам расчётов. В таблице приводятся краткие описания выполненных тестов и полученные в них погрешности расчёта. На рис. 2 представлен примерный вид матрицы верификации для конечно-элементного программного пакета, предназначенного для выполнения широкого спектра расчётов строительных конструкций.

Вид расчёта	№ теста	Наименование задачи	Проверяемый параметр	Погрешность, %
1. Линейная статика	1.1	Консольная балка под действием равномерно распределённой нагрузки	Угол поворота	4%
	1.2	Пластина под действием собственного веса	Прогиб	5%
	1.3	Оболочка градирни под действием ветровой нагрузки	Напряжения	7%
2. Линейная динамика	2.1	Собственные колебания рамы	Частота первой формы	2%
	2.2	Расчёт плиты на удар	Напряжения	6%
	2.3	Колебания рамы при воздействии в форме спектра	Максимальное ускорение	12%
...				

Рисунок 2 – Матрица верификации для конечно-элементного программного пакета по расчётам строительных конструкций

Figure 2 – Verification matrix for finite element software package for analysis of building structures

При экспертизе программ различают верификационные и валидационные контрольные тесты.

В терминологии Системы менеджмента качества [3]:

Верификация – это подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены,

валидация – это подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

В процессе аттестации программ в Ростехнадзоре используется подход, соответствующий определению Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [4], в соответствии с которым:

верификация – это процесс, имеющий целью определить, правильно ли отображена данная вычислительная модель искомую концептуальную модель или математическую модель, т.е. были ли управляющие физические уравнения и даны правильно преобразованы в компьютерные;

валидация – это процесс определения адекватности самой математической модели с точки зрения ее соответствия реальной системе, которая моделируется путем сверки основанных на данной модели прогнозов с данными наблюдений, полученными на реальной системе, или с экспериментальными данными.

Другими словами валидация – это оценка точности значений, прогнозируемых программой, в сравнении с соответствующими экспериментальными данными. В процессе валидации выявляются и оцениваются все неопределенности, аппроксимации, принятые в расчетных моделях, а также недостатки в базовом основе расчетных алгоритмов.

При аттестации верификационные тесты рассматриваются как тесты, подтверждающие, что результаты, полученные с помощью программы, соответствуют законам механики, а валидационные тесты – как тесты, подтверждающие возможность применения программы для расчетов строительных конструкций в определенной области с оцененной погрешностью получаемых результатов.

На рис. 3 представлены примеры верификационного и валидационного тестов для некоторой конечно-элементной программы претендующей на применение для динамического расчета строительных конструкций. В тесте по рис. 3а результат расчета сравнивается с известными аналитическими решениями. Конкретного объекта в данном случае нет. Это верификационный тест. В тесте по рис. 3б результат расчета сравнивается с результатами эксперимента, выполненного на конкретном объекте – турбогенераторе АЭС. Это валидационный тест.

Практически при экспертизе программ тесты, в которых результаты счёта сопоставляются с аналитическими решениями, рассматриваются как верификационные тесты, а тесты, в которых результаты счёта сопоставляются с результатами эксперимента, – как валидационные тесты. Наличие валидационных тестов в СВБ весьма желательно, т.к. это повышает надёжность обоснования правильности и точности работы программы. В случае программ для физически нелинейных расчетов наличие валидационных тестов следует рассматривать как обязательное.

Оценка приемлемости погрешностей, полученных в верификационных тестах и в валидационных тестах, различна. Если погрешность в 10% полученная в верификационном тесте типа показанного на рис. 3а приемлема, то такая же

погрешность, полученная в валидационном тесте типа показано на рис. 35, может оцениваться как вполне приемлемая.

Помимо тестов, представленных разработчиком ЭВВ, при экспертизе программы могут потребоваться дополнительные тесты. Дополнительные тесты предлагаются экспертами этой секцией в целом в результате обсуждения сложных вопросов экспертизы программы на заседаниях секции.

Для проведения экспертизы программы создаётся рабочая группа экспертов из числа членов секции и привлечённых лиц. Количество экспертов определяется сложностью программы и количеством видов расчётов, для выполнения которых предназначена программа. В рабочую группу включаются эксперты, научный стаж и опыт практических расчётов которых соответствует специфике рассматриваемой программы.

Система аттестации программ для ЭВМ функционирует в Ростехнадзоре более 30 лет. На основе накопленного опыта подготовлены руководящие документы, которые устанавливают единые требования к подготовке экспертных заключений и исключают возможность субъективных оценок. Положения руководящих документов учитывают также международный опыт аттестации программ и рекомендации МАГАТЭ [4].

- а) Определение частоты собственных колебаний консольной балки



- б) построение амплитудно-частотной характеристики фундамента турбогенератора

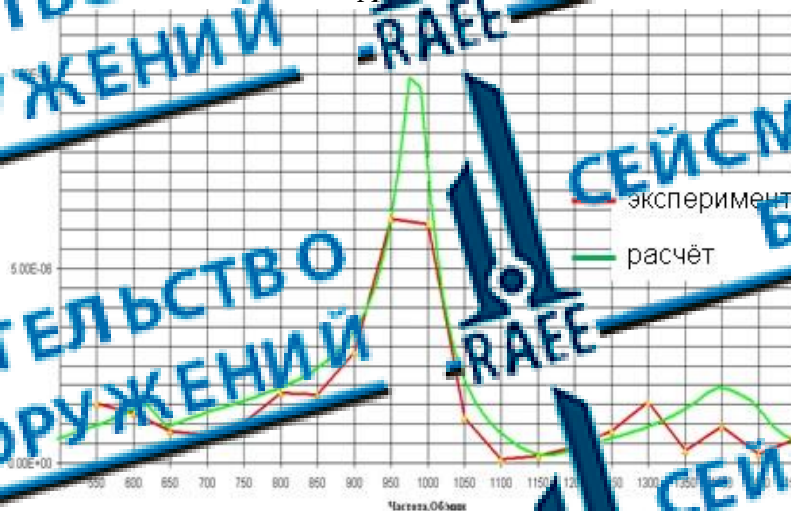


Рисунок 3 – Типы контрольных тестов
а – вертикальный тест, б – валидационный тест

Fig. 3 – Types of control tests

a – verification test, b – validation test

Основные этапы рассмотрения программы на секции «Прочность и надежность строительных конструкций зданий и сооружений» иллюстрирует схема рис. 4.

Из этой схемы видно, что заключения экспертов проходят обсуждение на заседании секции (этап 3). Это обсуждение носит открытый коллективный характер, что способствует объективности результатов экспертизы программы.

Обсуждение особенностей работы программ на заседании секции способствует ознакомлению специалистов из различных регионов, участвующих в заседании очно или по электронной связи, с возможностями и новыми программными продуктами, что является важным дополнительным эффектом экспертизы программы.

На основе открытого коллективного обсуждения происходит также принятие решения о возможности рекомендации программы к аттестации (этап 5) и об основных положениях проекта аттестационного паспорта. В ходе обсуждения этих формулировок уточняется объем аттестации с учётом результатов экспертизы программы.

В ходе обсуждения программ на заседаниях секции специалисты из различных регионов страны могут узнать о возможностях новых программных продуктов, что является важным дополнительным эффектом работы секции.

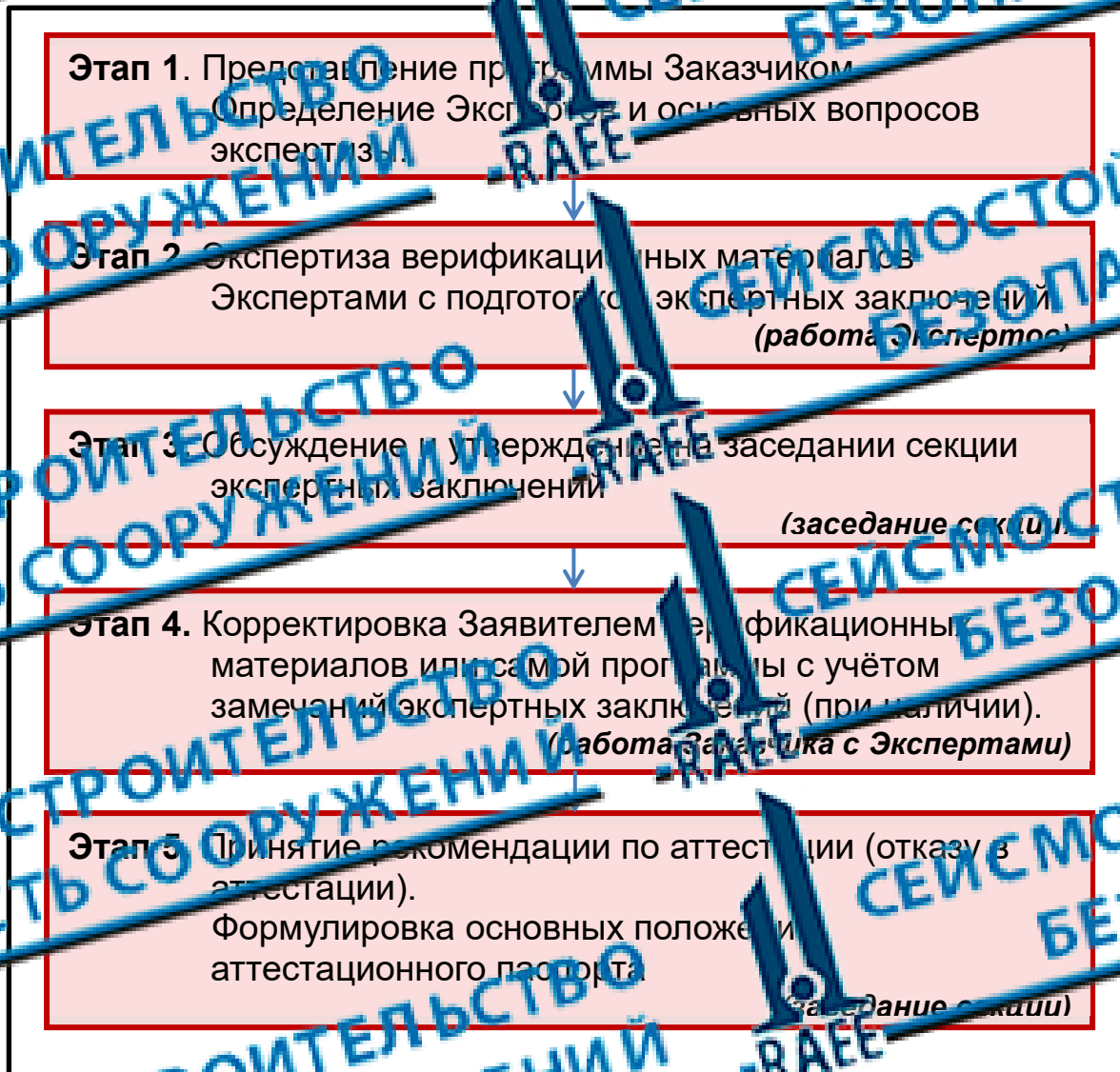


Рис. 4. Основные этапы экспертизы программ

Figure 4 – The main stages of the examination of the program

Рекомендации сейсмики направляются в Президиум Экспертного совета, который принимает окончательное решение по аттестации программы, а также по формулировкам аттестационного паспорта.



ВЫВОДЫ

1. В соответствии с Федеральным законом «Об использовании атомной энергии» программы для ЭВМ, используемые для выполнения расчётных обоснований ядерной и радиационной безопасности, должны быть аттестованы в установленном порядке. Это требование распространяется, в том числе, на программы для расчёта строительных конструкций, важных для обеспечения ядерной и радиационной безопасности объектов использования атомной энергии.

2. Для проведения аттестации в системе Ростехнадзора действует мультидисциплинарный Экспертный совет, обладающий более чем 30-летним опытом аттестации программ для ЭВМ. В составе Экспертного совета имеется секция «Прочность и надёжность строительных конструкций, зданий и сооружений», которая предназначена для проведения экспертизы программ для расчёта строительных конструкций.

3. За период существования системы аттестации программ для ЭВМ в Ростехнадзоре нарабатываются необходимые руководящие документы, которые устанавливают единообразные требования как к документам, обосновывающим применение программ, так и к подготовке и проведению экспертизы программ, что исключает возможность субъективных экспертных оценок.

4. Принятие решений по вопросам экспертизы программ основано на принципе открытого коллективного обсуждения, что способствует объективности результатов экспертизы программ для ЭВМ.

5. Обсуждение особенностей работы программ для ЭВМ на заседаниях секции способствует ознакомлению специалистов из различных регионов с возможностями новых программных продуктов, что является важным дополнительным эффектом экспертизы программ для ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
2. RD-03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии».
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2008. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
4. МАГАТЭ. Серия норм безопасности ICR Part 4 (Rev.1) «Оценки безопасности установок и деятельности». 2016.

REFERENCES

1. Federal'nyi zakon ot 21 novabrya 1995 g. N 170-FZ «Ob ispol'zovanii atomnoy ehnergii». (In Russian)
2. RD-03-34-2000 «Trebovaniya k sostavu i soderzheniyu oche'ta o verifikacii i obosnovanii programmnnykh sredstv, primenyaemykh dlya obosnovaniya bezopasnosti ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj ehnergii». (In Russian)
3. GOST R ISO 9000-2008. Sistemy menedzmenta kachestva. Osnovnyye polozheniya i slovar'. (In Russian)
4. Safety Assessment for Facilities and Activities: IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4 (Rev. 1). 2016.

Данные об авторах / Information about authors

Нефёдов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, председатель секции «Прочность и надежность строительных конструкций зданий и сооружений» Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору «Ростехнадзор»
Москва, Российская Федерация

Sergey S. Nefedov, Cand. Sci. (Engineering), Chairman of the section "Strength and reliability of civil constructions of buildings and structures" of Expert council for certification of computer programs in Federal environmental, industrial and nuclear supervision service "Rostekhnadzor"

Moscow, Russian Federation

Шевченко Сергей Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», ученый секретарь Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору «Ростехнадзор»
Москва, Российская Федерация

Sergey A. Shevchenko, Cand. Sci. (Engineering), chief of division of Scientific and engineering center for nuclear and radiation safety, scientific secretary of Expert council for certification of computer programs in Federal environmental, industrial and nuclear supervision service "Rostekhnadzor".

Moscow, Russian Federation

УДК 628.134, 699.841

DOI [10.37153/2618-9173.2023-1-54-67](https://doi.org/10.37153/2618-9173.2023-1-54-67)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Пневмозащита водонапорных башен

Сабирова Ойпошша Батияровна¹, Венченкова Диана Геннадиевна²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Рассматривается эффективность применения пневмозащиты для снижения сейсмических нагрузок на водонапорную башню. Башня несет резервуар емкостью 30 м³. В качестве пневмозащиты использованы емкости с воздухом, размещенные по периметру резервуара в зоне максимального гидродинамического давления. Объем воздуха принят по рекомендациям О.А. Савинова и М.М. Пойчева и составляет 4 м³. Анализ уравнений гидродинамики позволяет разделить жидкость в резервуаре на две части. Одна часть соединена с резервуаром жестко (прямая соединенная масса жидкости), а вторая с помощью пружины, моделирующей воздушный амортизатор. В выполненных расчетах прямая соединенная масса составила 14 т. Эффект снижения оказался меньше, чем ожидалось. Это связано с тем, что сама конструкция башни достаточно тяжелая, и нагрузка от собственного веса примерно равна нагрузке от веса жидкости. Поэтому двукратное снижение нагрузки от жидкости снижает общую нагрузку только на 25%.

Цель: Повысить сейсмостойкость водонапорных башен, путем применения пневмозащиты. Традиционно, сейсмостойкость водонапорных башен обеспечивается конструктивным решением ствола башни, повышение сейсмостойкости уже эксплуатируемых башен в таком случае проблематично. В связи с этим поставлена задача изменения динамических характеристик сооружения за счет применения пневмозащиты непосредственно в резервуаре сооружения.

Методы: В статье рассматривается конструктивное решение внутренней пневмозащиты и методика расчета водонапорных башен с ее применением на статические нагрузки, дается оценка эффективности такого типа сейсмозащиты. Выполнен численный расчет объемов пневмозащиты и численных значений параметров расчетно-динамической модели конструкции водонапорной башни с внутренней пневмозащитой применительно к башне А.А. Рожновского. Выполнены расчеты на сейсмическое воздействие и определены усилия в конструктивных элементах водонапорной башне без пневмозащиты и при ее устройстве.

Результаты: Проведен сравнительный анализ колебаний водонапорной башни без пневмозащиты и при ее наличии. Результаты показывают, что при наличии пневмозащиты изменяются динамические характеристики системы, что приводит к снижению сейсмических нагрузок и значительному уменьшению усилий в конструкции водонапорной башни, в том числе в стволе.

практическая значимость: Устройство внутренней пневмозащиты, позволит обеспечить сейсмостойкость, в том числе эксплуатируемых водонапорных башен в тех районах, где сейсмичность площадки строительства была повышена вследствие пересмотра карт общего сейсмического районирования. Применение пневмозащиты позволяет не предусматривать дополнительное утепление пневмозащитных установок,

так как они находятся внутри резервуара. Кроме того, такое решение облегчает эксплуатацию водонапорной башни, снабженной пневмозащитой, так как конструктивные элементы устройства защищены от внешних воздействий.

Ключевые слова: пневмозащита, сейсмостойкие водонапорные башни, расчетно-динамическая модель, объем пневмозащиты, формы колебаний

Для цитирования: Сабирова О.Б., Зенченкова Д.В. Пневмозащита водонапорных башен // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 1. С. 54-67. DOI [10.37153/2618-9281.2023-1-54-67](https://doi.org/10.37153/2618-9281.2023-1-54-67)

Благодарности: Авторы благодарят профессора А.М. Уздина за помощь при подготовке статьи.

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Pneumatic protection of water towers

Oyposhsha B. Sabirova¹, Diara V. Zenchenkova²

^{1,2} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (SPbUPS),
St. Petersburg, Russian Federation

The paper discusses the effectiveness of using pneumatic protection to reduce seismic loads on a water tower. The tower carries a reservoir with a capacity of 30 m³. Air tanks, used as pneumatic protection, are placed along the reservoir perimeter in the zone of maximum hydrodynamic pressure. The volume of air was accepted according to the recommendations of O.A. Samoylov and M.M. Peychev and is equal to 4 m³. The analysis of the hydrodynamic equations makes it possible to divide the liquid in the reservoir into two parts. One part is rigidly connected to the reservoir (attached mass of liquid), and the second part is connected with the tank by a spring, simulating an air shock absorber. In the performed calculations, the added mass was 4 tons. The effect of the seismic load decrease was less than expected. This is due to the fact that the structure of the tower is quite heavy, and the load from its own weight is approximately equal to the load caused by the weight of the liquid. Therefore, doubling the liquid load reduces the total load by only 20%.

Purpose: To increase the seismic resistance of water towers by applying pneumatic protection. Traditionally, the seismic resistance of water towers is provided by a constructive solution of the tower shaft; in this case, increasing the seismic resistance of already operated towers is problematic. In this regard, the task was set to change the dynamic characteristics of the structure through the use of pneumatic protection distributed in the reservoir of the structure.

Methods: The article discusses the constructive solution of internal pneumatic protection and the method of calculating water towers with its application to seismic loads, and evaluates the effectiveness of this type of seismic protection. A numerical calculation of the volumes of pneumatic protection and numerical values of the parameters of the calculation-dynamic model of the design of a water tower with internal pneumatic protection in relation to the A.A. Rozhnovsky. Calculations for seismic impact have been performed and forces in the structural elements of a water tower without pneumatic protection and with its installation have been determined.

Results: A comparative analysis of the oscillations of a water tower without pneumatic protection and with it was carried out. The results show that the presence of pneumatic protection the dynamic characteristics of the system change, which leads to a decrease in

seismic loads and a significant decrease in the forces in the lower part of the water tower, including in the shaft.

Practical significance: The device of internal pneumatic protection will ensure seismic resistance including opened water towers in those areas where the seismicity of the construction site has been increased due to the revision of general seismic zoning maps. Internal pneumatic protection makes it possible not to provide for additional insulation of pneumatic protective installations, since they are located inside the tank. In addition, this solution facilitates the operation of a water tower equipped with pneumatic protection, since the structural elements of the device are protected from external influences.

Keywords: pneumatic protection, earthquake-resistant water towers, computational and dynamic model, volume of pneumatic protection, vibration patterns

For citation: Sabirova O.B.¹, Zhenchenko D.V. Pneumatic protection of water towers. *Earthquake engineering, Constructions Safety*. 2023, no. 1, pp. 54–67 (In Russian)
DOI: [10.7153/2018-9283-2023-1-54-67](https://doi.org/10.7153/2018-9283-2023-1-54-67)

Acknowledgements: The authors thank Professor A.M. Uzdin for his help in preparing the article.

Введение

Как правило, повышение сейсмостойкости водонапорных башен обеспечивается путем разработки различных конструктивных решений ствола башни [1–6]. Качественно другой подход – изменение динамических характеристик сооружения за счет применения пневмозащиты непосредственно в резервуар сооружения.

Конструктивное решение пневмозащиты водонапорных башен

Идея сейсмоизоляции жидкости впервые была предложена для не напорных гидротехнических конструкций, а для акваторий с целью предохранения их от различного рода экстремальных воздействий. Она заключалась в создании воздушной завесы из пузырей воздуха, выпускаемого из перфорированных труб.

В дальнейшем О.А. Савинов и другие специалисты изучали вопрос о возможности использования воздушной завесы для защиты напорных плотин во время землетрясений [7]. Особо следует выделить работы С.М. Шейнгой [8, 9], посвященные всестороннему анализу одного из конструктивных вариантов воздушной завесы, предназначенной для повышения сейсмостойкости плотин. В этом случае снижение гидродинамического давления жидкости на плотину достигается установкой непосредственно на напорную грань плотины или на некотором расчетном расстоянии от нее ряда ряденного числа открытых снизу стаканов, наполненных воздухом. Помимо снижения гидродинамического давления жидкости, при соответствующей настройке воздушной завесы, составляющей гидродинамического давления, частично гасит колебания плотины, то есть завеса выполняет функцию динамического гасителя колебаний. Полученные результаты этих исследований были использованы в ряде проектах плотин и дали высокий технико-экономический эффект. Такое техническое решение реализовано при строительстве Ипатинской ГЭС.

Была попытка реализации пневмозащиты для резервуаров, в том числе, водонапорных башен. Этими вопросами занимались Д.А. Савинов, А.М. Уздин и другие [7, 10, 11]. Кроме того, в работе [11] описаны общие рекомендации и попытка

практического применения ДГК в сейсмостойком строительстве. Эти исследования носили теоретический характер и не нашли широкого практического применения. Тем не менее, расчеты показывают, что конструктивное решение в виде пневмозащиты может повысить сейсмостойкость водонапорных баков.

Сущность пневмозащиты сооружений резервуаров с жидкостью состоит в создании упругоуплотняющего воздушного слоя, по аналогии с грузиным амортизатором, благодаря которому происходит уменьшение гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара, а следовательно и полного горизонтального усилия.

Вариант конструктивного решения внешней пневмозащиты предложенный О.А. Савиновым, А.М. Уздиным и другими авторами показан на рисунке 1.

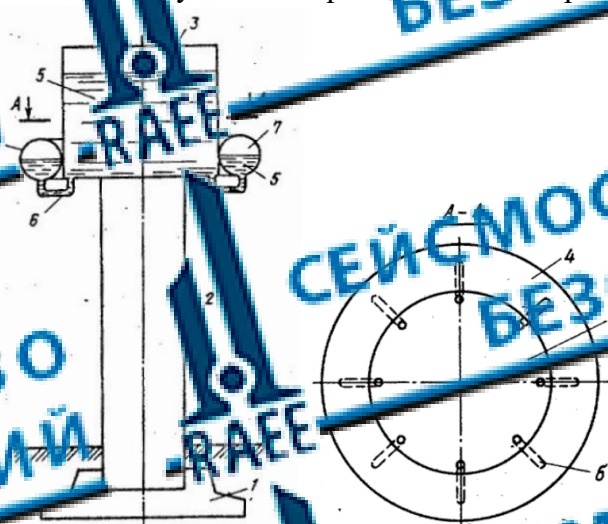


Рисунок 1 – Конструктивная схема внешней пневмозащиты резервуара [7, с.58]:
1 – фундамент, 2 – ствол башни, 3 – резервуар, 4 – емкость для пневмозащиты резервуара, 5 – жидкость в емкости, 6 – сообщающиеся сосуды, 7 – сжатый воздух

Figure 1 – Structural scheme of external pneumatic protection of the tank [7, p.58]:

1 – foundation, 2 – tower trunk, 3 – tank, 4 – tank for pneumatic protection of the tank, 5 – liquid in the tank, 6 – communicating vessels, 7 – compressed air

Принципиальной особенностью изображенной водонапорной башни является наличие дополнительной емкости тороидальной формы, в полости которой содержится сжатый воздух. Емкость взаимодействует с основным баком при помощи системы сообщающихся сосудов. При заполнении бака часть массы воды поступает снизу вверх в полость емкости, постепенно вытесняя вверх и сжимая воздух. Таким образом каждому уровню воды в баке соответствует определенное значение величины давления сжатого воздуха в емкости. Система «резервуар с жидкостью – емкость с воздухом» находится в статическом равновесии. Сообщающиеся сосуды целесообразно выполнить изогнутыми, поскольку у вертикального столба жидкости даже при их относительно небольшой длине будет происходить утечка сжатого воздуха из полости емкости в определенный период колебаний.

При сейсмических воздействиях наличие системы сообщающихся сосудов позволяет существенно снизить величину гидродинамического давления воды на стенки бака, поскольку часть движущейся массы воды уходит в полость, вызывая при этом упругое сопротивление сжатого воздуха, явление эффекта демпфирования и в конечном итоге, поглощение энергии колебаний. Кроме того, при соответствующих условиях возможен режим динамического гашения колебаний. Но задача в такой

постановке требует более детальных исследований, экспериментов и расчетов. Устройство пневмозащиты обеспечивает высокую сейсмостойкость водонапорных башен без усложнения конструктивного решения створа. Также оно применимо для эксплуатируемых водонапорных башен.

Авторы идеи предложили расчетно-динамическую модель исходя из амплитудно-частотной характеристики разнорезонансной гидродинамического давления на стенку резервуара, снабженно пневмозащитой. В качестве механической модели была принята система, состоящая из двух масс m_1 и m_2 соединенных друг с другом пружиной с жесткостью C и показанная на рисунке 2. Известные параметры механической модели определялись из условия совпадения амплитудно-частотной характеристики, реакции R и гидродинамического давления на стенку резервуара.

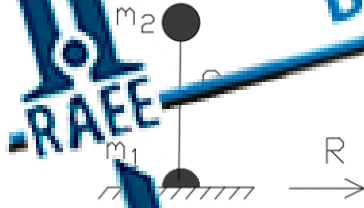


Рисунок 2 – Механическая модель системы с жидким наполнением при наличии наружной пневмозащиты, предложенной А.М. Уздиным, М.М. Пейчевым и др. [11]

Figure 2 – Mechanical model of a system with liquid filling in the presence of external pneumatic protection, proposed by A.M. Uzdin, M.M. Peychev et al. [11]

Идея пневмозащиты, предложенная в 1986 году [11], а также в дальнейшем защищенная авторским правом [13], не получила широкого применения на практике. Кроме того, С.А. Савиновым и другими авторами рассмотрен вариант устройства внутренней пневмозащиты непосредственно в резервуаре [12]. Идея данного конструктивного решения представлена на рисунке 3.

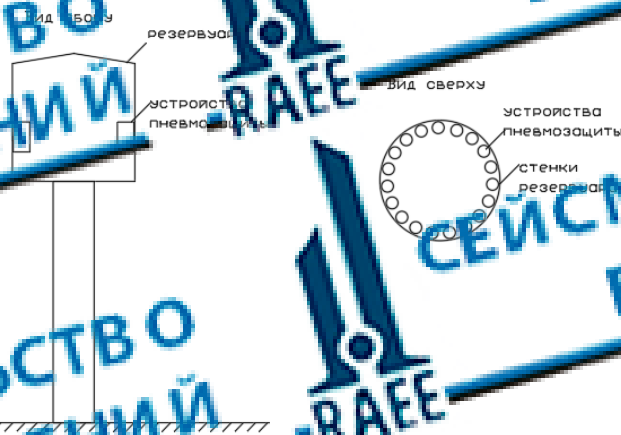


Рисунок 3 – Конструктивная схема внутренней пневмозащиты водонапорной башни

Figure 3 – Constructive scheme of internal pneumatic protection of the water tower

Конструктивно пневмозащита может быть реализована путем размещения в стенке резервуара открытых снизу (для свободного поступления жидкости) емкостей с воздухом. При землетрясении горизонтальное давление жидкости на стенки резервуара в месте контакта жидкости с воздухом существенно снижается. Вследствие этого

уменьшается как напряжение в стенке резервуара, так и сейсмическая реакция всего сооружения. При размещении емкости в резервуаре можно при малых затратах повысить сейсмостойкость как для вновь строящихся, так и для эксплуатируемых водонапорных башен.

Принцип действия внутренней пневмозащиты аналогичен внешней пневмозащите, представленной на рисунке 1, с тем отличием, что устройство пневмозащиты находится внутри резервуара и представляет собой не ТООР, а цилиндрические емкости, открытые снизу. Цилиндрические емкости могут быть прикреплены непосредственно к стенкам или передавать нагрузку на дно резервуара посредством дополнительного крепления, так же может быть крепление к крышке резервуара. При этом расположение и форма цилиндрических емкостей пневмозащиты должны обеспечивать сохранение сжатого воздуха в полости цилиндров при колебаниях системы с учетом возможно неполной наполняемости резервуара [9, 10, 11].

По сравнению с конструкцией внутренней пневмозащиты, предложенной С.А. Савиновым, А.М. Уздиним и другими авторами в 1986 году, данное конструктивное решение имеет ряд преимуществ. При внутреннем расположении пневмозащиты проще обеспечить герметичность емкости, особенно при устройстве пневмозащиты в уже эксплуатируемых водонапорных башнях. Кроме того, конструктивные элементы пневмозащиты не подвержены внешним воздействиям, в том числе экстремальным температурам. При устройстве внешней пневмозащиты встает вопрос дополнительного утепления сбегающего сосуда, а также ограничен выбор материалов, что ведет к дополнительным затратам. При расположении пневмозащиты внутри резервуара эти проблемы решаются, отдельного утепления устройств пневмозащиты не требуется. Главным недостатком такого решения является уменьшение полезного объема резервуара.

Выбор расчетно-динамической модели водонапорной башни с внутренней пневмозащитой

Задачей дальнейших исследований является расчет требуемого объема воздуха, находящегося в цилиндрических емкостях для пневмозащиты водонапорной башни с определенным объемом резервуара. Для этого необходимо задаться расчетно-динамической моделью и определить ее параметры.

Рассмотрим устройство пневмозащиты применительно к водонапорной башне с резервуаром объемом 50 м^3 . В качестве конструкции водонапорной башни возьмем типовую башню Рожновского. Объем резервуара 50 м^3 . Высота резервуара составляет $H = 4,2 \text{ м}$. Радиус резервуара $R = 1,51 \text{ м}$, высота ступени $h = 12 \text{ м}$.

Схема сооружения с геометрическими параметрами представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема сооружения водонапорной башни объемом 30 м^3 с внутренней пневмозащитой

Figure 4 – Diagram of the construction of a water tower with a volume of 30 m^3 with internal pneumatic protection

Для расчета сейсмостойкости водонапорной башни при наличии пневмозащиты расчетно-динамическая модель должна учитывать сооружение как систему ствол-резервуар-жидкость-пневмозащита. Расчетная схема представлена на рисунке 5.

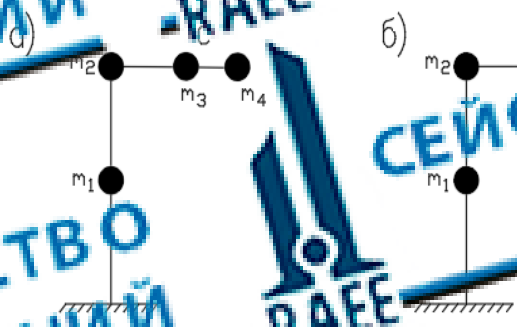


Рисунок 5 – Расчетно-динамическая модель водонапорной башни: а) без пневмозащиты, б) с пневмозащитой

Figure 5 – Calculation and dynamic model of a water tower: a) without air protection, b) with air protection

В m_1 входит вес ствола, в m_2 входит масса ствол-резервуара, а масса жидкости разделена на две части, присоединенную массу жидкости m_3 , жестко соединенную с массой резервуара, и приведенную массу жидкости m_4 , соединенную с массой резервуара упругой связью с жесткостью C . При отсутствии пневмозащиты связь C является абсолютно жесткой, то есть $C = \infty$. Определение параметров расчетной схемы, а именно масс m_3 и m_4 и жесткости связи C выполнено с учетом гидродинамических особенностей жидкости при колебаниях согласно методике, представленной в [9].

Для последующих расчетов были заданы исходные данные представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета объема и параметров пневмозащиты

Table 1 – Initial data for calculating the volume and parameters of air protection

Название	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Площадь строительной площадки			
Сейсмичность площадки	I	9	баллов
Категория грунта по сейсмическим свойствам		2	
Тип основания	нескальное		-
Тип грунта	суглинок		
Сейсмическая жесткость	V_s	1000	м/с
Скорость поперечных волн	V_p	500	м/с
Модуль деформации основания	E	3000	Па
Высота ствола башни	h	12	м
Радиус резервуара	R	1,1	м
Высота резервуара	H	4,2	м
Ускорение свободного падения	g	9,81	м/с ²
Плотность воды	ρ_0	1000	кг/м ³
Масса ствола	m_1	6000	кг
Масса конструкции резервуара	m_2	4000	кг

Расчет объемов и параметров пневмозащиты

Вычислим объем резервуара по следующей формуле (1):

$$V = \pi R^2 H, \quad (1)$$

В полости цилиндра пневмозащитной установки находится воздух объемом V_3 .

Расчет гидродинамического давления на стенке резервуара предложен в работе [11]. По предложенной методике получаем объем воздуха V_3 по формуле (2):

$$V_3 = V \frac{gT^2}{16\pi R} \left(1 - \frac{\rho_0 H_0}{\rho H} \right), \quad (2)$$

где $T = \frac{2\pi}{\omega_3}$ – парциальный период качания воды при наличии воздуха;

ρ_0 – плотность воды;

ρ – плотность жидкости в резервуаре (в данном случае $\rho = \rho_0$);

$H_0 = H + 10$, высота столба воды, обеспечивающего атмосферное давление, в метрах водяного столба (1 м.в.с. = 10^4 Па);

ω_3 – круговая частота собственных колебаний присоединенной массы m_3 , вычисляемая по формуле (3):

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{a^2 \mu_g}{V \rho \mu_g}}, \quad (3)$$

где a – диаметр пневмозащитных цилиндров;

P_a – абсолютное гидростатическое давление;

μ_g – коэффициент приведенной массы.

В полости цилиндра пневмозащитной установки находится сжатый воздух под давлением, равным абсолютному гидростатическому давлению P_a на уровне дна бака, определяемый по формуле (4):

$$P_a = H \cdot 10 \quad (4)$$

Коэффициент приведенной массы μ_g в соответствии с исследованиями М.М. Пейчева [11] может быть определен по формуле (5):

$$\mu_g = \frac{16}{\pi^3} \Sigma \quad (5)$$

где Σ определяется по формуле (6)

$$\Sigma = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left[\frac{(2k+1)\pi}{2}\right]}{(2k+1)^3} \quad (6)$$

где k – форма колебаний жидкости.

Зная частоту собственных колебаний ω_3 присоединенной массы m_3 , можно рассчитать жесткость пружины C , соединяющей присоединенную массу m_3 и приведенную массу m_4 . Для этого предварительно определим из формул (7–8) массы m_3 и m_4 :

$$m_4 = V\rho g \mu_g \quad (7)$$

$$m_3 = (V\rho g + m_2) - m_4 \quad (8)$$

Таким образом можно определить численное значение C из формулы (9):

$$C = \omega_3^2 m_4 \quad (9)$$

Результаты расчетов по описанным формулам сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов объемов пневмозащиты и параметров расчетной модели
 Table 2 – Results of calculations of air protection volumes and parameters of the calculation model

Название	Обозначен	Значение	Ед. изм.
Объем резервуара	V	30	м^3
Объем пневмозащиты	V_3	0,131	м^3
Число собственных колебаний присоединенной массы	ω_3	0,6	Герц
Абсолютное гидростатическое давление на уровне дна бака	P_a	14,2	Па
Коэффициент приведенной массы	μ_g	0,446	
Присоединенная масса	m_3	254	кН
Приведенная масса	m_4	130	кН
Жесткость пружины с пневмозащитой	C	1,793	Н/м
Жесткость пружины без пневмозащиты	C	∞	Н/м

Расчет водонапорной башни на сейсмическое воздействие при устройстве пневмозащиты

Для оценки эффективности сейсмозащиты был выполнен расчет водонапорной башни без пневмозащиты и с ее устройством. Для расчета на сейсмические воздействия было использовано программное обеспечение Solibri. Расчет в данном приложении ведется по модифицированной логно-спектральной методике, учитывающей демпфирование. При этом задается жесткость пружины C , соединяющей массу приведенной жидкости с массой резервуара. При расчетах на сейсмическое воздействие без пневмозащиты жесткость данной пружины принималась к бесконечности, при наличии пневмозащиты жесткость C имеет конечное значение, определяемое расчетом и представленное в таблице 2.

Для анализа изменения динамических характеристик системы при отсутствии и при наличии пневмозащиты результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики системы по формам колебаний при сейсмических воздействиях без пневмозащиты и при ее устройстве

Table 3 – Characteristics of the system according to the forms of vibrations during seismic impacts without pneumatic protection and when it is installed

№ формы	без пневмозащиты			с пневмозащитой		
	1	2	3	1	2	3
Период, с	1,131	0,087	0,038	1,739	1,095	0,083
Коэффициент неупругого сопротивления	0,075	0,05	0,051	0,242	0,083	0,066

Из таблицы видно, что при использовании пневмозащиты коэффициент неупругого сопротивления возрастает и происходит ощутимое увеличение периодов свободных колебаний системы. Для относительной оценки изменения параметров колебаний системы по каждой форме приведем таблицу 4, показывающую изменения в процентном соотношении.

Таблица 4 – Анализ изменений параметров колебаний системы с пневмозащитой по сравнению с системой без применения пневмозащиты

Table 4 – Analysis of changes in the vibration parameters of a system with pneumatic protection, compared with a system without the use of pneumatic protection

Показатель	Изменение параметров %		
	1 форма	2 форма	3 форма
Период	43↑	92↑	21↑
Коэффициент неупругого сопротивления	70↑	17↑	26↑

Формы колебаний системы в графическом виде показаны на рисунках 6 и 7.

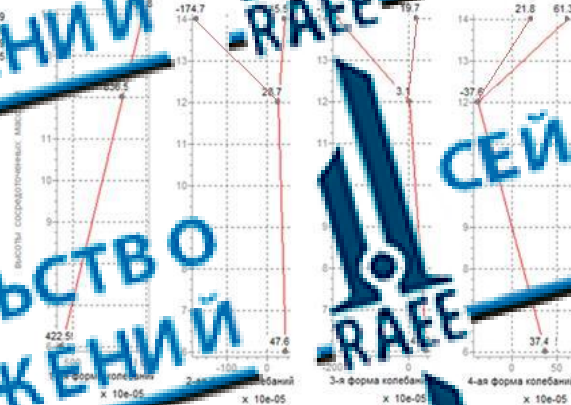


Рисунок 6 – Формы колебаний системы без пневмозащиты

Figure 6 – Waveforms of the system without pneumatic protection

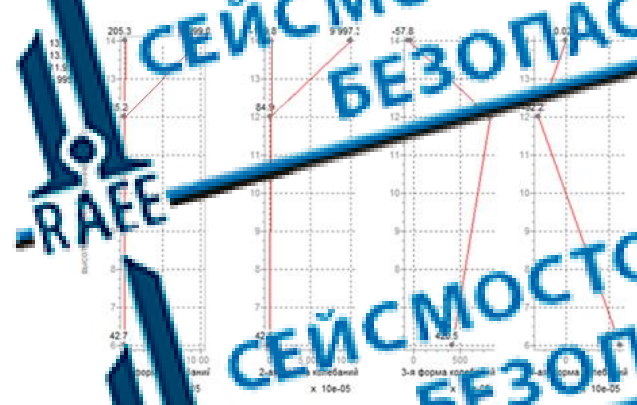


Рисунок 7 – Формы колебаний системы при устройстве пневмозащиты

Figure 7 – Vibration pattern of the system during the pneumatic protection device

Изменение основных динамических характеристик системы приводит к изменению усилий возникающих в сечениях элементов. По каждой из форм колебаний определены сейсмические силы и поперечные усилия в наиболее характерных сечениях, представленных на рисунке 4. Результирующие усилия с учетом всех форм колебаний в характерных сечениях приведены в таблице 5 и проиллюстрированы на рисунке 8.

Таблица 5 – Результаты расчетов усилий, возникающих при сейсмических воздействиях в системе без пневмозащиты и с ее устройством

Сечение	Отметка сечения	без пневмозащиты		пневмозащитой	
		Изгибающий момент, М (кН·м)	Поперечная сила Q (кН)	Изгибающий момент, М (кН·м)	Поперечная сила Q (кН)
1-1	0,001	1619	127	12645	1280
2-2	6,000	7208	127	5235	1280
3-3	12,0	838	127	316	866

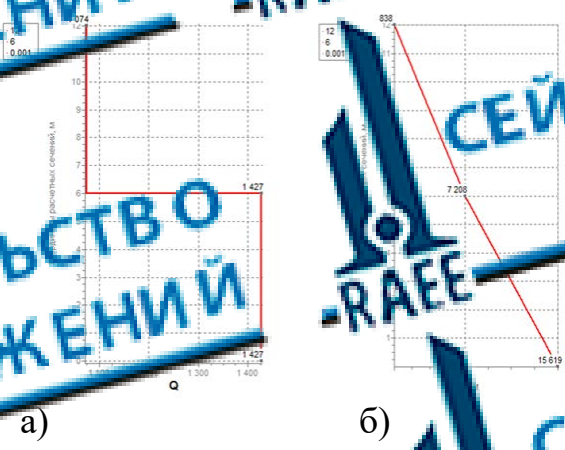


Рисунок 8 – Эпюры изгибающих моментов по высоте ствола. а – без пневмозащиты, б – при ее устройстве

Figure 8 – Diagrams of bending moments along the trunk height. а – without pneumatic protection; б – with its device

Относительная оценка изменений усилий в рассматриваемых сечениях системы приведена в таблице 6.

Таблица 6. Анализ изменений усилий, действующих на систему при сейсмических воздействиях

Table 6 – Analysis of changes in the forces acting on the system during seismic impacts

№ сечения	Отметка сечения	Изменение параметров, %	
		Изгибающий момент, М	Поперечная сила, Q
1-1	0,0	20↓	11↓
2-2	6,00	28↓	11↓
3-3	12,000	53↓	20↓

Взяв за значительным уменьшением значений усилий можно сделать вывод, что сейсмостойкость конструкции повышена благодаря применению пневмозащиты.

Выводы

Рассмотрена возможность обеспечения сейсмостойкости водонапорной башни путем применения внутренней пневмозащиты. Внутренняя пневмозащита позволяет не предусматривать дополнительное утепление пневмозащитных установок, так как они находятся внутри резервуара. Кроме того, такое решение облегчает эксплуатацию водонапорной башни, оснащенной пневмозащитой, так как она защищена от внешних воздействий.

Выполнен численный расчет объемов пневмозащиты и численных значений параметров расчетно-динамической модели конструкции водонапорной башни с внутренней пневмозащитой применительно к башне А.А. Рожновского.

Проведен сравнительный анализ особенностей водонапорной башни без пневмозащиты и при ее наличии. Определены динамические характеристики системы и усилия в створе башни при сейсмических воздействиях. Результаты показывают, что при наличии пневмозащиты изменяются динамические характеристики системы, что приводит к снижению сейсмических нагрузок и значительному уменьшению усилий в конструкции водонапорной башни.

Данное конструктивное решение пневмозащиты легко может быть реализовано в эксплуатируемых водонапорных башнях, как в башне А.А. Рожновского, рассмотренной в ходе исследования, так и в других конструкциях водонапорных башен.

Устройство пневмозащиты, предложенное в работе позволит обеспечить сейсмостойкость водонапорных башен в тех районах, где сейсмичность площадки строительства была повышена вследствие пересмотра карт общего сейсмического районирования.

Список литературы

1. Котов В.И. Индустриальные решения строительства водонапорных башен. *Промышленное строительство инженерных сооружений*, 1989. №4. С. 34–35.

2. Спивак Е.С. К вопросу о динамическом воздействии сейсмических волн на башенное сооружение. Расчет строительных конструкций. Киев, 1970. С 23–30.
3. Николаенко Н.А. Динамика и сейсмостойкость конструкций, несущих резервуары. М.: Стройиздат, 1962, 98 с.
4. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. 229 с.
5. Полюх В.С. Водонапорные башни. Проектирование. М.: Стройиздат, 1980. 351 с.
6. Нискин Э.А. Расчет стальных вертикальных резервуаров на сейсмические воздействия. М.: ВПИ Теплоэлектропроект, 1998, 189 с.
7. Савинов О.А., Уздин А.М. Назначение уровня расчетного воздействия при оценке сейсмостойкости крупных гидротехнических сооружений // Экспресс-информация ВНИИС. Серия 14. Сейсмостойкое строительство. 1980, Выпуск 2, 21–25, с. 25.
8. Савинов О.А., Шейнина С.И. К анализу сейсмозащитных свойств воздушной завесы. Известия ВНИИГ. 1984, 1. 140, с. 84–89.
9. Шейнина С.И. Эффективность воздушной завесы при воздействии переменного по времени давления на поверхность водоема // Изв. ВНИИ им. Б.Е. Веденеева. 1984. Т.100, с. 46–53.
10. Пейчев М.М. Перспективы строительства водонапорных башен в сейсмических районах // Проектирование и расчет строительных конструкций. Л. 1985. С. 45–51.
11. Уздин А.М., Пейчев М.М., Пейчева Ю.С. Расчет водонапорных башен на сейсмические воздействия // Строительство в особых условиях // Экспресс-информация ВНИИС. Серия 14, 1980, выпуск 2, с. 21–25.
12. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белкин Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учебное пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. 501 с.
13. Патент № 5699428 СССР: Водонапорная башня. заявл. 04.04.1986 опубл. 15.12.1987; бюл. № 46; Савинов О.А., Уздин А.М., Пейчев М.М., 2 л.: ил.

References

1. Kozlov V.I. Industrial solutions of trunks of water towers. *Industrial construction of engineering structures*. 1989, no. 4, pp. 34–35 [In Russian]
2. Spivak E.S. On the issue of the dynamic effect of seismic waves on a tower structure. *Calculation of building structures*. Kiev, 1970, pp. 23–30 [In Russian]
3. Nikolaenko N.A. Dynamics and seismic resistance of structures bearing tanks. M.: Gostroyizdat, 1962, 90, p. 88 [In Russian]
4. Eisenberg J.M. Structures with switching connections for seismic areas M.: Stroyizdat, 1976, 227 p. [In Russian]
5. Polyukh V.S. Water towers. Designing. / V.S. Polyukh. M.: Stroyizdat, 1980, 351 p. [In Russian]
6. Niskin E.A. Calculation of steel vertical tanks on seismic impacts. M.: VPI Teploelectroproekt, 1998, 189 p. [In Russian]
7. Savinov O.A., Uzdin A.M. Assignment of the level of calculated impact in the assessment of seismic resistance of large hydraulic structures. *Express-information VNIIS*. Series 14. Earthquake-resistant construction, 1980, Issue 2, pp. 21–25 [In Russian]

8. Savinov O.A., Sheinina S.I. On the analysis of the seismic properties of the air curtain. *Izvestiya VNIIG*, 1984, vol. 170, pp. 84–89 [In Russian]
9. Sheinina S.I. The effectiveness of an air curtain under the influence of time-varying pressure on the surface of a reservoir. *Izv. VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 1984, vol.170, pp. 46–13 [In Russian]
10. Peychev M.M. Proposals for the construction of water towers in seismic areas. *Design and calculation of building structures*. L., 1986, pp.45–51 [In Russian]
11. Uzdin A.M., Peychev M.M., Peycheva Yu.S. Calculation of water towers for seismic impacts. *Construction in special conditions. Experience, information of VNIIC*. Series 14, 1986, Issue 2, pp. 21–27 [In Russian]
12. Uzdin A.M., Elizarov N.V., Belash I.A. Earthquake-resistant structures of transport buildings and structures: textbook. M.: FSBEI "Educational and Methodological Center for Education in Railway transport". 2010. 101 p.
13. Patent No. 13599428 USSR: Water tower: application 04.04.1986 publ. 05.12.1987: bul. No. 40 Uzdin A.M., Peychev M.M., 2 l.: ill.

Информация об авторах

Сабирова Ойпошша Бахтияровна, магистр, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация sabirovaanna95@mail.ru

Суррошша В. Сабирова, магистр, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I St. Petersburg State Transport University (PGUPS). St. Petersburg, Russian Federation

Зенченко Диана Вениаминовна, к.т.н., доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация dvz2012@mail.ru

Diana V. Zenchenko, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of Department Building structures, buildings and structures Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS). St. Petersburg, Russian Federation