

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-55-70](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-55-70)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Выбор параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата в составе

**Бабский Александр Евгеньевич¹, Лалин Владимир Владимирович²,
Тарасов Владимир Александрович³**

¹ Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» – «Санкт-Петербургский проектный институт». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Сейсмоизоляция – эффективнейший способ достижения сейсмостойкости зданий и сооружений и находящегося в них оборудования. Энергетическим центром любой электростанции является её турбоагрегат – основное оборудование, отвечающее за выработку электроэнергии. Сейсмостойкость турбоагрегата обеспечивается в первую очередь выполнением критериев по сейсмостойкости со стороны фундамента турбоагрегата – специальной строительной конструкции, объединяющей части турбоагрегата в единую систему и служащей для восприятия статических и динамических нагрузок.

Достижение сейсмостойкости фундамента турбоагрегата электростанции путём применения разнообразных систем сейсмоизоляции является актуальным вопросом, рассмотренным в данной статье.

Динамические расчеты проводятся в программном комплексе Nastran методом прямого интегрирования уравнений движения с применением метода конечных элементов. Основными критериями сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата приняты величины максимальных сейсмических ускорений в осевом направлении на отметке установки турбоагрегата, а также величины максимальных сейсмических деформаций изоляторов виброизолированного фундамента.

В ходе исследования выполнены сейсмические расчёты фундамента турбоагрегата с различными параметрами двойной системы сейсмоизоляции турбоагрегата. Результаты позволили оценить влияние параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины на сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата.

Ключевые слова: виброизолированный фундамент турбоагрегата, спектры ответа, сейсмостойкость, землетрясение, сейсмоизоляция, динамика сооружений, сейсмический расчет

Для цитирования: Бабский А.Е., Лалин В.В., Тарасов В.А. Выбор параметров пружинно-демпферной изоляции здания турбины с виброизолированным фундаментом турбоагрегата в составе // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 55-70. DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-55-70](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-55-70)

@ А.Е. Бабский, В.В. Лалин, В.А. Тарасов, 2022

Seismic protection and seismic isolation of buildings and structures

Selection the parameters of spring-damper insulation of the turbine building with a vibration-isolated turbine foundation inside

Aleksandr E. Babsky¹, Vladimir V. Lalin², Vladimir A. Tarasov³

¹ JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch - St. Petersburg Design Institute.
Saint-Petersburg, Russian Federation

² Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Saint-Petersburg, Russian Federation

³ JSC Atomenergoproekt St. Petersburg Branch - St. Petersburg Design Institute.
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: Seismic isolation is the most effective way to achieve seismic resistance of buildings and structures, the equipment located inside. The energy center of any power plant is its turbine unit - the main equipment responsible for generating electricity. The seismic stability of the turbine unit is ensured primarily by the fulfillment of the seismic resistance criteria by the turbine unit foundation – a special building structure that combines the parts of the turbine unit into a single system and serves to take static and dynamic loads.

Achievement of seismic resistance of the turbine unit foundation of a power plant through the use of various seismic isolation systems is a topical issue discussed in this article.

Dynamic calculations were performed in Nastran software using time history analysis and the finite element method. The main criteria for the seismic resistance of a vibration-insulated turbine foundation are the values of the maximum seismic accelerations in the axial direction at the level of the turbine installation and the values of vibration-insulated foundation maximum seismic deformations of vibration isolators.

In the research, seismic calculations of the turbine unit foundation with various parameters of the double seismic isolation system of the turbine unit were performed. The results made it possible to evaluate the influence of the parameters of the turbine building spring-damper insulation on the seismic resistance of the vibration-insulated turbine unit foundation.

Keywords: vibration-insulated turbogenerator set foundation, response spectra, seismic stability, earthquake, seismic isolation, structural dynamics, seismic calculation

For citation: Babsky A.E., Lalin V.V., Tarasov V.A. Selection the parameters of spring-damper insulation of the turbine building with a vibration-isolated turbine foundation inside. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 55–70 (In Russian)

DOI [10.37153/2618-9283-2022-6-55-70](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-55-70)

ВВЕДЕНИЕ

Ряд проектов АЭС, проектируемых и возводимых ГК «Росатом», реализуются на площадках, характеризующихся высоким уровнем сейсмичности и значительными уровнями ПЗ и МРЗ.

По российским нормам [1] АЭС должна обеспечивать выработку электрической и тепловой энергии вплоть до уровня ПЗ включительно. Примерами проектов, на площадках которых уровень ПЗ больше 0,1, являются проекты: Пакш-2, Аккую, Руппур, Эль-Дабаа. Геология многих из указанных площадок представлена слабыми грунтами с модулем деформации 20 МПа и менее. На площадках могут присутствовать грунты, склонные к разжижению при сейсмике [2].

Существует два метода обоснования сейсмостойкости: опытный и расчётный. Турбоагрегаты массой от 100 до 10000 т практически невозможно испытать даже на уникальных стендах. Поэтому для виброизолированных фундаментов мощных турбоагрегатов возможно использование лишь расчётного метода обоснования их сейсмостойкости. В связи с этим, актуальной задачей является определение спектров сейсмических ускорений, а также сейсмических перемещений на отметке установки турбоагрегата, а также поиск конструктивных возможностей для их снижения.

В одной из предыдущих работ одного из авторов [3] подробно описаны наиболее распространённые типы сейсмоизоляторов. В работе [4] описаны методы обеспечения сейсмостойкости виброизолированных фундаментов турбоагрегатов (ФТА) при сохранении классического конструктивного решения здания турбины. В работе [5] авторами изложены результаты исследований влияния различных факторов на сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов. Рассмотрено влияние следующих факторов:

- уровень учитываемого демпфирования в грунтах основания;
- частотный состав сейсмического воздействия;
- соотношение вертикальных и горизонтальных жесткостей виброизоляторов фундамента турбоагрегата;
- проведение сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов отдельно и в составе здания турбины;
- проведение сейсмических расчётов виброизолированных фундаментов турбоагрегатов по линейно-спектральной теории и методом прямого интегрирования уравнений движения;
- учёт частотной зависимости динамических характеристик вязкого демпфера.

В работе [6] автором предложен новый вариант конструктивного решения – система двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата: постановка на сейсмоизоляторы всего здания турбины, содержащего в своём составе виброизолированный фундамент турбоагрегата. В работе выполнена серия вариантных расчётов здания турбины и сделан вывод о предпочтительности использования слайдерных опор в «нижнем» сейсмоизолирующем слое – под зданием турбины. Однако, автором работы были получены конструктивные замечания от специалистов фирмы ООО «ЦКТИ–Вибросейсм» – ведущих мировых специалистов в области сейсмостойкости и использования сейсмоизоляции [7–10], в связи с чем автор внес принципиальные изменения в свою работу.

Данная работа посвящена подбору оптимальной системы двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата. Учитывая, в первую очередь, тот факт, что при изоляции конструкции слайдерными опорами, изоляции в вертикальном направлении не происходит (в связи с высокой вертикальной жёсткостью слайдерных опор), а также принимая во внимание сложность адекватного учёта локальных эффектов, связанных с возможными ударами в слайдерных опорах при сильных вертикальных сейсмических толчках, автор работы решил отказаться от использования слайдерных опор в системе двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата, однако, основная идея – двойная сейсмоизоляция, сохранена.

Принципиальная схема двойной системы сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата представлена на рисунке 1. Турбоагрегат, соединённый с конденсаторами, устанавливается на виброизолированный фундамент. Конденсаторы снизу устанавливаются на пружинные опоры. Здание турбины также устанавливается на слой сейсмоизоляторов.

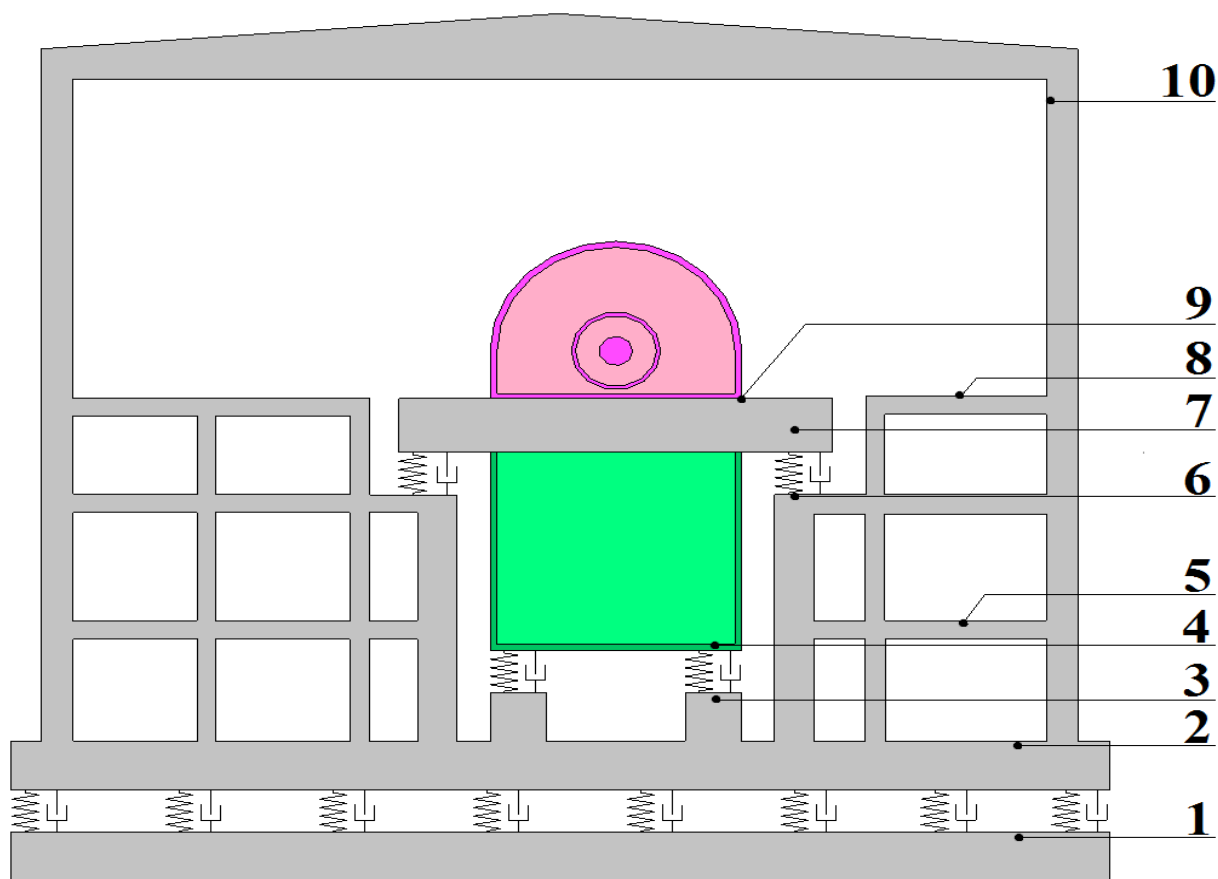


Рисунок 1 – Двойная система сейсмоизоляции фундаментом турбоагрегата

Figure 1 – Double seismic insulation system of turbine unit foundation

Для проведения вычислительных экспериментов использовалась конечно-элементная модель виброизолированного фундамента турбоагрегата в составе здания турбины со следующими параметрами:

- быстроходный турбоагрегат К-1200, мощностью 1200 МВт, 3000 об/мин, производитель АО «Силовые машины» («ЛМЗ»+«Электросила»);
- общая масса виброизолированного фундамента турбоагрегата с оборудованием составляет 8300 т;
- здание турбины имеет размеры в плане 124 x 73 м, массу 155000 т. Бетон строительных конструкций класса В25.

Динамические расчеты были проведены в программном комплексе Nastran [7] методом прямого интегрирования уравнений движения. Вязкие демпферы моделировались с учётом частотных зависимостей их динамических характеристик по методике, подробно указанной в работе [8].

В качестве граничных условий использовался набор пружин и демпферов, соответствующий динамическим характеристикам грунтов основания, определенным по ASCE 4-16 [11] с учётом ограничений демпфирования $\xi_z=0.35$, $\xi_{xy}=0.15$, $\xi_\phi=0.15$. Грунт слабой сжимаемости с модулем сдвига $G = 6400$ МПа, коэффициентом поперечной деформации $\mu = 0,27$ и плотностью $\rho = 2200$ кг/м³.

В качестве исходного сейсмического воздействия принят реальный площадочный спектр одного из районов Передней Азии с максимальным сейсмическим ускорением в горизонтальном направлении 0,25g. Спектры исходного сейсмического воздействия в

горизонтальном и вертикальном направлениях представлены на рисунке 2. Расчёты проводились на комплекты трёхкомпонентных акселерограмм, синтезированных из вышеупомянутых спектров.

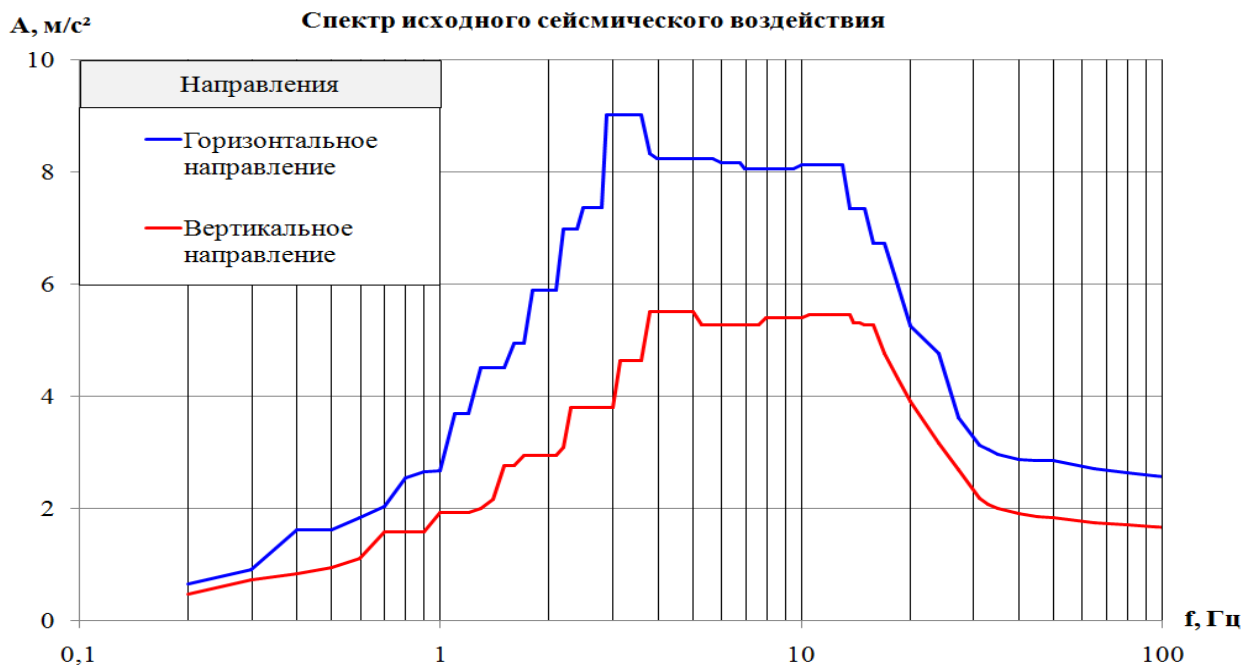


Рисунок 2 – Спектр исходного сейсмического воздействия

Figure 2 – Spectrum of initial seismic action

В работе рассмотрено 5 вариантов двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата: первые три варианта – это установка здания турбины на пружинные сейсмоизоляторы с различным соотношением вертикальной и горизонтальной жесткостей, но с одинаковой несущей способностью с добавлением сосредоточенных вязких демпферов: первый вариант Т9 – здание турбины изолировано «жесткими» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 1, второй вариант Т10 – здание турбины изолировано «средними» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 3, третий вариант Т11 – здание турбины изолировано «мягкими» пружинами с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 6. Во всех трех вариантах добавлено такое количество демпферов, чтобы значение относительного затухания в горизонтальных направлениях составляло 15%.

В четвертом и пятом вариантах здание турбины изолировано «сверхмягкими» в горизонтальном направлении специальными пружинными блоками с соотношением горизонтальной и вертикальной жесткостей 1 к 11, данные изоляторы условно обозначены Т12. Это позволяет резко снизить частоты низших форм колебаний изолированной конструкции здания турбины в горизонтальных направлениях до 0,8 Гц. Отличие четвертого и пятого вариантов в изоляции фундамента турбоагрегата: в четвертом варианте фундамент турбоагрегата изолирован, как и в первых трех вариантах, «мягкими» изоляторами Т11, в пятом варианте фундамент турбоагрегата изолирован «средними» изоляторами Т10.

Помимо вышеперечисленных вариантов к сравнению добавлены результаты расчетов здания турбины без сейсмоизоляции – в классическом конструктивном решении, вариант «Без СИ».

Для моделирования сейсмоизоляторов в расчетных моделях использованы жесткостные характеристики существующих сейсмоизоляторов немецкой фирмы «ГЕРБ» [12] для пружинных изоляторов и сосредоточенных вязких демпферов.

Типы сейсмоизоляторов, их количество и характеристики представлены в таблице 1 [12]. В таблице 1 * обозначает, что вязкие демпферы моделируются с учетом частотной зависимости жесткостей и демпфирования по методике, представленной в работе [8].

Таблица 1 – Варианты сейсмоизоляции здания турбины

Table 1 – Turbine building seismic isolation variants

Обозначение варианта	Название ВИ	Несущая способность, т	$K_{гор}/K_{верт}$, кН	Количество, шт
Т9	Пружинный изолятор тип 1	460	178000/ 286000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	*	500
Т10	Пружинный изолятор тип 2	460	64000/ 190000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	*	300
Т11	Пружинный изолятор тип 3	460	27000/ 143000	417
	Вязкоупругий демпфер	-	*	200
Т12Т– 11	Пружинный изолятор тип 4	385	9000/ 96000	405
	Вязкоупругий демпфер	-	*	200
	фундамент турбоагрегата изолирован «мягкими» пружинами Т11 с соотношением горизонтальной и вертикальной жёсткостей 1 к 6			
Т12– Т10	Пружинный изолятор тип 4	385	9000/ 96000	405
	Вязкоупругий демпфер	-	*	200
	фундамент турбоагрегата изолирован «средними» пружинами Т10 с соотношением горизонтальной и вертикальной жёсткостей 1 к 3			

Исходя из требований производителя пружинных опор типов Т9, Т10 и Т11 для их надежной работы во время и после прохождения землетрясения требуется запас по вертикальной несущей способности не менее 20%.

Для специальной серии пружинных блоков (пружинный изолятор, тип 4), разработанной для использования в системах сейсмоизоляции зданий и сооружений,

дополнительный запас по вертикальной несущей способности не требуется. В спецификациях данных пружинных блоков указываются 2 значения несущей способности: при нормальных условиях эксплуатации – базовое значение и при максимальных сейсмических нагрузках – повышенное значение.

Во всех вариантах систем сейсмоизоляции здания турбины изоляторы расставлены таким образом, чтобы центр жесткости поля изоляторов совпадал с центром тяжести здания турбины. Это позволяет исключить крутильные формы колебаний из первых основных форм колебаний здания. Также изоляторы расставлены так, чтобы величины вертикальных деформаций пружинных элементов от постоянных нагрузок по значению были близки между собой.

Схематично поперечный разрез виброизолированного ФТА в составе сейсмоизолированного здания турбины представлен на рисунке 1. На нем пронумерованы уровни вычисления спектров сейсмических ускорений:

- 1 – Уровень нижней дополнительной фундаментной плиты;
- 2 – Уровень нижней плиты здания турбины;
- 3 – Отметка установки изоляторов под конденсаторами;
- 4 – Отметка установки конденсаторов;
- 5 – Уровень промежуточного перекрытия;
- 6 – Отметка установки виброизоляторов (ВИ) под ФТА (верхняя поверхность подпорных конструкций);
- 7 – Уровень ФТА;
- 8 – Отметка обслуживания;
- 9 – Отметка расположения оборудования;
- 10 – Отметка установки мостового крана большой грузоподъемности.

Уровни 4 и 9 представляют интерес с точки зрения прочности оборудования, уровни 1–2, 3–4 и 6–7 характеризуют изменения сейсмических ускорений при прохождении через сейсмоизолирующие слои, остальные уровни были включены в расчет для полноты исследования сейсмического поведения всего здания турбины в целом.

Сейсмические перемещения определялись как взаимные смещения узлов над и под изоляторами (деформации изоляторов), а также как взаимные смещения нескольких пар точек, расположенных на фундаменте турбоагрегата и отметке обслуживания соответственно.

Далее представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов. На рисунках 3 и 4 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «жестких» изоляторах Т9; на рисунках 5 и 6 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «средних» изоляторах Т10; на рисунках 7 и 8 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «мягких» изоляторах Т11; на рисунках 9 и 10 представлены две основные формы колебаний здания турбины в горизонтальном направлении, установленного на «сверхмягкими» изоляторах Т12.

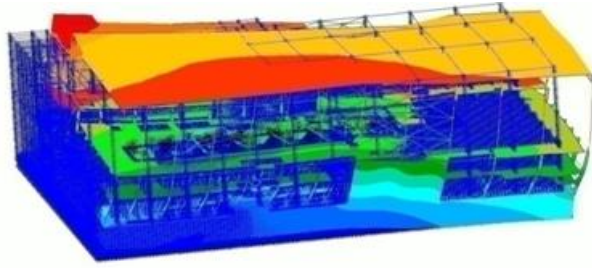


Рисунок 3 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T9, частота 2,78 Гц

Figure 3 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T9, frequency 2.78 Hz

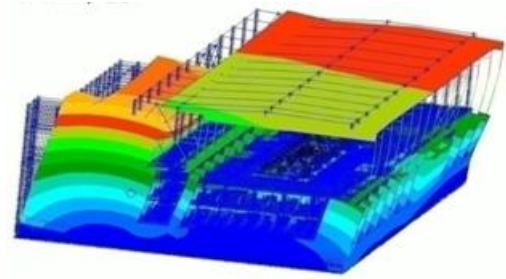


Рисунок 4 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T9, частота 2,02 Гц

Figure 4 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T9, frequency 2.02 Hz

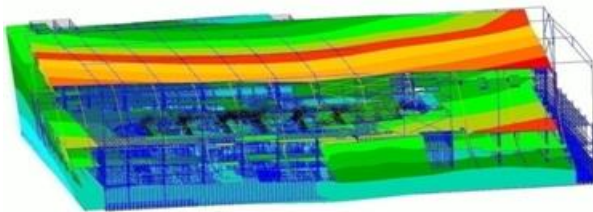


Рисунок 5 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T10, частота 2,04 Гц

Figure 5 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T10, frequency 2.04 Hz

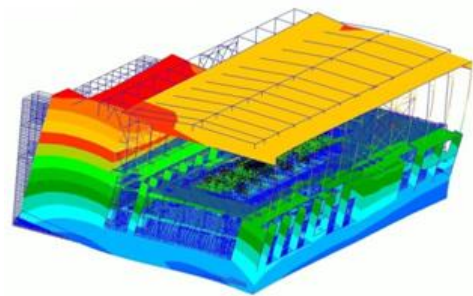


Рисунок 6 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T10, частота 1,71 Гц

Figure 6 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T10, frequency 1.71 Hz

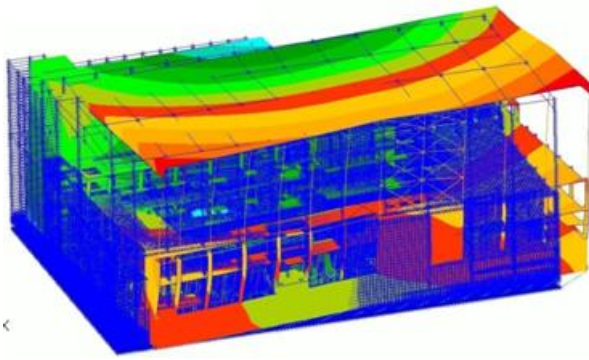


Рисунок 7 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T11, частота 1,58 Гц

Figure 7 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T11, frequency 1.58 Hz

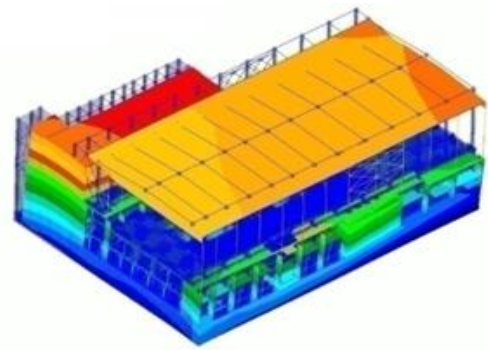


Рисунок 8 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T11, частота 1,09 Гц

Figure 8 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T11, frequency 1.09 Hz

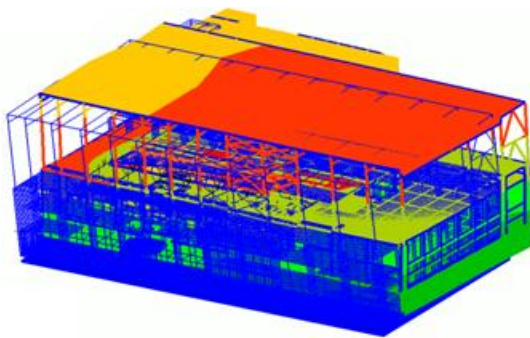


Рисунок 9 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «X», изоляторы T12, частота 0,74 Гц

Figure 9 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "X" direction, insulators T12, frequency 0.74 Hz

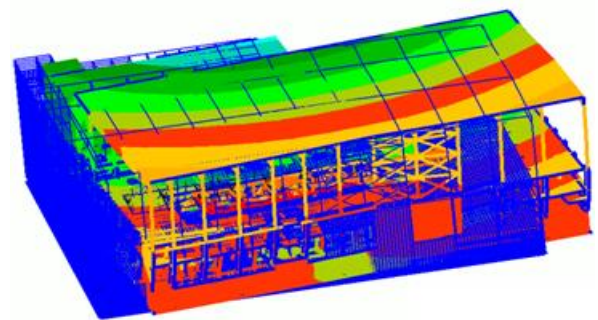


Рисунок 10 — Основная форма колебаний сейсмоизолированного здания турбины в направлении оси «Y», изоляторы T12, частота 0,76 Гц

Figure 10 — Main natural frequencies of the seismic isolated turbine building in the "Y" direction, insulators T12, frequency 0.76 Hz

При проведении вычислительных экспериментов вязкие демпферы учитывались как частотно-зависимые, таким образом, в моделях с демпферами суммарные жесткости сейсмоизолирующего слоя, а, следовательно, и частоты основных форм колебаний здания турбины еще выше, чем при изоляции только пружинными элементами.

Использование «жестких» пружинных изоляторов T9 позволяет увести основные колебания здания турбины в диапазон более высоких частот, чем частоты основных форм колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата. Данный факт положителен с точки зрения ухода от совпадения резонансов, но отрицателен с точки зрения попадания в пик спектра. Использование «сверхмягких» изоляторов T12 позволяет увести основные

колебания здания турбины в диапазон более низких частот, чем частоты основных форм колебаний виброизолированного фундамента турбоагрегата. Чтобы проиллюстрировать вышесказанное, на рисунке 11 представлен спектр сейсмического воздействия в осевом направлении с наложенными на него собственными частотами изолированного здания турбины с различными вариантами сейсмоизоляции.

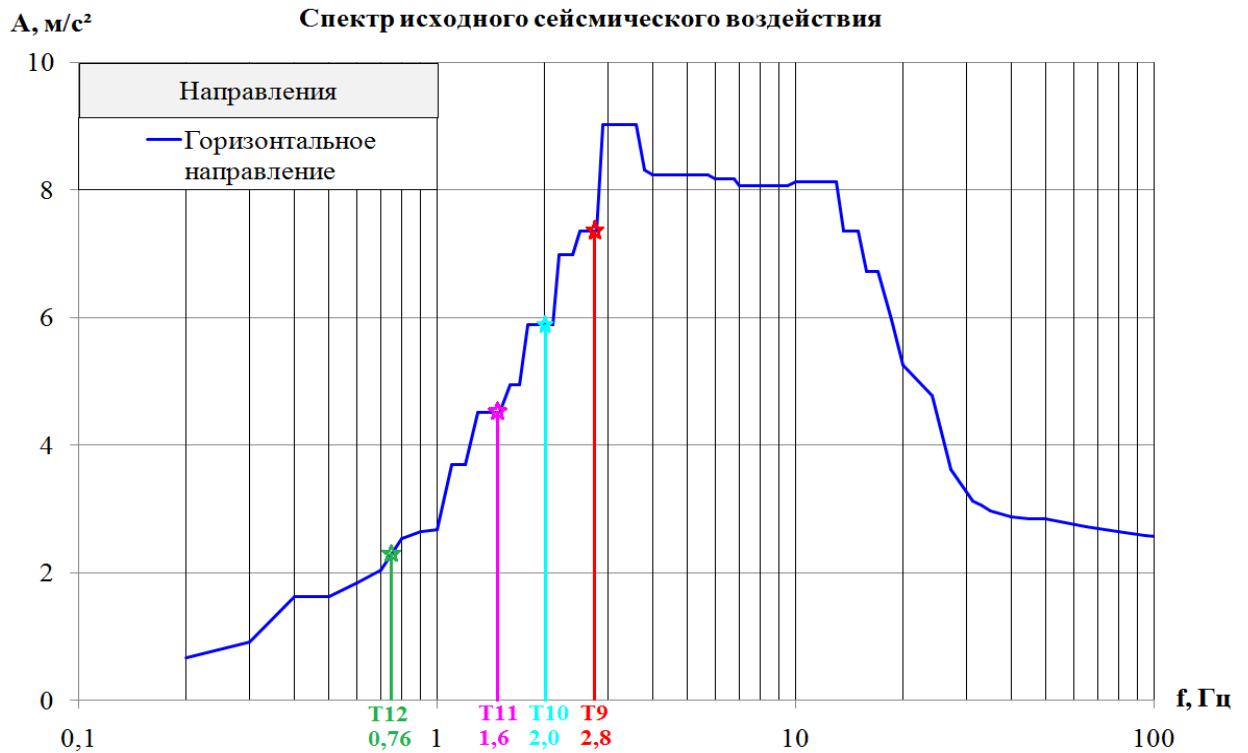


Рисунок 11 — Спектр сейсмического воздействия в осевом направлении с наложенными на него собственными частотами различных вариантов

Figure 11 – Seismic accelerations spectrum in the axial direction with natural frequencies of different variants of double seismic insulation system of turbine unit foundation

Результаты расчетов спектров сейсмических ускорений в осевом направлении для отметки установки турбоагрегата представлены на рисунке 12, для всех рассматриваемых отметок в таблице 2, нумерация уровней в таблице соответствует нумерации на рисунке 1. Результаты вычисления максимальных сейсмических смещений представлены в таблице 3.

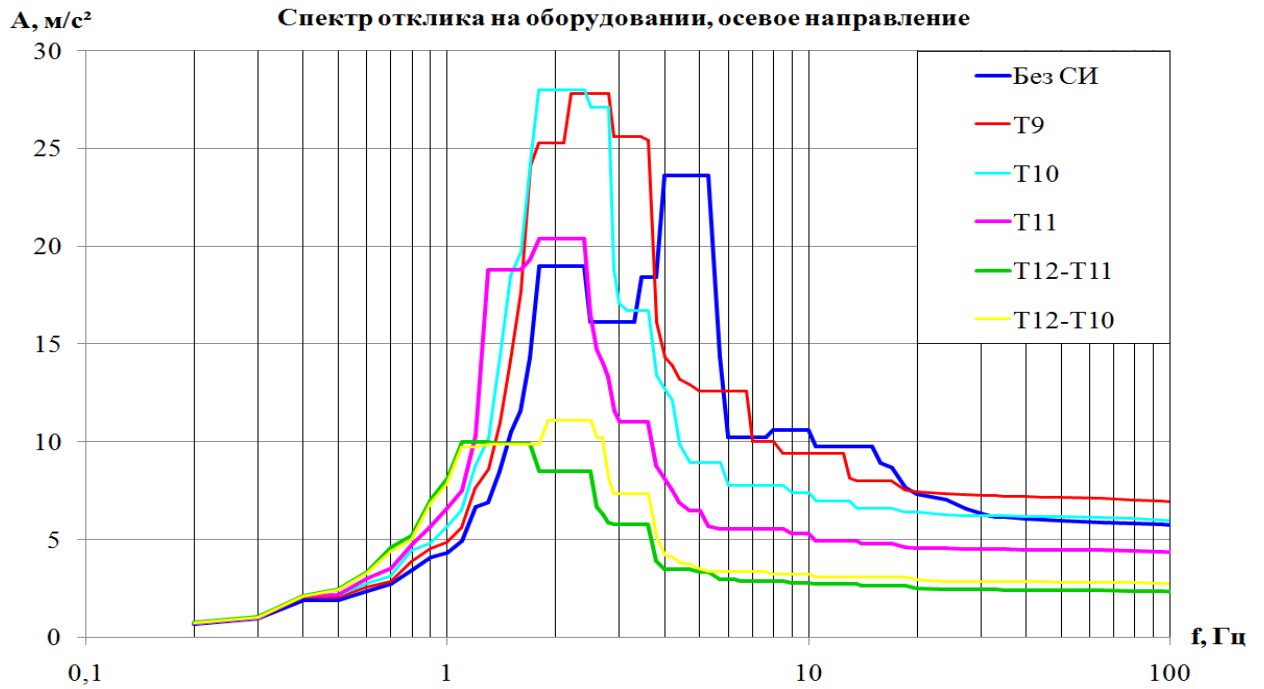


Рисунок 12 – Спектры отклика сейсмических ускорений на оборудовании в осевом направлении

Figure 12 – Seismic accelerations response spectrum at the equipment level, in the axial direction

Таблица 2 – УНП в осевом направлении, в м/с²

Table 2 – ZPA in the axial direction, m/s²

Отметка	Без СИ	T9	T10	T11	T12-T11	T12-T10
1 (нижняя доп. фонд. плита)	-	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
2 (нижняя плита здания)	3,1	4,0	2,8	2,3	1,5	1,5
3 (под ВИ конд.)	7,0	4,3	3,2	2,7	1,7	1,7
4 (на конд.)	5,7	6,3	3,9	3,2	1,8	1,8
5 (перекрытие промежуточное)	13,8	7,1	4,3	2,8	1,8	1,8
6 (под ВИ ФТА)	13,9	7,7	5,2	3,8	2,0	2,0
7 (ФТА)	5,4	6,6	5,6	3,9	2,4	2,7
8 (отметка обслуживания)	16,6	9,1	6,0	3,8	2,0	2,0
9 (на оборудовании)	5,7	6,9	6,0	4,3	2,4	2,7
10 (верх колонн)	18,2	11,2	7,6	5,0	2,3	2,3

Из анализа графиков на рисунке 12 и таблицы 2 ясно, что снижение величин пиковых осевых сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата достигается лишь при сейсмоизоляции здания турбины «сверхмягкими» в горизонтальном направлении пружинными блоками (условно обозначены T12): УНП спектра снижается до 0,24–0,27g, т.е. более чем в 2 раза по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции (Без СИ), максимальные спектральные ускорения снижаются более чем в 2 раза.

В то же время, использование систем сейсмоизоляции, приводящих к близости частот изолированного здания турбины и фундамента турбоагрегата, приводит к резкому возрастанию амплитуд колебаний в системе «основание – здание турбины – виброизолированный фундамент турбоагрегата»: УНП спектра возрастает до 0,7g, т.е. в 1,2 раза по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции, максимальные спектральные ускорения возрастают в 2 раза. Таким образом, неграмотно подобранная система сейсмоизоляции здания турбины может сильно испортить конструкцию и снизить сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата.

Более того, из анализа таблицы 2 видно, что сейсмоизоляция здания турбины резко снижает пиковые сейсмические ускорения и максимальные спектральные ускорения на

всех отметках здания турбины, что положительно сказывается на прочем (помимо турбоагрегата) оборудовании и строительных конструкциях.

Таблица 3 — Максимальные сейсмические перемещения в мм

Table 3 – Maximum seismic displacements in mm

Пара узлов	Направление	Без СИ	T9	T10	T11	T12-T11	T12-T10
ВИ под зданием турбины	Горизонтальное	-	7,0	12,2	22,3	35,7	36,6
	Вертикальное	-	22,8	30,5	25,5	12,2	12,3
ВИ под конденсатором	Горизонтальное	8,8	11,8	11,8	9,3	8,0	7,2
ВИ под ФТА	Горизонтальное	43,7	52,1	49,6	33,8	23,4	16,9
ФТА-отметка обслуживания	Горизонтальное	53,5	59,1	46,2	29,8	22,6	15,0

Из анализа таблицы 3 можно заключить, что использование «сверхмягких» в горизонтальном направлении пружинных блоков T12 в качестве изоляции здания турбины позволяет снизить максимальные сейсмические перемещения под конденсаторами до 7–8 мм и под ФТА до 17–24 мм, что в 1,5–2,5 раза ниже, по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции. Также снижаются значения относительных сближений фундамента турбоагрегата и отметки обслуживания с 54 до 23 мм.

Одновременно с этим, использование систем сейсмоизоляции, приводящих к близости частот изолированного здания турбины и фундамента турбоагрегата, и как следствие, к резкому возрастанию амплитуд колебаний в системе «основание – здание турбины – виброизолированный фундамент турбоагрегата», приводит к росту максимальных сейсмических перемещений в 1,5 раза и более по сравнению с классическим конструктивным решением здания турбины без системы сейсмоизоляции.

При установке здания турбины на изоляторы возникает еще один выходной параметр, который косвенно влияет на сейсмостойкость виброизолированного фундамента турбоагрегата, а именно максимальные сейсмические перемещения здания турбины относительно земли (деформации нижних изоляторов). Здание турбины (машинный зал) обязательно имеет технологические связи с другими зданиями и сооружениями электростанции. Так, на всех типах электростанций генератор турбоагрегата связан силовыми кабелями с трансформаторами и зданием распределительных устройств. В проектах атомных электростанций здание турбины связано со зданием реактора трубопроводами острого пара, питающего турбину. Таким образом, необходимо сохранить целостность и работоспособность всех систем здания турбины, отвечающих за выработку электроэнергии. Очевидно, что для этого необходимо по возможности снизить максимальные сейсмические перемещения здания турбины относительно земли и остальных зданий и сооружений электростанции.

Учитывая, что по параметрам максимальных сейсмических ускорений на отметке установки турбоагрегата, а также по значениям максимальных сейсмических перемещений под фундаментом турбоагрегата возможны для использования только два

варианта из предложенных: те, где здание турбины изолировано «сверхмягкими» в горизонтальном направлении пружинными блоками (Т12). Максимальное горизонтальное смещение здания турбины составляет 37 мм. Производитель изоляторов ограничивает максимальные горизонтальные смещения величиной 100 мм. Максимальные вертикальные сейсмические деформации в изоляторах под зданием турбины составляют 13 мм, что не превосходит средней осадки пружин под зданием турбины от постоянных нагрузок при нормальных условиях эксплуатации (45 мм). Таким образом, при сейсмических колебаниях в нижнем слое сейсмоизоляторов не возникает растягивающих напряжений, а амплитудное значение сжатия не приводит к полному смыканию пружин изоляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный новый вариант двойной сейсмоизоляции фундамента турбоагрегата может быть использован на перспективных проектах в самом начале проектных работ. Данный вариант позволит возводить сейсмостойкий виброизолированный фундамент турбоагрегата и здание турбины в районах с особо высокой сейсмичностью, где ранее возведение сейсмостойкой электростанции не представлялось возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, 2001.
2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. 2018.
3. Тарасов В.А., и др. Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №4 (43). С. 117 – 140.
4. Тарасов В.А. Обеспечение сейсмостойкости виброизолированного фундамента турбоагрегата // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 44 – 47.
5. Бабский А.Е., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С. 36 – 49. DOI: 10.37153/2618-9283-2021-5-36-49
6. Tarasov V.A. Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020, Vol.91, Article No. 9101. doi: 10.18720/CUBS.91.1
7. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide, Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.
8. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping. *Proc. of 10th ECEE*, 1994, Vienna, Austria.
9. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures. *Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2017, Auckland, NZ.
10. Nawrotzki P., Kostarev V., Siepe D., Barutzki F., Salcedo V. (2022). 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification, SMIRT-26
11. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.
12. GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG URL: <https://www.gerb.com> (дата обращения: 18.12.2022).

REFERENCES

1. NP-031-01 Normy proektirovaniya sejsmostojkih atomnyh stancij, 2001. (In Russian)
2. SP 14.13330.2018 Seismic building design code, 2018. (In Russian)
3. Tarasov V.A., and etc. Sistemy seysmoizolyatsii [Seismic isolation systems]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2016, No.43(4), pp. 117– 140. (In Russian)
4. Tarasov V. Ensuring seismic stability of the vibration-insulated foundation of the turbine unit. *Natural and Technological Risks. Building Safety*. 2020; 1: 44– 47. (In Russian)
5. Babsky A.E., Tarasov V.A. Seismic stability of vibration-insulated turbine foundations. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 36 – 49. (In Russian) DOI: 10.37153/2618-9283-2021-5-36-49 (In Russian)
6. Tarasov V.A. Double Seismic Insulation System of Turbine Unit Foundation; 2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*. Vol. 91, Article No. 9101. doi: 10.18720/CUBS.91.1
7. MSC/NASTRAN. Linear Static/Dynamic Analysis, User Guide ,Version 70, the Mac Neal Schwendler Corporation, Los Angeles, California, 1998.
8. Kostarev V., Berkovski A., et. al. Application of mathematical model for high viscous damper to dynamic analysis of NPP piping. *Proc. of 10th ECEE*, 1994, Vienna, Austria.
9. Kostarev V.V., Vasilyev P.S., Nawrotzki P., A new approach in seismic base isolation and dynamic control of structures. *Transactions of the NZSEE Annual Technical Conference and 15th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 2017, Auckland, NZ.
10. Nawrotzki P., Kostarev V., Siepe D., Barutzki F., Salcedo V. (2022). 3D Seismic Isolation Systems for the Nuclear Industry Layout, Design & Qualification, SMIRT-26
11. ASCE 4-16 Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, 2016.
12. GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG URL: <https://www.gerb.com> (date of the application: 18.12.2022).

Данные об авторах / Information about authors

Бабский Александр Евгеньевич, главный специалист по динамике сооружений, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» - «Санкт-Петербургский проектный институт»; eLIBRARYSPIN-код: 9620-8675, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

Aleksandr E. Babsky, Chief Specialist in the dynamics of structures, construction department – turbine island, St. Petersburg branch of JSC Atomenergoprojekt - St. Petersburg design institute; eLIBRARYSPIN-code: 9620-8675, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-8297-1630>

Лалин Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; eLIBRARYSPIN-код: 8220-6921, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

Vladimir V. Lalin, doctor of technical sciences, professor of the Higher school of industrial, civil and road construction, Institute of civil engineering, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university; eLIBRARYSPIN-code: 8220-6921, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0003-3850-424X>

Тарасов Владимир Александрович, инженер-проектировщик, строительный отдел – турбинный остров, Санкт-Петербургский филиал АО «Атомэнергопроект» - «Санкт-Петербургский проектный институт»; ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; eLIBRARYSPIN-код: 9264-3744, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>

Vladimir A. Tarasov, design engineer, construction department – turbine island, St. Petersburg branch of JSC Atomenergoproekt - St. Petersburg design institute; assistant of the Higher school of industrial, civil and road construction, Institute of civil engineering; St. Petersburg polytechnic university of Peter the Great; eLIBRARYSPIN-код: 9264-3744, ORCIDiD: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8370>