НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER УДК 621.311:624.1 DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.45-65

Фундамент турбоагрегата теплоэлектростанции на стройплощадке из тиксотропных грунтов

Надежда Сергеевна Никитина¹, Анастасия Евгеньевна Безгрибельная^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Институт Теплоэлектропроект; г. Москва, Россия

аннотация

Введение. Теплоэлектростанции (ТЭС) в РФ являются ведущими энергогенерирующими комплексами по сравнению с другими комплексами энергетической промышленности и в силу своей независимости от местоположения источника энергии часто располагаются на площадках, характеризуемых грунтами с неудовлетворительными свойствами. Рассматривается соответствующий пример из практики строительства в Санкт-Петербурге на стройплощадке с тиксотропными грунтами.

Материалы и методы. Строительство и работа объектов на площадках с тиксотропными грунтами привлекает внимание исследователей и практиков своей зависимостью от воздействия статических и динамических нагрузок. Предложены разные методы устройства фундаментов (свайные, плитные и др.). Рассмотрена в качестве альтернативы конструкция свайного фундамента для дополнительного турбоагрегата теплоэлектростанции в Санкт-Петербурге, включающая две плиты с виброизоляторами.

Результаты. Проведенные исследования показали, что наличие виброизоляторов предоставляет возможность регулировать высотное положение системы «турбоагрегат – фундамент», а также практически полностью исключает передачу вибраций на грунтовое (свайное) основание и прилегающие строительные конструкции, включая существующие здания. Выполненное геотехническое моделирование (модель «агрегат – опорная плита – свайное основание» (динамический расчет опорной плиты и статический расчет свайного основания) и модель «агрегат – свайное основание» (динамический и статический расчеты свайного основания)) с помощью программного комплекса PLAXIS 3D показали, что на нижнюю плиту конструкции и на оголовки свай уровень вибрации многократно (в 40 раз) меньше уровня 2 мм/с, при котором требуется учитывать снижение несущей способности основания как фундамента, так и соседних к нему.

Выводы. Несмотря на преимущества альтернативного варианта по стоимости и объемам, риски, сопутствующие альтернативной конструкции, побуждают отдать предпочтение варианту конструкции, принятому в проектной документации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: виброизолятор, динамическая нагрузка, плитно-свайный фундамент, свайный фундамент, теплоэлектростанция, статическая нагрузка, тиксотропный грунт, фундамент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Никитина Н.С., Безерибельная А.Е.* Фундамент турбоагрегата теплоэлектростанции на стройплощадке из тиксотропных грунтов // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 2. С. 45–65. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.45-65

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Евгеньевна Безгрибельная, bezgribelnaya@bk.ru.

Foundation of the turbine unit of a thermal power plant on a construction site made of thixotropic soils

Nadezhda S. Nikitina¹, Anastasia E. Bezgribelnaya^{1,2}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation; ² Teploelektroproekt Institute; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Thermal power plants in Russia are the leading power generating complexes in comparison with other complexes of energy industry and due to their independence from the location of the energy source, they are often located on sites characterized by soils with unsatisfactory properties. A relevant example from the practice of construction in St. Petersburg on a construction site with thixotropic soils is considered.

Materials and methods. Construction and operation of objects on sites with thixotropic soils attracts the attention of researchers and practitioners by their dependence on the impact of static and dynamic loads. Different methods of foundation construction (pile, slab, etc.) were proposed. The pile foundation design for an additional turbine unit of a thermal power plant in St. Petersburg, including two slabs with vibration isolators, is considered as an alternative. **Results.** The conducted research has shown that the presence of vibration isolators provides an opportunity to regulate the height position of the system "turbine unit – foundation", as well as almost completely eliminates the transmission of vibrations to the ground (pile) foundation and adjacent building structures, including existing buildings. The performed geotechnical modelling (model "unit – baseplate – pile foundation" (dynamic calculation of the baseplate and static calculation of the pile foundation) and model "unit – pile foundation" (dynamic and static calculations of the pile foundation)) with the help of Plaxis 3D software package showed that the vibration level on the bottom plate of the structure and on the pile heads is many times (40 times) less than the level of 2 mm/s, at which it is necessary to take into account the reduction of the bearing capacity of the base of both the foundation itself and the adjacent ones.

Conclusions. Despite the advantages of the alternative variant in terms of cost and volume, the risks associated with the alternative design induce to favour the design variant adopted in the design documentation.

KEYWORDS: dynamic load, foundation, pile foundation, slab-and-pile foundation, thermal power plant, static load, thixotropic soil, vibration isolator

FOR CITATION: Nikitina N.S., Bezgribelnaya A.E. Foundation of the turbine unit of a thermal power plant on a construction site made of thixotropic soils. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(2):45-65. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.2.45-65

Corresponding author: Anastasia E. Bezgribelnaya, bezgribelnaya@bk.ru.

введение

Теплоэлектростанции (ТЭС) в РФ являются ведущими энергогенерирующими комплексами по сравнению с другими комплексами энергетической промышленности: по данным Росстата за 2022 г.¹ Единая энергетическая система (ЕЭС) России включает 69 % энергии, вырабатываемой ими.

ТЭС широко распространены в условиях городской застройки, где, однако, зачастую отсутствует вариативность выбора площадки строительства, в результате чего геологические условия оказываются не самыми благоприятными и удобными для эксплуатации тяжелого оборудования со специфическими нагрузками. Примером может служить строительство дополнительных энергоблоков газотурбинной электростанции ЭС-1 Центральной ТЭЦ в Санкт-Петербурге², который известен своими слабыми глинистыми грунтами³ [1].

В процессе инженерно-геологических изысканий были выявлены насыпные грунты и заторфованные пески, пески крупные и пылеватые, а также суглинки текучепластичные, склонные к проявлению тиксотропных свойств при динамических нагрузках, без которых немыслима работа любого турбоагрегата ТЭЦ.

В связи с этим с целью поиска путей совершенствования проработанного в проектной документации фундамента указанной ТЭС предпринята попытка численной оценки динамического воздействия на ее свайный фундамент под турбоагрегатом в грунтах, склонных к проявлению свойств тиксотропии, с учетом динамических и статических нагрузок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен анализ инженерно-геологических условий стройплощадки, данных проектной и рабочей документации по архитектурным и конструктивным решениям, расчета фундамента в программном комплексе (ПК) SCAD, проекта организации строительства объекта. В ПК PLAXIS⁴ с учетом динамических воздействий турбоагрегата на фундамент и грунтовый массив построена соответствующая модель. Это позволило выполнить сравнительный анализ проектных решений и сформулировать обоснованные выводы, подтверждающие необходимость учета динамического воздействия при проектировании фундаментов под оборудование и агрегаты на грунтах, склонных к проявлению тиксотропных свойств.

В проектной документации рекомендован вариант свайного фундамента под турбоагрегат (железобетонные сваи, устраиваемые методом вдавливания, или буроинъекционные сваи).

В сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга для пластичных глинистых грунтов минимально достаточным считается развить усилие вдавливания, равное несущей способности сваи.

Учитывая стесненные условия стройплощадки, в описываемом исследовании принято решение использовать буронабивные сваи.

При наличии слабых водонасыщенных грунтов предусмотрен глинистый раствор бентонитовых глин, оказывающий гидростатическое воздействие на стенки, обеспечивая надежное скрепление отдельных слоев грунтов.

В случае фундаментов, возводимых на грунтах, склонных к проявлению свойств тиксотропии (полное или частичное разрушение структурных связей под воздействием динамических нагрузок и в последующем по прошествии определенного перио-

¹ Выработка электроэнергии в России в 2022 году выросла на 0,6 %. URL: https://tass.ru/ekonomika/16939991

² ЭС-1. Центральная ТЭЦ. Строительство тепловой газотурбинной электростанции // ЭЦМ. URL: https://ecm.ru/ projects/2016/6225/

³ Геология Санкт-Петербурга // Экологический портал Санкт-Петербурга. URL: https://m.infoeco.ru/okruzhaushaya-sreda/nedra

⁴ PLAXIS 3D. Трехмерные геотехнические расчеты. URL: https://www.plaxis.ru/product/plaxis-3d/



Рис. 1. Схема устройства газотурбинной установки для электрических станций фирмы Siemens»⁵: *1* — система воздухозабора; *2* — газотурбинная установка (ГТУ); *3* — дымовая труба; *4* — отвод газов; *5* — диффузор; *6* — рама ГТУ; *7* — электрогенератор; *8* — трансформатор; *9* — блок управления

да времени самостоятельное восстановление в отсутствие других внешних нагрузок при постоянной температуре и влажности), при проектировании решено отдать предпочтение сложным массивным конструкциям, способствующим «гашению» динамических нагрузок, а также использовать виброизоляторы, например, пружинного типа.

Анализ результатов научно-проектных проработок [2–9] показал, что свайные фундаменты обладают определенной спецификой работы при динамической нагрузке на тиксотропных грунтах: вокруг сваи образуется ослабленный грунтовый массив радиусом 5–8 диаметров сваи, и виброизоляторы способствуют смягчению этого воздействия. Поскольку всякая динамическая нагрузка на тиксотропные грунты очень опасна, признано целесообразным применять методы статического вдавливания или отдать предпочтение технологии устройства буронабивных свай с использование глинистого раствора.

На основе вариантных расчетов и с учетом опыта проектирования и работы газотурбинных турбоагрегатов на плитных фундаментах в сложных грунтовых условиях на базе проектной и рабочей документации фундаментов турбоагрегата SGT-800 фирмы Siemens для объекта «ЭС-1 Центральная ТЭЦ строительство тепловой газотурбинной электростанции (ГТУ-ТЭЦ) в г. Санкт-Петербурге» был принят турбоагрегат SGT-800 фирмы Siemens (рис. 1), а для анализа в исследовании принят фундамент со сложной конструкцией, состоящей из верхней и нижней плит (рис. 2) с пружинной виброизоляцией на свайном основании. Эффект снижения уровня вибрации достигается подбором виброизоляторов, позволяющих обеспечить оптимальные вибрационные и деформационные характеристики фундамента. Наличие виброизоляторов предоставляет возможность регулировать высотное положение системы «турбоагрегат – фундамент», а также практически полностью исключает передачу вибраций на грунтовое (свайное) основание и прилегающие строительные конструкции, включая существующие здания.

Наличие грунтов с тиксотропными свойствами, низкочастотного (25 Гц) возбуждения с широкой зоной распространения, больших нагрузок от тяжелых роторов генератора и тихоходного вала редуктора приводят к значительному снижению горизонтальной жесткости свайного основания при динамическом воздействии. При отсутствии виброизоляции это приведет к недопустимому уровню поперечных вибраций агрегата и к существенному снижению несущей способности фундаментов главного корпуса (машинного зала) и соседних зданий. При этом и сами ГТУ могут взаимно влиять друг на друга.

Принятая конструкция верхнего строения — плитный фундамент из монолитного железобетона на виброизоляторах производства фирмы GERB (см. рис. 2). Нагрузки от оборудования и опорной платформы передаются на нижнюю плиту через систему из 20 виброизолирующих пружинных элементов (из них 6 пружинно-демпферных). Виброизоляторы опираются на 10 вертикальных постаментов высотой около 50 см и поперечных сечением 50 × 200 см.

Масса подпружиненной железобетонной конструкции 1430 т.

⁵ Газотурбинные электростанции Siemens (Сименс) — установки — силовые станции из Германии. URL: https:// manbw.ru/analitycs/siemens.html



Рис. 2. Железобетонная конструкция верхней (а) и нижней (b) фундаментных плит [10]

Плита имеет толщину 3,0 м (без учета постаментов под генератор и под пусковой электродвигатель), в зоне установки шкафов вспомогательного оборудования в плите имеется ступенчатое понижение на 0,9 м.

Подвальная часть представляет собой открытый сверху и по одной из сторон короб с нижней плитой толщиной 1 м и подпорными стенами толщиной 0,4 м. На плите размещены постаменты высотой 0,44 × 2,0 м и толщиной 0,5 м под виброизоляторы (рис. 2, b).

Рассматриваемая территория стройплощадки расположена в сейсмически спокойном районе, однако слабые толчки отмечались в разные годы (3–4 балла). Сейсмическая активность района, согласно СП 14.13330.2011, составляет 5 баллов.

В месте строительства двух газотурбинных установок расположены скважины: первая ГТУ — скв. 46, вторая — скв. 35 (рис. 3, 4).



Рис. 3. План скважин

Строительство: ТОМ 14. ВЫПУСК 2 (52) наука и образование



Рис. 4. Геологический разрез основания ГТУ-1

Относительной отметке +0,000 соответствует абсолютная +7,500 в Балтийской системе высот.

На площадке строительства выявлены супесчаный грунт с тиксотропными свойствами, представленный суглинками текучепластичными, с прослоями мягкопластичных, легких и тяжелых пылеватых, ленточных и слоистых, тиксотропных, коричневатосерых, с прослоями песков пылеватых, насыщенных водой. Было взято 5 образцов данных грунтов, далее упоминаемых под № 7–11.

Для учета виброползучести грунтов использован добавочный коэффициент $K_{\text{вп}}$, снижающий величину статического модуля общей деформации (квазистатический подход):

$$K_{\rm BH} = \Delta \varepsilon_{\rm c} / (\Delta \varepsilon_{\rm c} + \Delta \varepsilon_{\rm g}), \qquad (1)$$

где $\Delta \varepsilon_c$ и $\Delta \varepsilon_g$ — приращения деформации от статического и динамического нагружения в заданном диапазоне напряжений.

Модуль деформации грунта с учетом деформации виброползучести определяли по формуле:

$$E_{\rm BH} = E_{\rm c} \cdot K_{\rm BH}, \qquad (2)$$

где $E_{\rm вn} = \sigma_z \cdot \beta / (\varepsilon_{\rm c} + \varepsilon_{\rm b}); E_{\rm c} = (\sigma_z / \varepsilon_{\rm c}) \cdot \beta; E_{\rm c}$ — модуль деформаций по результатам статических испытаний; $\beta = 0.8$ для песчаных грунтов.

Этапы консолидации и девиаторного нагружения выполняли по консолидированно-дренированной схеме, этап вибрационного нагружения по консолидированно-недренированной схеме. В результате испытаний получены значения деформаций при различных схемах нагружения.

Статико-динамические трехосные испытания глинистых грунтов показали, что исследуемые грунты под воздействием статической и динамической нагрузок проявляют свойства виброползучести и имеют коэффициенты виброползучести при амплитуде девиаторного нагружения до 30 кПа.

Средние значения $K_{\rm вп, cp10} = 0,40$, $K_{\rm вп, cp20} = 0,35$ применены при расчетах снижения деформационных характеристик грунта при динамическом воздействии в соответствии с п. 6.13.4 СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

Кроме того, при проектировании учтено, что при вибрационных нагрузках с частотой от 50 Гц стабилизация вертикальных перемещений для глинистых образцов не наступила, свидетельствуя о динамической неустойчивости и разжижении образцов при указанных частотах.

Полученные крайне низкие значения *К*_{вп} обусловлены высокой чувствительностью образцов к вибрационным воздействиям, подлежащей учету при проектировании сооружений на свайных фундаментах. Возможно изменение схемы работы ростверка (переход от низкого ростверка к высокому) вследствие дополнительных осадок грунтовых слоев в межсвайном пространстве.

Значение модулей общей деформации по результатам девиаторного нагружения для рассмотренных образцов меняется в пределах $E_{\rm min} = 1332$ кПа и $E_{\rm max} = 34$ 826 кПа.

В исследовании проведен расчет свайного фундамента методом послойного суммирования и в ПК SCAD.

Расчет несущей способности свай выполнен согласно СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты». С учетом конструктивных ограничений принято свайное поле из 18 буронабивных свай диаметром 820 мм и длиной 21 м. Сваи жестко заделаны в фундаментную плиту.

В соответствии со СНиП 2.02.05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками» фундаментные конструкции ниже виброизоляторов рассчитываются по обычным нормам на статические нагрузки.

Нижние концы свай фундаментов турбоагрегатов опираются на глины твердые с $L_1 = -0,18$, модуль деформации E = 30 МПа.

Длина сваи в грунте составляет 21 м, собственный вес $G_{_{\rm CB}} = 300$ кН. Одиночная свая в составе фундамента рассчитывается по несущей способности грунта исходя из условия (7.2) из СП 24.13330.2011:

$$N \le \frac{\gamma_0 + F_d}{\gamma_n + \gamma_k},\tag{3}$$

где N — расчетная нагрузка, передаваемая на сваю; $\gamma_0 = 1,15$ — коэффициент условий работы при кустовом расположении свай; F_d — расчетная несущая способность грунта основания сваи; $\gamma_n = 1,1$ коэффициент надежности по ответственности; $\gamma_k = 1,4$ — коэффициент надежности по грунту для случая определения несущей способности сваи расчетом.

В соответствии с СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты», несущая способность буронабивной сваи определяется по зависимости (формула 7.11 из ГОСТ 12248.4–2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия»):

$$F_{d} = \gamma_{c} \cdot \left(R \cdot A + \gamma_{cf} \cdot u \sum f_{i} \cdot h_{i} \right), \qquad (4)$$

где $\gamma_c = 1,0$ — коэффициент работы сваи в грунте; A — поперечное сечение сваи; γ_{ef} — коэффициент условий работы грунта под нижним концом и по боковой поверхности сваи; u — наружный периметр поперечного сечения сваи; f_i , h_i — расчетное сопротивление и толщина *i*-го слоя грунта на боковой поверхности сваи (расчетные сопротивления принимаются по табл. 7.8 из ГОСТ 12248.4–2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия»).

Оценка статической жесткости сваи проводится на основании СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты». Оценка дана для случаев наименьшего (1900 мм) и наибольшего (6200 мм) расстояний между сваями в составе свайного поля.

Поскольку статическая горизонтальная жесткость свайного основания и грунта по боковым поверхностям фундамента незначительно влияет на результат расчетов, а нагрузки на плиту в основном вертикальные, значение горизонтальной жесткости принято равным 0,5 от значения вертикальной жесткости.

Генераторная часть фундамента существенно тяжелее турбинной (бетонный постамент под генератором и вес генератора превышают вес турбины и располагаются на противоположном конце от генератора диффузора).

Путем вариантных расчетов определена оптимальная расстановка 18 свай (рис. 5). Центр тяжести плана свай находится на расстоянии 11,1 м от конца фундаментной плиты подвала. Центр тяжести постоянных нагрузок по модели — соответственно на 11,07 м. Эксцентриситет e = 0,03/24,7 == 0,001 (0,1 %). Условие ограничения эксцентриситета 0,1 < 3 % выполнено (согласно работам [11–18]). На основе проведенных испытаний и анализа опыта проектирования прошлых лет в качестве варианта в данном исследовании было принято решение о разработке проекта фундаментов под турбоагрегат с конструкцией, представленной двумя



Рис. 5. План свайного поля ГТУ-1

массивными плитами, «соединенными» виброизоляторами, так как при отсутствии виброизоляции воздействие динамических нагрузок от машины приведет к недопустимому уровню поперечных вибраций агрегата и существенному снижению несущей способности фундаментов главного корпуса.

В рамках настоящего исследования выполнен расчет свайного фундамента вручную методом послойного суммирования при отсутствии действия на него динамической нагрузки (несущая способность висячих и буровых свай, свай-оболочек, заполняемых бетоном, определение осадки куста свай при центральном сжатии (расстояние между сваями 1900, 6200 мм)). Полученные результаты удовлетворительные. Строительство и эксплуатация данного объекта являются безопасными.

Исходя из полученных результатов приняты оптимальные геометрические характеристики свайного фундамента с учетом центрирования (18 буронабивных свай длиной 21 м).

В рассматриваемой задаче имеется источник периодических нагрузок — турбогенератор (турбина + генератор) электрической газотурбиной станции.

В исследовании рассмотрено влияние источника вибрации на грунтовое основание с учетом наличия тиксотропных грунтов. Физическое демпфирование колебаний, обусловленное эффектом вязкости, учитывается посредством демпфирования по Рэлею. Затуханию вибраций может помочь и «геометрическое демпфирование», которое проявляется вследствие осесимметричности модели.

Одним из важнейших при динамическом расчете является моделирование границ грунтового массива. Вибрационные волны имеют свойство отражаться от границ модели (что в действительности, конечно, не происходит), поэтому необходимо удостовериться, что имеет место поглощение волн, которые достигают границ. Чтобы избежать этого, прикладываем к границам специальные условия. Пример корректной динамической модели представлен на рис. 6.

В нашем случае источниками динамических воздействий служат турбина и генератор, установленные на бетонной плите толщиной 3,3 м. Турбина расположена на дополнительном возвышении от отметки общей плиты на 1,7 м. В основании симметрично расположены и жестко заделаны в фундаментную плиту. В рассматриваемой задаче учитываем, что динамическая нагрузка не «глушится» демпферами пружинного типа, а передается непосредственно через фундамент на грунт. В описываемом исследовании, напротив, учитывалось, что конструкция плиты более сложная, имеет верхнюю и нижнюю части, которые взаимосвязаны демпферами пружинного типа, благодаря чему на основание передается только статическая



Рис. 6. Пример динамического расчета генератора на упругом основании на плите, толщиной 0,2 м без свай на грунтовом массиве, представленном глиной (СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»)

нагрузка, значение которой, в свою очередь, также возрастает из-за наличия массивной верхней конструкции фундаментной плиты шириной 3 м и с большим процентом армирования на тяжелом бетоне.

В решаемой задаче предусмотрено проанализировать необходимость такой конструкции и на практике убедиться в том, что при заданных динамических нагрузках (которые в рассматриваемом случае не компенсируются) это требуется для безопасности здания ТЭС, ее сооружений, рядом стоящих строений и экономической целесообразности использования более сложной конструкции, «глушащей» большие динамические нагрузки, вызываемые турбиной и генератором ТЭС.

Вызванные турбогенератором колебания передаются через фундамент на грунтовый массив. Эти колебания моделируем посредством равномерно распределенной гармонической нагрузки в соответствии с паспортными данными машины.

Динамические нагрузки, выданные заводомизготовителем, представлены в таблице.

Вычисление динамических нагрузок при эксплуатации Р_{л1}

| Обозначение нагрузок | Турбина | Генератор |
|-----------------------------|---------|-----------|
| <i>f</i> , Гц | 110 | 25 |
| ω, об/мин | 6608 | 1500 |
| Ώ, рад/с | 690,8 | 157,1 |
| М ротора, кг | 7677 | 27 500 |
| <i>Р</i> _{д1} , кН | 33,8 | 27,5 |

Также учитывается вес самого турбогенератора (статическая составляющая рассматриваемой задачи), принимаемый из паспортных данных на турбоагрегат от завода-изготовителя и моделируемый посредством равномерно распределенной нагрузки.

Границы модели размещаем по возможности как можно дальше от рассматриваемой зоны, чтобы избежать искажения вследствие возможных отражений от границ модели. Также учтено при динамическом расчете, что волна не должна проходить более одного конечного элемента (КЭ) за шаг приращения времени, поэтому размер такого элемента выбирается строго из условия:

$$\Delta t \le L/V, \tag{5}$$

где Δt — приращение времени, с; L_e — размерность КЭ сетки; V — скорость распространения волны в грунте, м/с.

Важнейшей особенностью проведения корректного расчета является учет дополнительных граничных условий, вязких границ, которые необходимо вводить по краям модели, чтобы исключить отражение вибрационных волн. Это свойство «вязкие границы» учтено в подразделе Dynamics (динамическая модель) модели PLAXIS 3D.

Расчет с учетом демпфирования проведен по Рэлею. Принят во внимание эффект демпфирования колебаний в материале. Расчетная схема при статическом нагружении показана на рис. 7, соответствующие изополя вертикальных перемещений на рис. 8, то же при динамическом нагружении — на рис. 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено сравнение расчета по модели «агрегат – опорная плита – свайное основание» (динамический расчет опорной плиты и статический расчет свайного основания) с расчетом по модели «агрегат – свайное основание» (динамический и статический расчеты свайного основания).

Расчеты продемонстрировали, что на нижнюю плиту конструкции и на оголовки свай уровень вибрации многократно (в 40 раз) меньше уровня 2 мм/с, при котором требуется учитывать снижение несущей способности основания как самого фундамента, так и соседних к нему.

В целом расчеты показали, что статические деформации (осадки, прогибы, крены) фундаментов двух подвергнутых сопоставлению конструкций удовлетворяют нормативным требованиям и требованиям изготовителей турбоагрегата.

Для модели «агрегат – опорная плита – свайное основание» максимальный уровень виброскоростей на рабочей частоте в зоне установки турбоагрегата составляет 0,59 мм/с. Нормативное ограничение, установленное заводом-изготовителем (1 мм/с), не превышено. В случае модели «агрегат – свайное основание» «затухание» колебаний не происходит, что может негативно повлиять как на фундамент, так и на окружающую застройку.



Рис. 7. Общий вид расчетной схемы на этапе приложения статических нагрузок

Строительство: ТОМ 14. ВЫПУСК 2 (52) наука и образование



Рис. 8. Изополя вертикальных перемещений на этапе приложения статических нагрузок





ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что необходимо использование демпферов и сложной конструкции, состоящей из плиты с жестко заделанными сваями и плитой, на которую опираются машины. Ввиду сложных геологических условий (наличие грунтов с тиксотропными свойствами и обводненных грунтов, глубокое залегание «операбельных» слоев, расположение фундамента турбоагрегата внутри главного корпуса, где также предусматриваются другие массивные фундаменты под оборудование, такие как фундаменты под котлы-утилизаторы, наличие сложной конструкции главного корпуса с несколькими передвижными кранами большой грузоподъемности), а также учитывая, что станция располагается в центре г. СанктПетербурга, необходимо предотвратить динамическое и статическое влияние как на существующую застройку, так и на главный корпус со всеми вспомогательными зданиями и сооружениями ТЭС.

Учитывая стоимость и объемы сравниваемых фундаментов, сделан вывод, что альтернативная конструкция намного дешевле, но, соотнося все риски, следует отдать предпочтение варианту конструкции, состоящей из верхней и нижней массивных плит, «соединенных» демпферами.

Следовательно, совмещение в одну конструкцию нижней и верхней плит в более понятную конструкцию (в проведенном исследовании это свайноплитное основание) и полный отказ от установки виброизоляторов нецелесообразно и опасно для рассматриваемой конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н.* Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах : монография. М. : Издательство АСВ, 2018. 386 с.

2. Ступников В.С., Данчук Е.М., Черкасова Л.И. Тиксотропия глинистых грунтов // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 1. С. 2. EDN ZQOUGR.

3. Поздняков В.А., Пахомов В.Е., Королев В.А. Тиксотропия глинистых грунтов // Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. 2023. С. 294–297. EDN IIDUCS.

4. Капустин В.В., Владов М.Л., Вознесенский Е.А., Волков В.А. Оценка воздействия вибрационных нагрузок на грунтовые массивы и сооружения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 4. С. 155–170. DOI: 10.21455/VIS2022.4-11. EDN JXFBLN.

5. *Ren Y., Yang S., Andersen K.H., Yang Q., Wang Y.* Thixotropy of soft clay : a review // Engineering Geology. 2021. Vol. 287. P. 106097. DOI: 10.1016/j. enggeo.2021.106097

6. *Bhattacharya S*. Analysis and design of tabletop foundation for turbine generators // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. Vol. 1. Pp. 3–17. DOI: 10.1007/978-981-13-0362-3 1

7. Concrete foundations for turbine generators: analysis. 2018. DOI: 10.1061/9780784414927

8. *Тер-Мартиросян А.З. и др.* Основы численного моделирования в механике грунтов и геотехнике : учеб.-метод. пособие. М. : МИСИ – МГСУ, 2020. 90 с.

9. Абелев М.Ю., Абелева А.М., Аверин И.В., Чунюк Д.Ю. Строительство сооружений, передающих многократно повторные нагрузки на фундаменты оснований : учебное пособие. М. : АСВ, 2023. 94 с. EDN IQPCXL.

10. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках : учебное пособие. М. : Изд-во МГУ, 2017. С. 190–202.

11. Мащенко А.В., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Специальные методы механики грунтов и механики скальных пород : учебное пособие. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. С. 56–60.

12. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. Грунтоведение. М. : Изд-во МГУ, 2015. С. 538–546.

13. *Осипов В.И*. Природа прочности и деформационных свойств глинистых грунтов. М. : Изд-во МГУ, 2019. 232 с.

14. *Seed H.B., Idriss I.M.* Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Oakland, CA. : Earthquake Engineering Research Institute Monograph, 2015.

15. Соколова О.В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 4 (48). С. 10–16. DOI: 10.5862/MCE.48.2. EDN SFOUPH.

16. Ширяева М.П., Кривонос Е.А. Классификация моделей грунтового основания // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2014. № 3. С. 18–25. EDN TGILJV.

17. *Кургузов К.В., Фоменко И.К.* Основополагающие математические модели грунтов в практике геотехнического моделирования. Обзор // Естественные и технические науки. 2019. № 5 (131). С. 240–247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04. EDN KGJTQF. 18. Колесников А.О., Попов В.Н., Костюк Т.Н. Оценка взаимного влияния свай при вертикальных колебаниях фундамента // Строительная механи-

Поступила в редакцию 21 мая 2024 г. Принята в доработанном виде 28 мая 2024 г. Одобрена для публикации 28 мая 2024 г.

> ОБ АВТОРАХ: Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры механики грунтов и геотехники Института гидротехнического и энергетического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nsnikitina@mail.ru;

> Анастасия Евгеньевна Безгрибельная — студентка; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; инженер 3-й категории строительного отдела; Институт Теплоэлектропроект; 105066, г. Москва, Спартаковская ул., д. 2a, стр. 1; bezgribelnaya@bk.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Thermal power plants (TPP) in the Russian Federation are the leading energy generating complexes compared to other complexes of the energy industry: according to Rosstat data for 2022¹ the Unified Energy System (UES) of Russia includes 69 % of energy generated by them.

TPP are widespread in urban areas, where, however, there is often a lack of variability in construction site selection, resulting in geological conditions that are not the most favourable and convenient for the operation of heavy equipment with specific loads. An example is the construction of additional power units of the gas turbine power plant PP-1 of the Central CHP in St. Petersburg², which is known for its weak clay soils³ [1].

In the process of engineering-geological surveys, bulk soils and marshy sands, coarse and dusty sands, as well as flow-plastic loams prone to thixotropic properties under dynamic loads, without which the operation of any CHP turbine unit is inconceivable.

In this connection, in order to find ways to improve the foundation of the mentioned TPP developed in the design documentation, an attempt to numerically assess the dynamic impact on its pile foundation under the turbine unit in soils prone to thixotropy properties, taking into account dynamic and static loads, was made.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of engineering and geological conditions of the construction site, data from design and working documentation on architectural and structural solutions, foundation calculations in SCAD software package (PC), and the project of the facility construction organization was carried out. In PLAXIS⁴ PC the corresponding model was built taking into account the dynamic effects of the turbine unit on the foundation and ground mass. This made it possible to perform a comparative analysis of design solutions and formulate reasonable conclusions confirming the necessity to take into account the dynamic impact when designing foundations for equipment and units on soils prone to thixotropic properties.

ка инженерных конструкций и сооружений. 2020.

T. 16. № 3. C. 209–218. DOI: 10.22363/1815-5235-

2020-16-3-209-218. EDN QKFKCU.

The design documentation recommends the option of pile foundation for the turbine unit (reinforced concrete piles using the indentation method or boredinjection piles).

In the difficult engineering and geological conditions of St. Petersburg, for plastic clayey soils, it is considered to be minimally sufficient to develop an indentation force equal to the bearing capacity of the pile.

Considering the cramped conditions of the construction site, it was decided to use bored piles in the study described.

In the presence of weak water-saturated soils, a clay solution of bentonite clay is provided, which exerts a hydrostatic effect on the walls, providing reliable bonding of individual layers of soils.

In the case of foundations built on soils prone to thixotropy properties (complete or partial destruction of structural bonds under the influence of dynamic loads

56

¹ Electricity generation in Russia in 2022 increased by 0.6 %. URL: https://tass.ru/ekonomika/16939991

² PP-1. Central CHP. Construction of thermal gas turbine power plant, ECM. URL: https://ecm.ru/projects/2016/6225/

³ Geology of St. Petersburg, Environmental Portal of St. Petersburg. URL: https://m.infoeco.ru/okruzhaushaya-sreda/ nedra

⁴ PLAXIS 3D. Three-dimensional geotechnical calculations. URL: https://www.plaxis.ru/product/plaxis-3d/



Fig. 1. Schematic diagram of gas turbine unit for electric power plants of Siemens⁵: 1 — air intake system; 2 — gas turbine unit (GTU); 3 — chimney; 4 — gas outlet; 5 — diffuser; 6 — GTU frame; 7 — electric generator; 8 — transformer; 9 — control unit

and subsequent self-recovery after a certain period of time in the absence of other external loads at constant temperature and humidity), it is decided to give preference in the design to complex massive structures that contribute to the "damping" of dynamic loads, as well as to use vibration isolators, for example, of the spring type.

Analysis of the results of scientific and design studies [2–9] has shown that pile foundations have certain specifics of operation under dynamic loading on thixotropic soils: a weakened soil mass with a radius of 5–8 pile diameters is formed around the pile, and vibration isolators help to mitigate this effect. As any dynamic loading on thixotropic soils is very dangerous, it is considered advisable to use static indentation methods or to favour the bored pile technique using clay mortar.

On the basis of variant calculations and taking into account the experience of designing and operation of gas turbine turbo units on slab foundations in difficult ground conditions on the basis of design and working documentation of foundations of turbine unit SGT-800 of Siemens company for the object "PP-1 Central CHP construction of thermal gas turbine power plant (GTU-TPP) in St. Petersburg", the foundation with a complex structure consisting of upper and lower slabs (Fig. 2) was adopted. SGT-800 turbine unit of Siemens company (Fig. 1) was accepted for the analysis in the study, and the foundation with a complex structure consisting of upper and lower slabs (Fig. 2) with spring vibration isolation on a pile base was accepted for the analysis in the study. The effect of vibration reduction is achieved by selecting vibration isolators to

ensure optimal vibration and deformation characteristics of the foundation. The presence of vibration isolators makes it possible to regulate the height position of the system "turbine unit – foundation", as well as almost completely eliminates the transmission of vibrations to the ground (pile) base and adjacent building structures, including existing buildings.

The presence of soils with thixotropic properties, low-frequency (25 Hz) excitation with a wide propagation zone, large loads from heavy generator rotors and slow-speed gearbox shaft lead to a significant reduction in the horizontal stiffness of the pile foundation under dynamic impact. In the absence of vibration isolation it will lead to inadmissible level of transverse vibrations of the unit and to essential reduction of bearing capacity of foundations of the main building (engine room) and neighbouring buildings. At the same time GTU themselves can mutually influence each other.

The adopted structure of the upper structure is a slab foundation made of monolithic reinforced concrete on vibration isolators manufactured by GERB (see Fig. 2). Loads from the equipment and the support platform are transferred to the lower slab through a system of 20 vibration-isolating spring elements (6 of which are spring-damped). The vibration isolators are supported on 10 vertical pedestals with a height of about 50 cm and cross-sections of 50×200 cm.

The mass of the sprung reinforced concrete structure is 1,430 tonnes.

The slab has a thickness of 3.0 m (excluding the pedestals for the generator and for the starting motor), in the area of installation of auxiliary equipment cabinets there is a step-down of 0.9 m in the slab.

⁵ Siemens (Siemens) gas turbine power plants – installations – power plants from Germany. URL: https://manbw.ru/anali-tycs/siemens.html



Fig. 2. Reinforced concrete structure of the upper (a) and lower (b) foundation slabs [10]

The basement part is a box open at the top and on one of the sides with a 1 m thick bottom slab and 0.4 m thick retaining walls. The slab has pedestals 0.44×2.0 m high and 0.5 m thick for vibration isolators (Fig. 2, *b*).

The construction site under consideration is located in a seismically quiet area, but weak shocks were recorded in different years (3–4 points). The seismic activity of the area, according to CP 14.13330.2011, is 5 points. The following wells are located at the site of construction of two gas turbine units: the first GTU — well 46, the second — well 35 (Fig. 3, 4).

The relative mark +0.000 corresponds to the absolute mark +7.500 in the Baltic Height System.

The construction site revealed sandy loam with thixotropic properties, represented by very soft plastic loams with interlayers of soft plastic, light and heavy dusty, banded and layered, thixotropic, brownish grey, with interlayers of dusty sands saturated with water.







Fig. 4. Geological section of the GTU-1 basement

Five specimens of these soils were taken, hereinafter referred to as Nos. 7–11.

$$K_{vc} = \Delta \varepsilon_c / (\Delta \varepsilon_c + \Delta \varepsilon_g), \tag{1}$$

To account for vibration creep of soils, an additive coefficient K_{vc} , which reduces the value of static modulus of total deformation (quasi-static approach), was used: where $\Delta \varepsilon_c$ and $\Delta \varepsilon_g$ are strain increments from static and dynamic loading in a given stress range.

The modulus of deformation of the soil taking into account the vibration creep deformation was determined by the formula:

$$E_{vc} = E_c - K_{vc}, \qquad (2)$$

where $E_{vc} = \sigma_z \cdot \beta/(\varepsilon_c + \varepsilon_{\scriptscriptstyle B})$; $E_c = (\sigma_z/\varepsilon_c) - \beta$; E_c — modulus of deformation based on static test results; $\beta = 0.8$ for sandy soils.

The consolidation and deviatoric loading stages were performed according to the consolidated-drained scheme, the vibration loading stage — according to the consolidated-undrained scheme. As a result of the tests, the values of deformations at different loading schemes were obtained.

Static-dynamic triaxial tests of clayey soils have shown that the studied soils under the influence of static and dynamic loads exhibit vibration creep properties and have vibration creep coefficients at deviatoric loading amplitude up to 30 kPa.

Average values $K_{vc,av10} = 0.40$, $K_{vc,av20} = 0.35$ are used in calculations of reduction of deformation characteristics of soil under dynamic impact in accordance with clause 6.13.4 of CP 22.13330.2011 "Foundations of Buildings and Structures".

In addition, the design takes into account that stabilization of vertical displacements for clay specimens did not occur under vibration loads at frequencies from 50 Hz, indicating dynamic instability and liquefaction of the specimens at these frequencies.

The obtained extremely low values of K_{vc} are due to the high sensitivity of the specimens to vibration effects to be taken into account when designing structures on pile foundations. It is possible to change the working pattern of the pile foundation (transition from low to high pile foundation) due to additional settlements of soil layers in the inter-pile space.

The value of total strain moduli from the results of deviatoric loading for the considered specimens varies in the range $E_{\min} = 1,332$ kPa and $E_{\max} = 34.826$ kPa.

In the study, the pile foundation was calculated by layer-by-layer summation method and in the PC SCAD.

Calculation of pile bearing capacity is performed according to CP 24.13330.2011 "Pile Foundations". Taking into account the design constraints, a pile field of 18 bored piles with a diameter of 820 mm and a length of 21 m was adopted. The piles are rigidly embedded in the foundation slab.

In accordance with SNiP 2.02.05–87 "Foundations of machines with dynamic loads", the foundation structures below the vibration isolators are calculated according to the usual norms for static loads.

The lower ends of the turbine unit foundation piles are supported on hard clays with $L_1 = -0.18$, deformation modulus E = 30 MPa.

The length of the pile in the ground is 21 m, dead weight $G_{dw} = 300$ kN. A single pile as part of the foundation is calculated for the bearing capacity of the soil based on condition (7.2) from CP 24.13330.2011:

$$N \le \frac{\gamma_0 + F_d}{\gamma_n + \gamma_k},\tag{3}$$

where N — design load transferred to the pile; $\gamma_0 = 1.15$ — coefficient of working conditions in case of pile arrangement; F_d — design bearing capacity of the soil of the pile base; $\gamma_n = 1.1$ — reliability factor for responsibility; $\gamma_k = 1.4$ — reliability factor for soil in case of determining the bearing capacity of the pile by calculation.

According to CP 24.13330.2021 "Pile foundations", the bearing capacity of a bored pile is determined according to the dependence (formula 7.11 from GOST 12248.4-2020 "Soils. Determination of deformability characteristics by compression method"):

$$F_{d} = \gamma_{c} \cdot \left(R \cdot A + \gamma_{cf} \cdot u \sum f_{i} \cdot h_{i} \right), \tag{4}$$

where $\gamma_c = 1.0$ — coefficient of pile operation in soil; A — cross-section of the pile; γ_{cf} — coefficient of soil working conditions under the bottom end and on the lateral surface of the pile; u — outer perimeter of the pile cross-section; f_i , h_i — design resistance and thickness of the *i*-th layer of soil on the lateral surface of the pile (design resistances are taken from Table 7.8 of GOST 12248.4–2020 "Soils. Determination of deformability characteristics by compression method").

The static stiffness of the pile is assessed on the basis of CP 24.13330.2021 "Pile foundations". The assessment is given for the cases of the smallest (1,900 mm) and the largest (6,200 mm) pile spacing within the pile field.

Since the static horizontal stiffness of the pile foundation and the soil on the lateral surfaces of the foundation has an insignificant effect on the calculation result, and the loads on the slab are mainly vertical, the value of the horizontal stiffness is assumed to be 0.5 of the vertical stiffness value.

The generator portion of the foundation is significantly heavier than the turbine portion (the concrete pedestal under the generator and the weight of the generator exceeds the weight of the turbine and is located at the opposite end from the diffuser generator).

The optimal arrangement of 18 piles was determined by variant calculations (Fig. 5). The centre of gravity of the pile plan is at a distance of 11.1 m from the end of the basement foundation slab. The centre of gravity of the permanent model loads is at 11.07 m, respectively. Eccentricity e = 0.03/24.7 = 0.001 (0.1 %). The condition of eccentricity limitation 0.1 < 3 % is fulfilled (according to [11–18]).

Based on the conducted tests and analysis of design experience of the past years, as an option in this study it was decided to develop the design of foundations for the turbine unit with a structure represented by two massive slabs "connected" by vibration isolators, since in the absence of vibration isolation the impact of dynamic loads from the machine will lead to an unacceptable level of transverse vibrations of the unit and



Fig. 5. Pile field plan of GTU-1

a significant reduction in the load-bearing capacity of the foundations of the main body.

Within the framework of the present study, the pile foundation was calculated manually by layer-by-layer summation method in the absence of dynamic loading (bearing capacity of hanging and bored piles, pile-shells filled with concrete, determination of pile cluster settlement under central compression (distance between piles 1,900, 6,200 mm)). The results obtained are satisfactory. The construction and operation of this facility is safe. Based on the results obtained, the optimum geometric characteristics of the pile foundation with regard to centering (18 bored piles of 21 m length) were adopted.

In the considered problem, there is a source of periodic loads — a turbogenerator (turbine + generator) of an electric gas turbine station.

The study considers the effect of a vibration source on a soil subgrade, taking into account the presence of thixotropic soils. Physical damping of vibrations due to viscous effects is accounted for by Rayleigh damping. Vibration damping can also be assisted by "geometric damping", which is due to the axisymmetric nature of the model.

One of the most important aspects of dynamic calculation is the modelling of the boundaries of the soil mass. Vibration waves tend to be reflected from the boundaries of the model (which, of course, does not happen in reality), so it is necessary to make sure that there is absorption of the waves that reach the boundaries. To avoid this, we apply special conditions to the boundaries. An example of a correct dynamic model is shown in Fig. 6.



Fig. 6. Example of dynamic calculation of a generator on an elastic base on a 0.2 m thick slab without piles on a soil mass represented by clay (CP 22.13330.2016 "Foundations of Buildings and Structures")

In our case, the sources of dynamic impacts are the turbine and generator mounted on a 3.3 m thick concrete slab. The turbine is located at an additional elevation of 1.7 m from the general slab level. The turbines are symmetrically located at the base and rigidly embedded in the foundation slab. In the task under consideration, we take into account that the dynamic load is not "damped" by spring-type dampers, but is transmitted directly through the foundation to the ground. In the described study, on the contrary, it was taken into account that the slab structure is more complex, with upper and lower parts, which are interconnected by spring-type dampers, due to which only the static load is transmitted to the foundation, the value of which, in turn, also increases due to the presence of a massive upper structure of the foundation slab, 3 m wide and with a high percentage of reinforcement on heavy concrete.

The problem to be solved is to analyze the necessity of such a structure and to verify in practice that under given dynamic loads (which in the case under consideration are not compensated) it is required for the safety of the TPP building, its structures, adjacent structures and the economic feasibility of using a more complex structure "silencing" the large dynamic loads caused by the turbine and generator of the TPP.

The vibrations caused by the turbo-generator are transmitted through the foundation to the soil mass. These vibrations are modelled by means of a uniformly distributed harmonic load according to the machine data sheet.

The dynamic loads issued by the factory are shown in the Table below.

| Load designation | Turbine | Generator |
|------------------------------------|---------|-----------|
| f, Hz | 110 | 25 |
| ω, rpm | 6,608 | 1,500 |
| Ώ, rad/s | 690,8 | 157,1 |
| <i>M</i> rotor, kg | 7,677 | 27,500 |
| <i>P</i> _{<i>D</i>1} , kN | 33,8 | 27,5 |
| | | |

Calculation of dynamic operating loads P_{D1}

The weight of the turbine-generator itself (static component of the problem under consideration) is also taken into account, which is taken from the turbinegenerator nameplate data from the manufacturer and modelled by means of a uniformly distributed load.

The model boundaries are placed as far as possible from the considered zone to avoid distortion due to possible reflections from the model boundaries. It is also taken into account in the dynamic calculation that the wave should not pass more than one finite element (FE) per time increment step, so the size of such an element is chosen strictly from the condition:

$$\Delta t \le L_e / V, \tag{5}$$

where Δt is the time increment, s; L_e is the dimensionality of the grid FE; V is the wave propagation velocity in the ground, m/s.

The most important feature of a correct calculation is to take into account additional boundary conditions, viscous boundaries, which must be introduced at the edges of the model to exclude reflection of vibration waves. This property "viscous boundaries" is taken into account in the Dynamics subsection of the PLAXIS 3D model.

Calculation taking into account damping is carried out according to Rayleigh. The effect of vibration damping in the material is taken into account. The calculation scheme under static loading is shown in Fig. 7, the corresponding isopoles of vertical displacements in Fig. 8, the same for dynamic loading — in Fig. 9.



Fig. 7. General view of the design scheme at the stage of static loads application



Fig. 8. Isopoles of vertical displacements at the stage of static loads application

63

Construction: Vol. 14. ISSUE 2 (52) Science and Education



Fig. 9. Isopoles of vertical displacements at the stage of dynamic loads application

RESEARCH RESULTS

CONCLUSION AND DISCUSSION

Comparison of the calculation according to the model "aggregate – baseplate – pile foundation" (dynamic calculation of the baseplate and static calculation of the pile foundation) with the calculation according to the model "aggregate – pile foundation" (dynamic and static calculation of the pile foundation) has been carried out.

The calculations demonstrated that the vibration level on the bottom slab of the structure and on the pile caps is many times (40 times) less than the level of 2 mm/s, at which it is necessary to take into account the reduction of the bearing capacity of the foundation itself and the neighbouring foundations.

In general, the calculations showed that the static deformations (settlement, deflections, and rolls) of the foundations of the two compared structures meet the normative requirements and the requirements of the turbine unit manufacturers.

For the model "unit – baseplate – pile foundation" the maximum level of vibration velocities at operating frequency in the turbine unit installation area is 0.59 mm/s. The normative limit set by the manufacturer (1 mm/s) is not exceeded. In the case of the model "unit – pile foundation" there is no "damping" of vibrations, which can negatively affect both the foundation and the surrounding building.

As a result of the study, it was found that the use of dampers and a complex structure consisting of a slab with rigidly embedded piles and a slab on which the machines rest. Due to the complex geological conditions (the presence of soils with thixotropic properties and waterlogged soils, deep occurrence of "operable" layers, the location of the turbine unit foundation inside the main building, where other massive foundations for equipment are also provided, such as foundations for waste heat boilers, the presence of a complex structure of the main building with several mobile cranes of large lifting capacity), and also taking into account that the station is located in the center of St. Petersburg, it is necessary to prevent dynamic and static impact both on the existing buildings and on the main building with all auxiliary buildings and structures of the thermal power plant. Taking into account the cost and volumes of the compared foundations, it is concluded that the alternative design is much cheaper, but, correlating all the risks, one should favour the design option consisting of upper and lower solid slabs "connected" by dampers.

Consequently, combining the bottom and top slabs in one structure into a more comprehensible structure (in the study conducted, it is a pile-and-slab foundation) and completely abandoning the installation of vibration isolators is inappropriate and dangerous for the structure under consideration. 1. Mangushev R.A., Osokin A.I., Sotnikov S.N. *Geotechnics of St. Petersburg. Experience in construction on soft soils : monograph.* Moscow, ASV Publishing House, 2018; 386. (rus.).

2. Stupnikov V.S., Danchuk E.M., Cherkasova L.I. Thixotropy of clay soils. *International Journal of Applied Sciences and Technology Integral*. 2020; 1:2. EDN ZQOUGR. (rus.).

3. Pozdnyakov V.A., Pakhomov V.E., Korolev V.A. Thixotropy of clay soils. *Modern prospects for the development of flexible production systems in industrial civil engineering and agro-industrial complex : collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduate Students, Masters and Bachelors.* 2023; 294-297. EDN IIDUCS. (rus.).

4. Kapustin V.V., Vladov M.L., Voznesensky E.A., Volkov V.A. Assessment of the impact of vibration loads on soil massifs. *Problems of Engineering Seismology*. 2022; 49(4):155-170. DOI: 10.21455/ VIS2022.4-11. EDN JXFBLN. (rus.).

5. Ren Y., Yang S., Andersen K.H., Yang Q., Wang Y. Thixotropy of soft clay : a review. *Engineering Geology*. 2021; 287:106097. DOI: 10.1016/j. enggeo.2021.106097

6. Bhattacharya S. Analysis and design of tabletop foundation for turbine generators. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019; 1:3-17. DOI: 10.1007/978-981-13-0362-3_1

7. Concrete Foundations for Turbine Generators: Analysis. 2018. DOI: 10.1061/9780784414927

8. Ter-Martirosyan A.Z. et al. *Fundamentals of numerical modeling in soil mechanics and geotechnics : educational manual.* Moscow, MISI-MGSU, 2020; 90. (rus.).

9. Abelev M.Yu., Abeleva A.M., Averin I.V., Chunyuk D.Yu. *Construction of structures that transfer*

Received May 21, 2024. Adopted in revised form on May 28, 2024. Approved for publication on May 28, 2024. multiple repeated loads to foundation foundations : textbook. Moscow, ASV, 2023; 94. EDN IQPCXL. (rus.).

10. Voznesensky E.A. *Behavior of soils under dynamic loads : textbook.* Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2017; 190-202. (rus.).

11. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychkina E.N. *Special methods of soil mechanics and rock mechanics : textbook.* Perm, Publishing house of the Perm National Research Polytechnic University, 2014; 56-60. (rus.).

12. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesensky E.A. *Soil science*. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2015; 538-546. (rus.).

13. Osipov V.I. *The nature of strength and deformation properties of clayey soils*. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 2019; 232. (rus.).

14. Seed H.B., Idriss I.M. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Oakland, CA., Earthquake Engineering Research Institute Monograph, 2015.

15. Sokolova O.V. The selection of soil models parameters in Plaxis 2D. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 4(48):10-16. DOI: 10.5862/MCE.48.2. EDN SFOUPH. (rus.).

16. Shiryaeva M.P., Krivonos E.A. Classification of soil foundation models. *Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"*. 2014; 3:18-25. EDN TGILJV. (rus.).

17. Kurguzov K.V., Fomenko I.K. Constitutive mathematical soil models in geotechnical practice. Review. *Natural and Technical Sciences*. 2019; 5(131):240-247. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.04. EDN KGJTQF. (rus.).

18. Kolesnikov A.O., Popov V.N., Kostiuk T.N. Evaluation of the pile interaction at vertical vibrations of foundation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(3):209-218. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-3-209-218. EDN QKFKCU. (rus.).

BIONOTES: Nadezhda S. Nikitina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics of the Institute of Hydraulic and Energy Construction; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nsnikitina@mail.ru;

Anastasia E. Bezgribelnaya — student; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; engineer 3rd category of construction department; Teploelektroproekt Institute; build. 1, 2a Spartakovskaya st., Moscow, 105066, Russian Federation; bezgribelnaya@bk.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflicts of interest.