

УДК 699.841

Д. А. Сергеев**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ В РАЙОНАХ
ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
С ВЫСОКИМ РОСТВЕРКОМ В КАЧЕСТВЕ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ**

Дата поступления: 15.07.2015

Решение о публикации: 08.09.2015

Цель: Описать надежность зданий, возводимых в сейсмически опасных районах строительства, в которых распространена вечная мерзлота. **Методы:** Произведено расчетно-теоретическое исследование для установления возможности применения свайного фундамента в виде сейсмоизоляции в районах высокой балльности с сохранением несущей способности свай. Расчет производился по спектральной методике. При расчетах варьировались длина свободной части сваи, масса, приходящаяся на одну сваю, различные конструкции свай. Расчет производился без введения и с введением дополнительного демпфирования в систему сейсмоизоляции. **Результаты:** Предложено решение по введению систем сейсмоизоляции в виде свайного фундамента с высоким ростверком, что позволяет сохранять основание в мерзлом состоянии. Полученные данные выведены в виде изолиний. Показано, при каких условиях свайный фундамент с высоким ростверком становится эффективным способом сейсмозащиты. Приведены рекомендации по выбору демпфирующего устройства. Предложены конструктивные решения демпфирующих устройств сухого трения. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы в проектировании зданий в сейсмически опасных районах с распространением вечной мерзлоты. Внедрение предложенных конструкций значительно повысит надежность зданий, возводимых в сейсмоопасных районах распространения вечной мерзлоты. Помимо этого, рассмотренные конструкции значительно облегчат технологию возведения и стоимость строительства таких домов.

Вечная мерзлота, сейсмозащита, сейсмоизоляция, свайный фундамент, демпфирование.

Denis A. Sergeev, postgraduate student, iamfrookt@gmail.com (Petersburg State Transport University)
ENSURING SEISMIC STABILITY OF BUILDINGS IN PERMAFROST REGIONS WITH THE USE
OF PILE BASE WITH HIGH FOUNDATION FRAME AS SEISMOISOLATION

Objective: To describe safety of buildings being erected in seismically dangerous regions of construction where permafrost is present. **Methods:** Calculation and theoretical study was conducted to check whether it is possible to use pile base as seismoisolation in areas with high seismic magnitude with preservation of piles' carrying capacity. Calculations were conducted by spectral method. During calculations, value variations were introduced for the length of a loose part of a pile, mass per pile, various pile designs. Calculations were conducted both with and without introduction of additional damping into the seismoisolation system. **Results:** The study proposes a solution for introducing seismoisolation systems as pile bases with high foundation frame, which allows to preserve the foundation in frozen state. The data obtained is presented as isolines. The study shows under which conditions can pile base with high foundation frame serve as efficient seismoprotection. Recommendations for choice of damping device are provided. Dry friction damper design solutions are offered. **Practical importance:** Study results can be used for designing buildings in seismically dangerous regions where permafrost is present. Introduction of proposed designs will significantly increase safety of buildings constructed in seismically dangerous regions where permafrost is present. Additionally, proposed designs will significantly simplify construction technology and cut costs for building such houses.

Permafrost, seismoprotection, seismoisolation, pile base, damping.

Обеспечение надежности зданий и сооружений в сейсмически опасных районах остается одним из актуальных вопросов в современном строительстве. Зачастую условия проектирования и строительства в сейсмических районах осложняются суровым климатом, отрицательными температурами, типами грунта и другими неблагоприятными условиями. Наиболее опасная ситуация возникает при строительстве зданий и сооружений в условиях высокой сейсмической активности и залегания мерзлых грунтов в основании. Территориями с таким сочетанием являются Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток.

Проблемами сейсмостойкого строительства в районах вечной мерзлоты занимались с середины XX в. Эти вопросы освещены в работах В. П. Солоненко, В. А. Харитонова, С. И. Гриб и многих других [3, 8, 13].

Строительство на вечной мерзлоте, как известно, ведется по двум основным принципам: сохранения мерзлоты в период строительства и эксплуатации здания, оттаивания грунтов основания до начала строительства или в период эксплуатации здания. Первый принцип предпочтительнее, так как, согласно действующей нормативной документации [10], и рекомендациям [6, 7], такое строительство снижает расчетную сейсмичность площадки строительства на 1 балл, что, в свою очередь, уменьшает сейсмические нагрузки на здание в несколько раз.

В современном сейсмостойком строительстве широко распространена система защиты в виде сейсмоизоляции, принципы которой реализованы с помощью различных конструктивных решений и широко применяются на территории РФ и за рубежом. Например, в Японии, где за год происходит более 1000 землетрясений. Анализ последствий землетрясений показывает, что здания, в которых была использована эта система сейсмозащиты, оказались сейсмостойкими. Сейсмоизоляция может быть весьма эффективна и в районах вечной мерзлоты, когда используется принцип сохранения мерзлоты (первый). Известно,

что 1-й принцип реализуется при устройстве проветриваемого подполья, конструктивно для этого используют свайный фундамент с высоким ростверком.

Свайный фундамент в качестве элементов сейсмоизоляции рассмотрен в работах Я. М. Айзенберга [1], А. Т. Аубакирова, Т. А. Белаш и других авторов. Применение этого конструктивного элемента в качестве сейсмоизоляции не требует значительных затрат на устройство и эксплуатацию в отличие от других опорных элементов, однако поскольку конкретных рекомендаций по обоснованию элементов свайного фундамента в качестве сейсмоизоляции в районах вечной мерзлоты нет, необходимы дальнейшие расчетно-теоретические исследования для повышения сейсмостойкости зданий в этих районах.

Расчетно-теоретический анализ возможности использования свайного фундамента с высоким ростверком в качестве сейсмоизоляции

Расчетно-теоретическое исследование производили на примере крупнопанельного здания с жесткой конструктивной системой и фундаментом в виде свай с высоким ростверком. Такие дома широко распространены в районах вечной мерзлоты.

Расчетная схема рассматриваемой системы сейсмозащиты представляла собой одно-массную сдвиговую модель, которая жестко закреплена в основании и имеет шарнирное крепление в верхней части здания (с ростверком). К системе прикладывали продольную силу N от веса здания и поперечную (сейсмическую) силу S .

Задачей исследования было установить возможность обеспечения необходимой податливости свай для реализации принципов сейсмоизоляции, при этом сохранить несущую способность свай.

Чтобы обеспечить гибкость свайного фундамента, необходимо иметь значительную

свободную длину сваи (l). Длина свободной части в расчетных исследованиях варьировалась в диапазоне от 2,5 до 8 м. Конструктивно это можно реализовать с помощью обсадной трубы.

На первом этапе исследования масса здания, приходящаяся на одну сваю, была принята равной 45 т.

Также одной из важнейших характеристик, влияющих на снижение сейсмических нагрузок на здание, является период колебания здания T , определяющийся по формуле

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{k^2},$$

где k – частота колебаний.

Согласно рекомендациям, снижения сейсмической реакции системы, воспринимающей горизонтальные силы, следует достигать путем увеличения основного периода колебаний сейсмически изолированного сооружения, видоизменения основной формы колебаний и увеличения демпфирования или путем комбинации этих эффектов [9].

При этом, согласно исследованиям [12], эффективная настройка зданий с системой сейсмоизоляции находится в диапазоне $T \geq 1,5$ с.

Для реализации рассматриваемого решения использовали типовые сваи прямоугольного сечения с арматурой А500, рекомендуемой [10]. Процент армирования (μ) при этом не должен был превышать 6%.

Для первоначального приближения рассчитана требуемая площадь рабочей арматуры для железобетонной сваи прямоугольного сечения размерами 400 × 400 мм, класс бетона В40. Армирование предполагалось симметричным, расположение арматуры – однорядное. Расчетные характеристики материалов приняты в соответствии с [11].

Расчет выполнен с помощью спектральной методики согласно [10].

Сейсмическая (поперечная) сила, согласно этой методике, принята равной

$$S = m \cdot g \cdot A \cdot \beta \cdot k_{\psi},$$

где $m = 45$ т – масса здания, приходящаяся на одну сваю; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; A – коэффициент, значение которого следует принимать равным 0,1; 0,2; 0,4 для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов, соответственно; β – коэффициент динамичности, вычисляемый по п. 5.6 [10]; $k_{\psi} = 1$ – коэффициент рассеивания энергии, принимаемый по табл. 5 [10].

После определения усилий в элементах от заданных нагрузок была получена зависимость коэффициента армирования железобетонной сваи, вычисленного по [11], и периода колебаний от длины ее свободной части.

На основании первоначальных расчетов получен диапазон допустимых значений для районов с 7-, 8- и 9-балльными землетрясениями.

В первичном приближении получены следующие результаты:

1) свайный фундамент в рассматриваемом конструктивном решении можно использовать в районах 7-балльных землетрясений при $l = 6,65$ м; $\mu = 3,5\%$;

2) при повышении сейсмичности до 8 и более баллов требуемый коэффициент армирования значительно возрастает ($\mu > 10\%$), что ограничивает использование рассматриваемой конструкции.

На следующем этапе расчетного анализа для расширения диапазона использования системы сейсмозащиты коэффициент рассеивания k_{ψ} принимался 0,7, что характеризует введение дополнительных элементов демпфирования.

Расчет с введением дополнительного демпфирования показал, что желаемое увеличение диапазона использования свайного фундамента было достигнуто. В 8-балльных районах появляется возможность реализовать предлагаемое решение при $l = 6,65$ м; $\mu = 3,2\%$. Однако для сейсмичности в 9 баллов использование железобетонных свай с принятыми исходными данными невозможно даже после введения дополнительного демпфирования.

Учитывая результаты первоначального расчета, для более точного анализа и установле-

ния возможности использования рассматриваемой системы сейсмозащиты в 9-балльных зонах в дальнейших исследованиях варьировали массу, приходящуюся на одну сваю ($30 \text{ т} \leq m \leq 60 \text{ т}$), использовали сваи сечением 300×300 и 400×400 мм. Результаты выведены в виде изолиний (рис. 1–3).

По результатам расчетного анализа сделаны следующие выводы:

1) применение железобетонных свай без введения дополнительного демпфирования возможно только в 7-балльной зоне, при этом

масса здания, приходящаяся на одну сваю, ограничивается 50 т, длина свободной части сваи должна быть не менее 6,7 м;

2) введение дополнительного демпфирования значительно расширяет диапазон применения железобетонных свай. При небольшой массе здания – до 35 т на одну сваю – можно использовать сваи сечением 300×300 мм в 7-и 8-балльных районах, длина свободной части сваи при этом должна быть более 5 м. Сваи сечением 400×400 мм можно использовать и в 9-балльных зонах при значительном

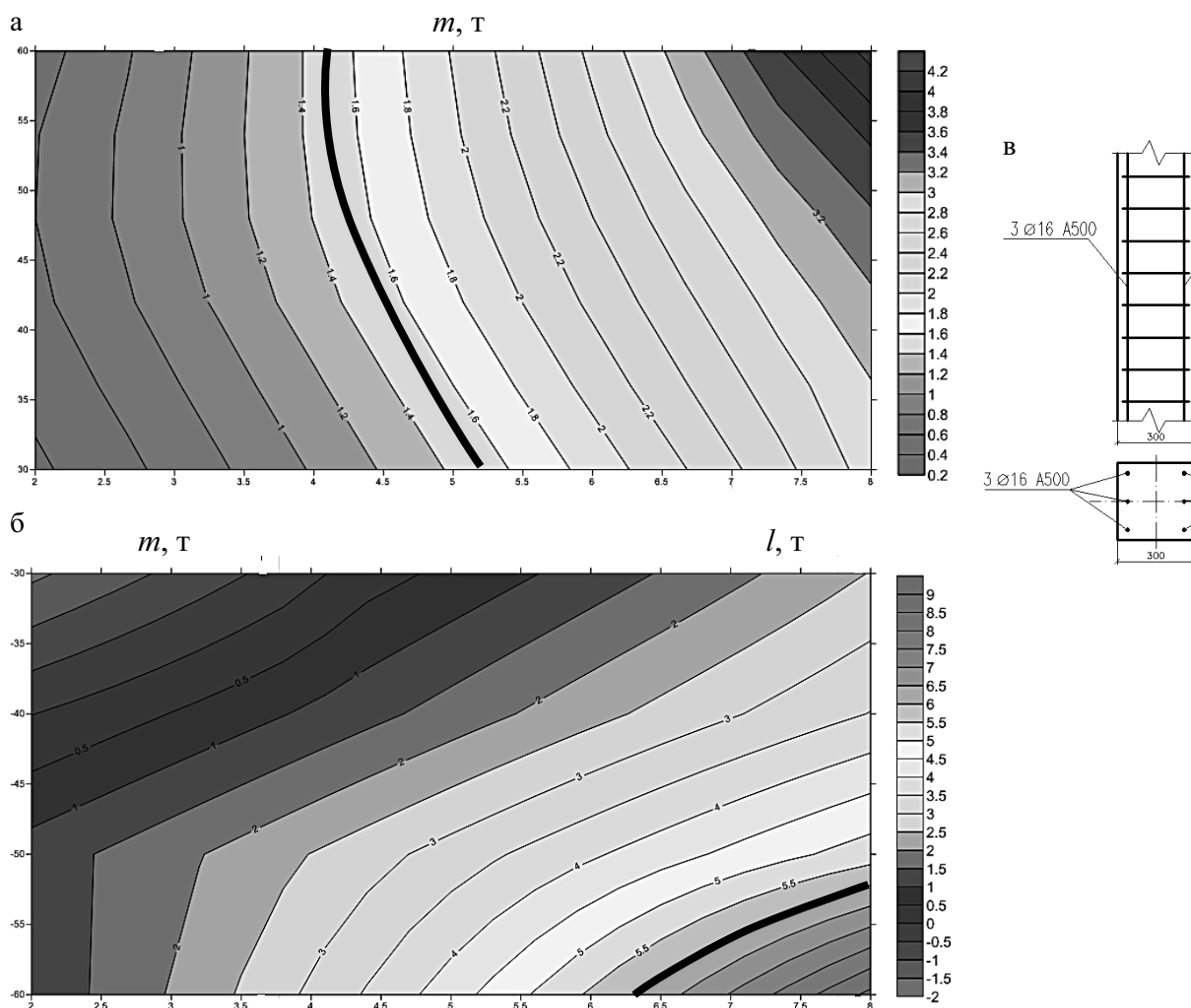


Рис. 1. Периоды колебания здания и процент армирования свай сечением 300×300 мм для сейсмичности 7 баллов с дополнительным демпфированием:

- а) зависимость периода колебаний здания от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; б) зависимость коэффициента армирования от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; в) пример сечения железобетонной сваи длиной 5 м, масса здания, приходящаяся на одну сваю, 35 т, коэффициент армирования 1,3%

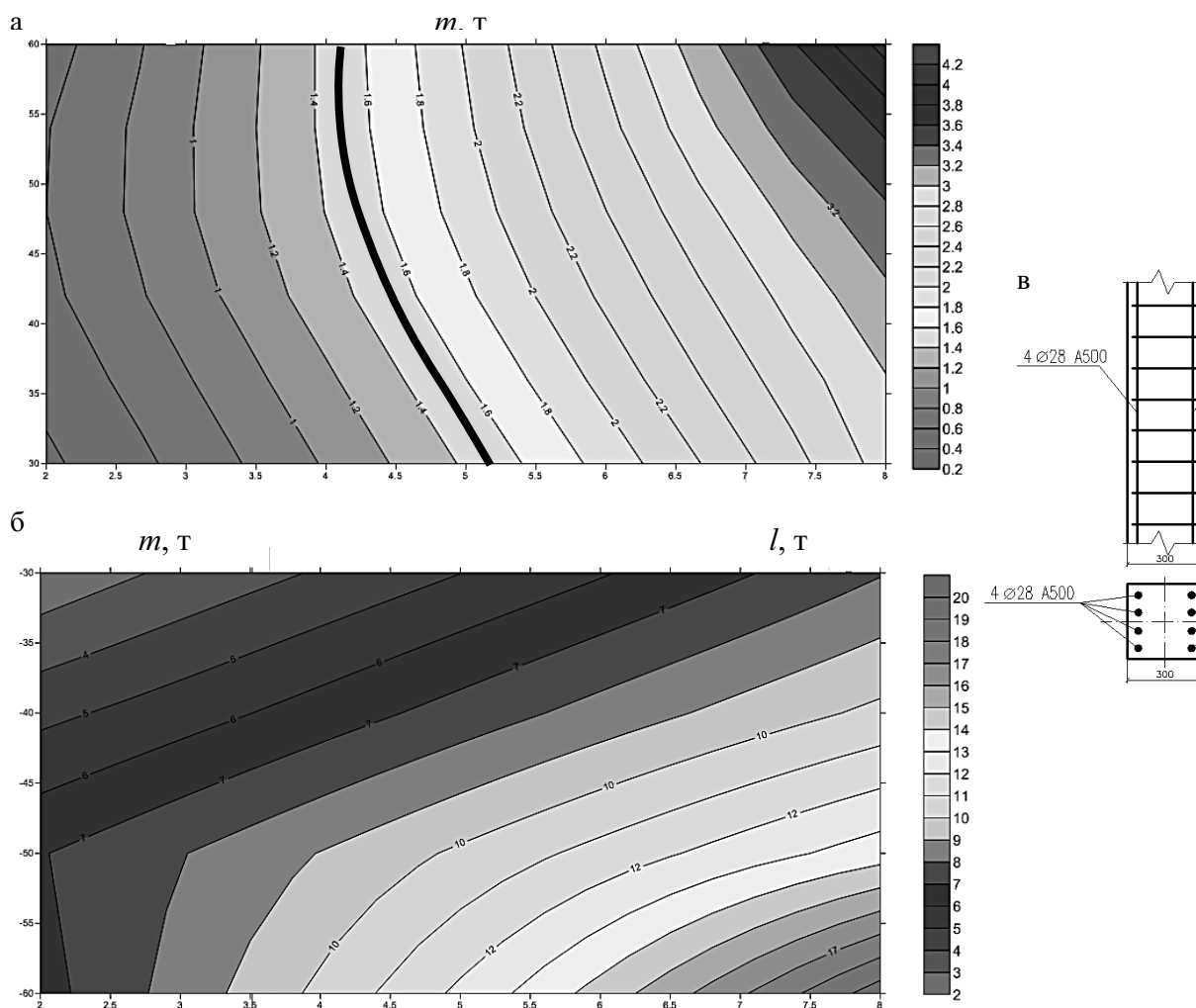


Рис. 2. Периоды колебания здания и процент армирования свай сечением 300×300 мм для сейсмичности 8 баллов с дополнительным демпфированием:
 а) зависимость периода колебаний здания от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; б) зависимость коэффициента армирования от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; в) пример сечения железобетонной сваи длиной 5,5 м, масса здания, приходящаяся на одну сваю, 30 т, коэффициент армирования 5,4 %

снижении массы здания, приходящейся на одну сваю, и при увеличении коэффициента армирования;

3) во всех случаях при увеличении балльности района требуется понижение массы здания на одну сваю и увеличение коэффициента армирования свай. Однако отношение длины свободной части сваи обратно пропорционально массе здания на одну сваю.

Так как использование железобетонных свай в 8- и 9-балльных зонах ограничивается

массой здания, для свайного фундамента в зонах с высокой балльностью рассматривалась возможность применять металлические сваи с оболочками различного сечения.

Для этого были рассмотрены типовые трубы из стали по ГОСТ 8731-87 с расчетным сопротивлением по пределу текучести $R_y = 225$ МПа. Такая сталь позволяет использовать трубы с толщиной стенки 4–36 мм. Кроме того, рассмотрены трубы из стали 10ХСНД по ГОСТ 6713-91 с $R_y = 350$ МПа с толщиной стенки 8–15 мм и из стали 40Х13 по ГОСТ

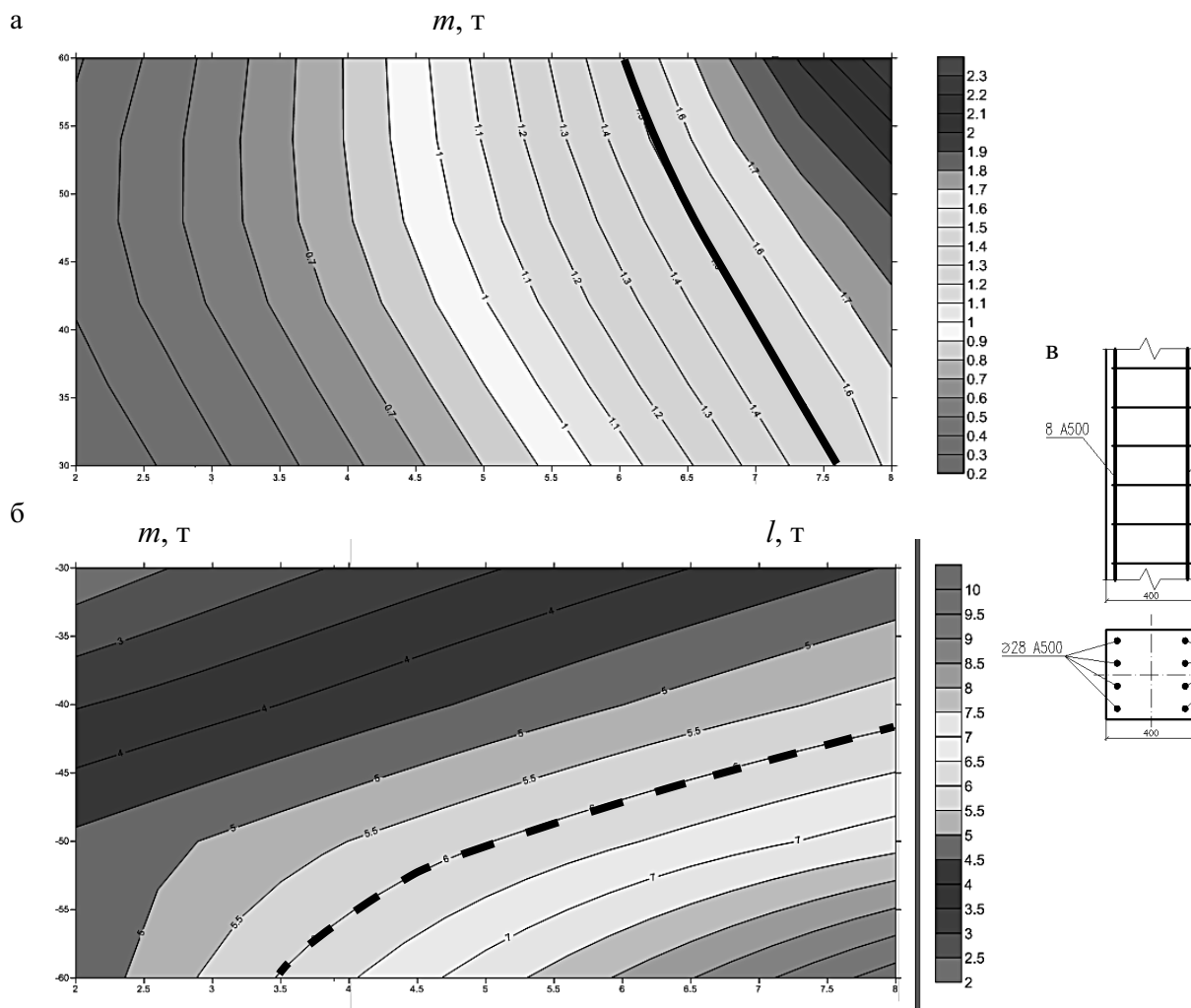


Рис. 3. Периоды колебания здания и процент армирования свай сечением 400×400 мм для сейсмичности 9 баллов с дополнительным демпфированием:

- а) зависимость периода колебаний здания от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; б) зависимость коэффициента армирования от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; в) пример сечения железобетонной сваи длиной 7 м, масса здания, приходящаяся на одну сваю, 35 т, коэффициент армирования 2,8%

5632-72 с $R_y = 1050$ МПа с толщиной стенки до 250 мм. Для расчета были выбраны сечения труб в соответствии с ГОСТ 8732-78. Расчетные усилия определяли согласно принятой методике для железобетонных свай. Результаты представлены на рис. 4, 5.

Анализ показал, что применение металлических свай оболочек с дополнительным демпфированием возможно и при 9 баллах, при этом длина свободной части сваи значительно увеличивается, масса здания также увеличивается в отличие от варианта с при-

менением железобетонных свай. Требования к марке стали возрастают во всех случаях увеличения балльности зоны.

Выбор демпфирующего устройства

Исследования показали, что при различных конструктивных решениях сваи система сейсмозащиты в виде свайного фундамента с высоким ростверком требует введения дополнительных демпфирующих устройств для

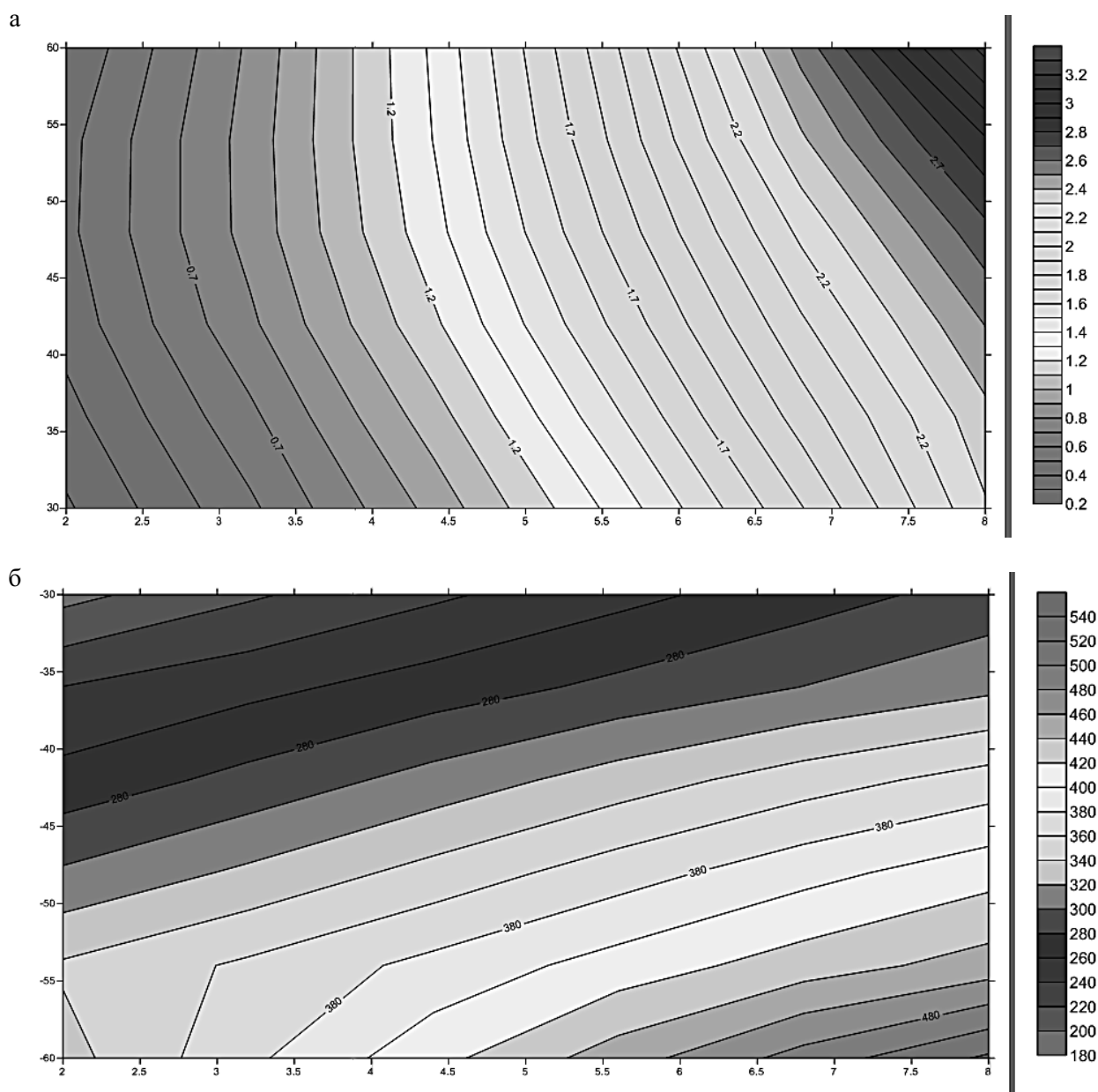


Рис. 4. Результаты расчета стальной сваи с сечением $r = 201$ мм и толщиной стенки 14 мм для сейсмичности 8 баллов с дополнительным демпфированием для свай с расчетным сопротивлением 225 и 350 МПа: а) зависимость периода колебаний здания от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; б) зависимость расчетного сопротивления от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю

надежной работы в условиях высокой балльности (> 7 баллов).

Выбор демпфирующего устройства – важная и сложная задача. Существует множество вязких и сухих демпферов, которые могут обеспечить необходимый коэффициент рассеивания, например, резиновые опорные

части со свинцовым сердечником, демпферы фирм FIP Industriale, ALGA, Vibroseism, Maurer Söhne и др.

В условиях рассматриваемых районов с суровым климатом и особыми грунтовыми условиями следует обратить внимание на некоторые важные аспекты при выборе демп-

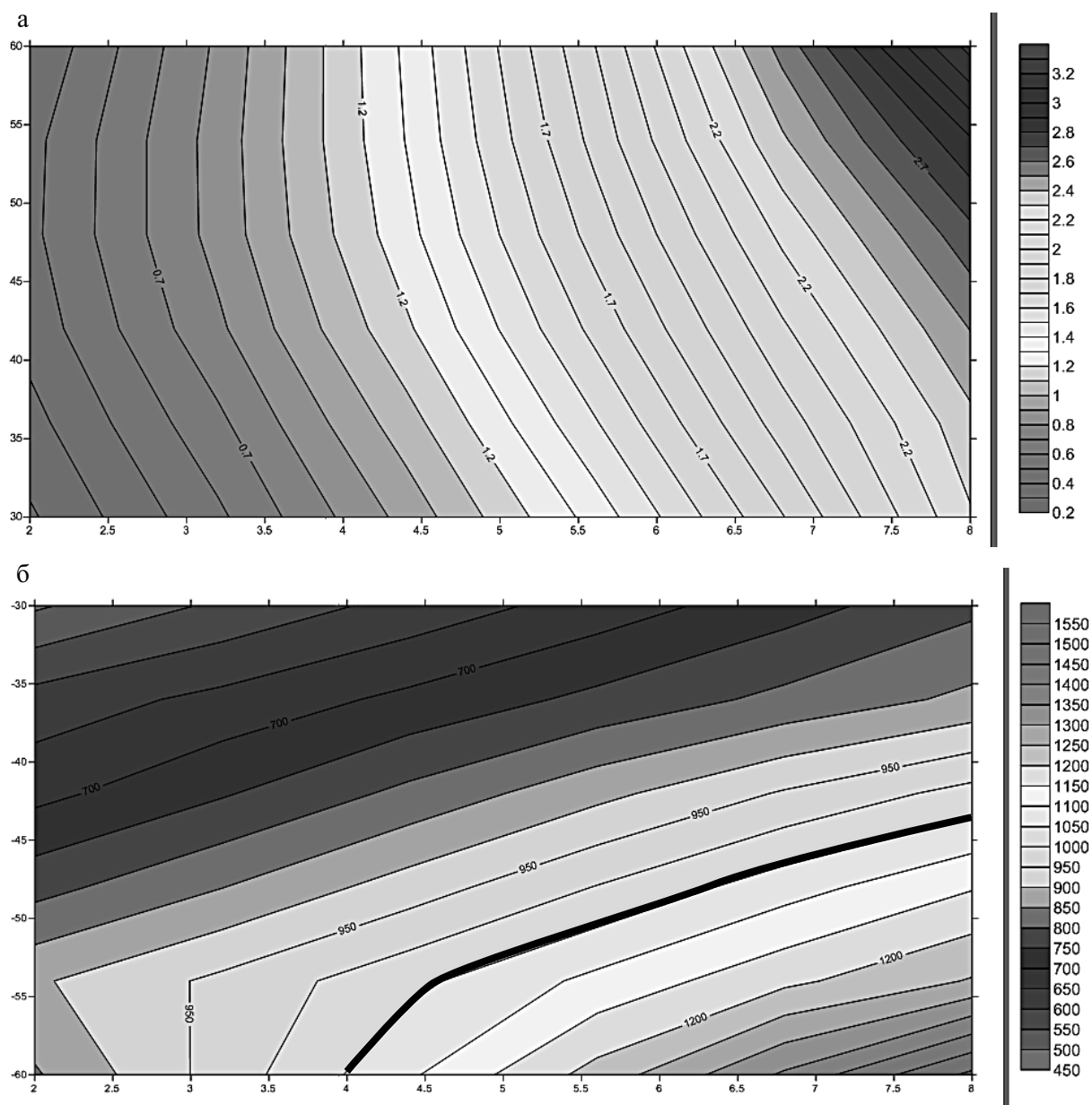


Рис. 5. Результаты расчета стальной сваи с сечением $r = 175,5$ мм и толщиной стенки 12 мм для сейсмичности 9 баллов с дополнительным демпфированием. Толстая черная линия соответствует предельно допустимому напряжению 1050 МПа: а) зависимость периода колебаний здания от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю; б) зависимость расчетного сопротивления от длины свай и массы здания, приходящейся на одну сваю

феров. Работоспособность демпферов вязкого трения может быть ограничена отрицательными температурами. Также, несомненно, вязкие демпферы более дороги и сложны в эксплуатации, что усложняется в суровых климатических условиях и при недостатке квалифицированных кадров. Демпферы гистерезисного

типа намного проще и дешевле в применении, поэтому стоит рассмотреть применение именно их.

При устройстве подполий открытого типа есть вероятность, что демпфирующие устройства занесет снегом, также зачастую подполья подвержены загрязнению бытовыми отходами

и другим мусором, что в итоге может повлиять на работу системы сейсмоизоляции. Устройство закрытых подполий весьма усложнит строительство, что приведет к его удорожанию и другим неблагоприятным последствиям. Необходимо выбрать демпфер, который обеспечит надежность строительства и эксплуатации здания независимо от погодных условий и наличия осадков, отходов.

Также при строительстве на вечной мерзлоте свайный фундамент может неравномерно оседать, что изменит режим нагружения, а это повлияет на работу демпфера, поэтому необходимо использовать демпфер, который обеспечит запроецированный режим работы при подобных изменениях, или демпфер, который может регулировать силу трения.

Несомненно, при всех этих аспектах и одинаково надежной работе демпфера наиболее важны его стоимость и технологичность процесса устройства.

На кафедре «Здания» ФГБОУ ВПО ПУГПС разработаны демпферы гистерезисного типа, которые учитывают все перечисленные факторы.

С учетом исследований автор разработал предложения по реализации принципа сейсмоизоляции, где использована конструкция свайного фундамента с высоким ростверком и с введением элементов дополнительного демпфирования [4, 5].

Заключение

Расчётные исследования по применению свай разной конструкции в сейсмических районах интенсивностью свыше 6 баллов показали, что реализация принципов сейсмоизоляции возможна как для железобетонных, так и для металлических свай. Для обеспечения надежности здания на свайном фундаменте необходимо определить необходимые конструктивные параметры сваи (длину свободной части, процент армирования, марку стали для металлических свай, сечение сваи). При увеличении балльности района строительства

возрастают требования к прочности свай, что влечет за собой увеличение коэффициента армирования для железобетонных свай и предельно допустимых напряжений для стали в металлических сваях. Во всех рассмотренных случаях введение дополнительного демпфирования намного расширяет диапазон применения свай в качестве элементов демпфирования, при этом сохраняется их несущая способность. Одним из наиболее важных факторов при использовании свайного фундамента с высоким свайным ростверком в качестве системы сейсмоизоляции является выбор демпфирующего устройства. Приведенные конструктивные решения демпферов позволяют обеспечить сейсмостойкость зданий в районах вечной мерзлоты при максимальной экономии средств на строительство и эксплуатацию.

Библиографический список

1. Айзенберг Я. М. Системы сейсмоизоляции «свая в трубе» с неупругими выключающимися связями / Я. М. Айзенберг // Архитектура и строительство Узбекистана. – 1988. – № 11. – С. 29–31.
2. Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я. М. Айзенберг. – М. : Стройиздат, 1976.
3. Гриб С. И. Свайные фундаменты на вечномерзлых грунтах в сейсмических районах / С. И. Гриб. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд., 1983. – 152 с.
4. Пат. на полезную модель № 143428 МПК Е 04 Н 9/02, Е 02 D 27/34. Фундамент сейсмостойкого здания / Т. А. Белаш, И. Б. Нудьга, Д. А. Сергеев. Оpubл. 20.07.2014. Бюл. № 20.
5. Пат. на полезную модель № 145799 МПК Е 04 Н 9/02, Е 02 D 27/34. Фундамент сейсмостойкого здания / Т. А. Белаш, И. Б. Нудьга, Д. А. Сергеев. Оpubл. 27.09.2014. Бюл. № 20.
6. Рекомендации по проектированию и устройству ленточных и столбчатых фундаментов зданий транспортного назначения в условиях вечномерзлых грунтов и сеймики / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. стр-ва. – М. : ЦНИИСМинтранстра, 1975. – 63 с.

7. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на вечномёрзлых грунтах / НИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова Госстроя СССР. – М. : Стройиздат, 1980. – 303 с.

8. Солоненко В. П. Сейсмическое районирование Восточной Сибири / В. П. Солоненко, А. А. Тресков, Н. А. Флоренсов // Геология и геофизика. – 1960. – № 10. – С. 104–114.

9. СП. Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила проектирования. – М., 2013.

10. СП 14.13330.2013 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах». – М., 2014.

11. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». – М., 2012.

12. Уздин А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. пособие / А. М. Уздин, С. В. Елизаров, Т. А. Белаш. – М. : ФГОУ «Учеб.-методич. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2012. – 500 с.

13. Харитонов В. А. Сейсмостойкое строительство на вечномёрзлых грунтах / В. А. Харитонов. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд., 1980. – 80 с.

References

1. Aizenberg Ya. M. *Arkhitektura i stroitelstvo Uzbekistana – Architecture and Construction in Uzbekistan*, 1988, no. 11, pp. 29-31.

2. Ayzenberg Ya. M. *Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazyami dlya seysmicheskikh rayonov* [Constructions with the Switching-off Communications for Seismic Countries]. Moscow, Stroyizdat, 1976.

3. Grib S. I. *Svaynyye fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh v seysmicheskikh rayonakh* [Pile Bases on Permafrost Soils in Seismic Countries]. Leningrad, Stroyizdat, Leningr. div., 1983. 152 p.

4. Pat. RF 143428. *Fundament seismostoikogo zdaniya* [Base of Aseismic Building]. T. A. Belash, I. B. Nud'ga & D. A. Sergeev. Publ. 20.07.2014. Bul. no. 20.

5. Patent RF 145799. *Fundament seismostoikogo zdaniya* [Base of Aseismic Building]. T. A. Belash, I. B. Nud'ga & D. A. Sergeev. Publ. 27.09.2014. Bul. no. 20.

6. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu i ustroystvu lentochnykh i stolbchatykh fundamentov zdaniy transportnogo naznacheniya v usloviyakh vechnomerzlykh gruntov i seysmiki* [Recommendations on Design and Setting up of the Strip and Column Bases of Buildings of Transport Purpose in the Conditions of Permafrost Soils and Seismicity]. All-Union Sci. Res. Institute for Transport Construction. Moscow, TsNIIS Mintranstroya, 1975. 63 p.

7. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu osnovaniy i fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh; NII osnovaniy i podzemnykh sooruzheniy im. N.M. Gersevanova Gosstroya SSSR* [Guide to Design of Bases and Foundations on Permafrost Soils. Gersevanov Sci. Res. Inst. of the Bases and Underground Constructions of the Main Construction Directorate of the USSR]. Moscow, Stroyizdat, 1980. 303 p.

8. Solonenko V. P., Treskov A. A. & Florensov N. A. *Geologiya i geofizika – Geol. and Geophys.*, 1960, no. 10, pp. 104-114.

9. SP. *Zdaniya seysmostoykiye i seysmoizolirovannyye. Pravila proyektirovaniya*. [Code of Rules. Aseismic and Seismoisolated Buildings. Rules of Design]. Moscow, 2013.

10. SP 14.13330.2013 “SNiP II-7-81* Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonakh” [Code of Rules 14.13330.2013 “Construction Norms and Regulations of II 7-81* Construction in Seismic Regions”]. Moscow, 2014.

11. SP 63.13330.2012 *Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozheniya*. [Code of Rules 63.13330.2012 “Concrete and Ferroconcrete Designs. Basic Provisions”]. Moscow, 2012.

12. Uzdin A. M., Yelizarov S. V. & Belash T. A. *Seysmostoykiye konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy* [Aseismic Designs of Transport Buildings and Constructions], Manual. Moscow, FGOU “Training Centre for Railway Transport Education”, 2012. 500 p.

13. Kharitonov V. A. *Seysmostoykoye stroitelstvo na vechnomerzlykh gruntakh* [Aseismic Construction on Permafrost Soils]. Leningrad, Stroyizdat, Leningr. div., 1980. 80 p.

СЕРГЕЕВ Денис Андреевич – аспирант, iamfrookt@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).