Оригинальная статья
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-3-11

Повышение надежности легких проветриваемых фундаментов при вибрационной нагрузке на мерзлых грунтах

Михаил А. Тюрин[1]*, Михаил Е. Бочаров[2], Михаил А. Воронцов[2], Анна В. Мельникова[2]
[1]ООО «Газпром Проектирование», Саратов, Российская Федерация, [2]ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Российская Федерация
**mihail0710@yandex.ru*

Михаил А. Тюрин

Михаил Е. Бочаров

Михаил А. Воронцов

Анна В. Мельникова

Резюме. Цель. *Современные фундаменты под технологическое оборудование с динамическими нагрузками часто оказываются переразмеренными с сильно завышенными показателями жесткости, массы и материалоемкости. В связи с этим сокращение затрат и сроков строительства объектов газотранспортной системы, в особенности на вечномерзлых грунтах, является актуальным для ПАО «Газпром». Одним из основных направлений решения указанной задачи является размещение газоперекачивающего оборудования на легких проветриваемых опорных конструкциях. Недостатком таких конструкций является низкая вибрационная устойчивость. Предложен способ [1] для повышения вибрационной устойчивости фундамента при вибрационной нагрузке. Целью моделирования является повышение надежности легких проветриваемых фундаментов, за счет изучения особенностей виброперемещений фундамента с присоединенными железобетонными плитами в зависимости от температурного состояния мерзлых грунтов, параметров присоединяемых плит и соединительных элементов.* **Методы.** *Определение виброперемещений фундамента с присоединенным устройством выполнялось с использованием метода конечных элементов и усовершенствованной расчетной модели системы фундамент-ГПА-грунтовое основание.* **Результаты.** *В результате проведения вычислительных экспериментов определены виброперемещения фундамента в холодное и теплое время года для случаев присоединения железобетонных плит к фундаменту: симметричного и несимметричного; на разном удалении; через соединительные элементы с разными параметрами жесткости; с дополнительными утяжелителями; вмороженных в грунт. Сделаны выводы по результатам моделирования виброперемещений фундамента с присоединенным устройством в холодное и теплое время года.* **Заключение.** *Представленные результаты вычислительных экспериментов по повышению вибрационной устойчивости легких фундаментов за счет применения способа [1] показывают достаточно хорошие показатели уменьшения виброперемещений фундамента. Так, при симметричном присоединении четырех железобетонных плит в летний период эксплуатации уменьшение виброперемещений составляет 42,4 %, а увеличение жесткости соединителей, присоединение дополнительных грузов и вмораживание в грунт железобетонных плит позволят уменьшить виброперемещения фундамента до 2,5 раз. Вместе с тем необходимо отметить, что для практического применения полученных результатов, при разработке проектной документации и строительстве фундаментов необходимо проведение НИОКР, включающих верификацию и сравнение полученных результатов численного моделирования с натурным экспериментом.*

Ключевые слова: *снижение виброперемещений, фундамент ГПА, динамическая нагрузка, соединительный элемент, утяжеление.*

Для цитирования: *Тюрин М.А., Бочаров М.Е., Воронцов М.А., Мельникова А.В. Повышение надежности легких проветриваемых фундаментов при вибрационной нагрузке на мерзлых грунтах // Надежность. 2021. №4. С 3-11. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-3-11*

Поступила *24.03.2021 г.* / **После доработки** *12.11.2021 г.* / **К печати** *14.12.2021 г.*

1. Введение

Современные фундаменты под технологическое оборудование с динамическими нагрузками часто оказываются переразмеренными с сильно завышенными показателями жесткости, массы и материалоемкости. В связи с этим сокращение затрат и сроков строительства объектов газотранспортной системы, в особенности на вечномерзлых грунтах, является актуальным для ПАО «Газпром». Одним из основных направлений решения является размещение газоперекачивающего оборудования на легких проветриваемых опорных конструкциях. Недостатком таких конструкций является низкая виброустойчивость, которая компенсируется устройством массивной железобетонной плиты сверху фундамента, увеличением количества и глубины погружения свай, что приводит к увеличению сроков строительства и материалоемкости фундамента. Повышение вибрационной устойчивости легких опорных конструкций фундамента возможно на основе «Способа повышения динамической жесткости фундамента при вибрационной нагрузке и устройство для его реализации» [1] (далее – Способ).

2. Способ

Способ предусматривает присоединение к фундаменту дополнительной конструкции через соединительные элементы для передачи динамических нагрузок от фундамента на грунтовое основание, за счет этого уменьшаются виброперемещения фундамента, это снижает стоимость вибрационной защиты фундамента при минимальных грунтовых работах. В качестве дополнительной конструкции в статье рассмотрено присоединение железобетонных плит (далее – ЖБплита), для передачи динамических нагрузок от фундамента на грунтовое основание (рис. 1). За счет этого виброперемещения фундамента уменьшаются, а стоимость вибрационной защиты фундамента при минимальных грунтовых работах снижается. При этом размещение

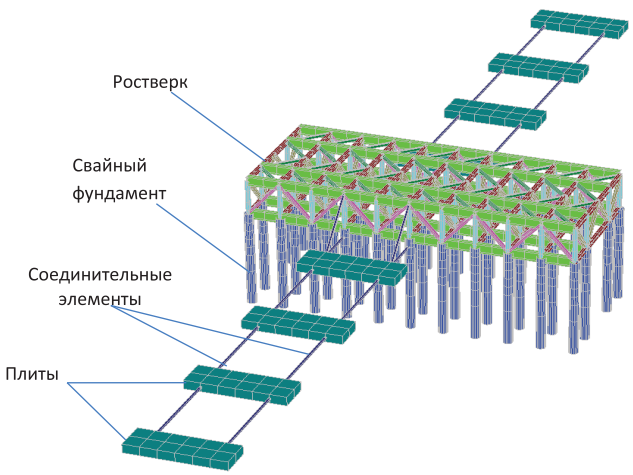


Рис. 1. Схема присоединения к фундаменту железобетонных плит

ЖБплит на поверхности грунтового основания без заглубления в грунт минимизирует проблемы растепления мерзлых грунтов на этапе эксплуатации.

Для повышения эффекта от применения Способа предусматривается: утяжеление присоединяемых ЖБплит и намораживание грунта, а также подбор параметров (жесткости, геометрических размеров, расположения в пространстве) соединительных элементов и присоединяемых ЖБплит для передачи упругих колебательных волн в грунтовый массив.

Разработан ряд расчетных моделей по определению виброперемещений фундамента газоперекачивающего агрегата (далее – ГПА) «Урал» мощностью 25 МВт от воздействия динамической нагрузки на примере грунтового основания с мерзлотой сливающегося типа. Мерзлота сливающегося типа характеризуется тем, что оттаивающий за лето слой полностью промерзает в течении холодного сезона, образуя при этом единый мерзлый массив. Виброперемещения фундамента определялись в усовершенствованной расчетной модели грунтового основания [2, 3]. Данные для определения динамической нагрузки от вращения роторов ГПА-25 «Урал» приведены в табл. 1. Эксцентриситет роторов для демонстрации результатов моделирования принят условно по данным опытных наблюдений e = 1,5 мкм или 0,0015 мм, этот параметр зависит от точности изготовления ротора.

Табл. 1. Данные для определения динамической нагрузки

Наименование движущихся деталей	Масса, кг	Частота вращения		Центробежная сила, Н
		n, об./мин	ω, рад./сек	
Ротор силовой турбины (СТ), m_3	670	5250 5000 3500	550 523 366	314 284 139
Ротор турбины низкого давления (ТНД), m_1	753	4600 4300 3200	481 450 335	270 236 131
Ротор компрессора высокого давления (КВД), m_2	410	12000 11670 10150	1256 1221 1062	1003 947 717
Трансмиссия ГТУ, m_4	160	5250 5000 3500	550 523 366	75 68 33
Ротор нагнетатель, m_5	1350	5250 5000 3500	550 523 366	633 572 280

Одновременное воздействие на фундамент от вращающихся с разными скоростями роторов представляет собой полигармоническое силовое воздействие [4], (рис. 2). Суммарная амплитуда колебаний определяется сложением составляющих виброперемещения от каждого источника по отдельности.

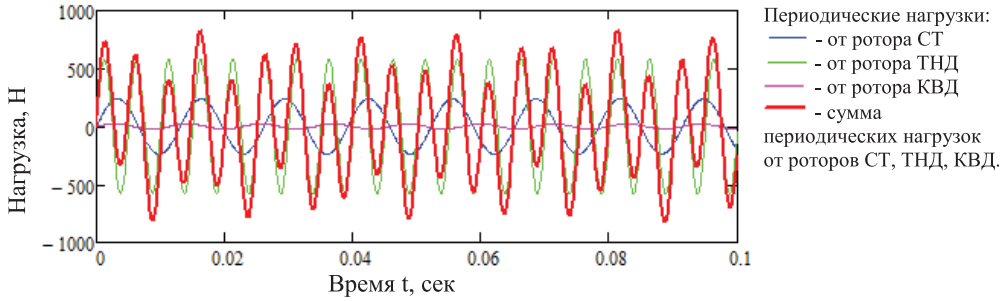


Рис. 2. Графики периодических нагрузок, действующих на опору двигателя

$$\sum_{i=1}^{n} y_i = A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2) + A_3 \sin(\omega_3 t + \delta_3) + A_4 \sin(\omega_4 t + \delta_4) + A_5 \sin(\omega_5 t + \delta_5) \quad (1)$$

где: $A_1, A_2, \ldots, A_5$ – амплитуды колебаний от воздействия периодических нагрузок $P_1, P_2, \ldots, P_5$; $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_5$ – фазовые углы; $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_5$ – угловые частоты воздействия источников периодических нагрузок.

Для получения результатов вычислительного эксперимента достаточно определить одну из составляющих виброперемещения фундамента, например, от воздействия периодической нагрузки: $P_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t)$, где $P_3 = m_3 \cdot e_3 \cdot \omega_3^2$ – динамическая нагрузка от вращения ротора силовой турбины, Н [5], ω_3 – круговая частота вращения роторов, 1/с, t – время, с.

Виброперемещения определялись для наиболее теплого и холодного времени года соответственно для случаев:

I. Симметричного и несимметричного присоединения ЖБплит;

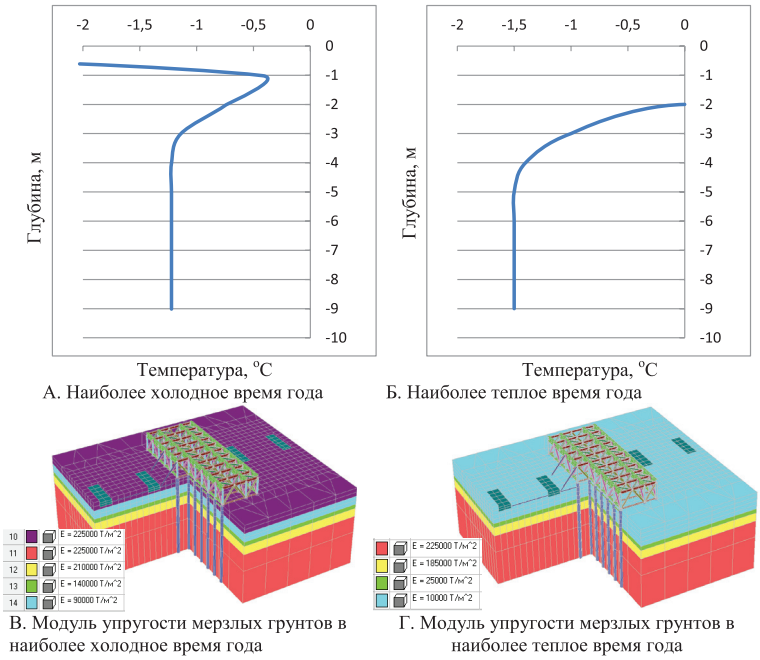
II. Присоединения ЖБплиты, удаленной от центральной оси фундамента на расстояние от 5,25 м до 23,25 м;

III. Присоединения ЖБплиты через соединительные элементы с коэффициентами жесткости K от $175560 \cdot 10^3$ до $2251200 \cdot 10^3$ $(Н \cdot м^2)/м^2$, где $K = E \cdot S$, E – модуль упругости материала соединителя, Па, S – площадь поперечного сечения соединителя, м^2;

IV. Размещения утяжелителей на поверхности ЖБплиты;

V. Смерзания грунта с ЖБплитой.

Конструкция ростверка и свайного поля под ГПА принята такая же, как на компрессорных станциях № 2 «Олекминская» и № 6 «Сковородинская» магистрального газопровода «Сила Сибири». Фундамент состоит из стального надземного ростверка массой 77,6 т и свайного поля в количестве 44 свай из труб диаметром 426 мм с толщиной стенки 9 мм из стали марки 09Г2С, (глубина погружения свай – 12 м, масса одной сваи – 1158 кг). Грунтовое основание до глубины 3-х метров представляет собой насыпной грунт в виде песка средней крупности. Ниже глубины 3-х метров залегают суглинки льдистые в твердомерзлом состоянии. В летний период верхний слой грунта оттаивает до глубины 2-х метров, в конце зимы грунтовое основание, включая верхний слой насыпных грунтов, находится в твердомерзлом состоянии. Температура грунтов на глубине 12-ти метров от уровня планировки составляет минус 1,5°С. Распределение температур и модулей упругости мерзлых грунтов по глубине грунтового основания для наиболее теплого и холодного времени года приведено на рис. 3.



А. Наиболее холодное время года

Б. Наиболее теплое время года

В. Модуль упругости мерзлых грунтов в наиболее холодное время года

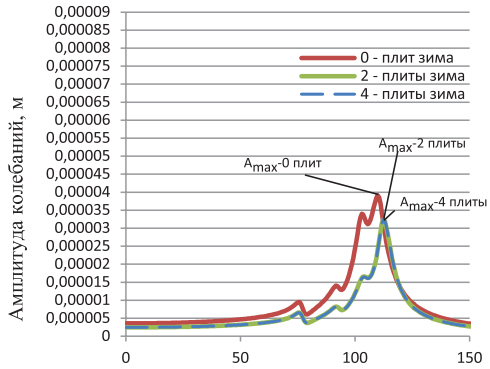
Г. Модуль упругости мерзлых грунтов в наиболее теплое время года

Рис. 3. Распределение температур и модулей упругости мерзлых грунтов по глубине основания

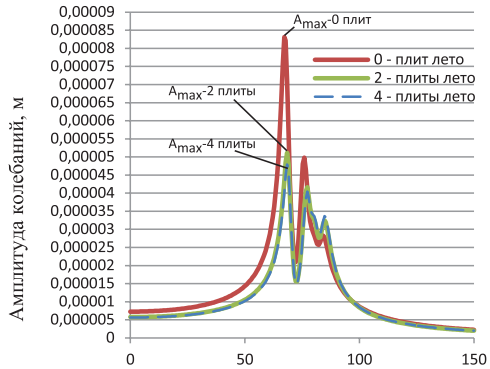
3. Симметричное и несимметричное присоединение устройства

Рассмотрим результаты моделирования с симметричным присоединением устройства [1] к фундаменту в летнее и зимнее время. На рис. 4 приведены результаты определения амплитуд колебаний фундамента от воздействия одной из составляющей суммарной периодической нагрузки $P_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t)$.

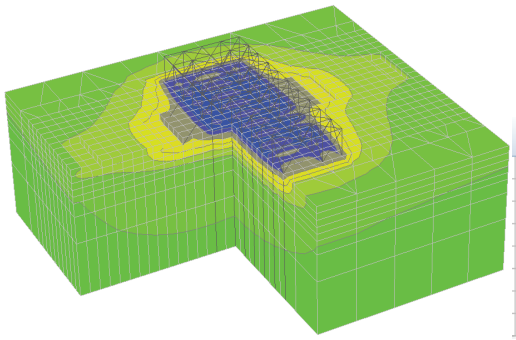
Из графиков на рис. 4А и рис. 4Б видно, что симметричное присоединение 2-х ЖБплит в зимний период уменьшает максимальную амплитуду колебаний A_{max} на 17,2 %, при этом увеличение количества присоединяемых плит с

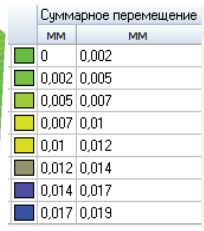


А. АЧХ фундаментов в зимнее время

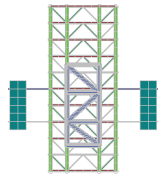


Б. АЧХ фундаментов в летнее время

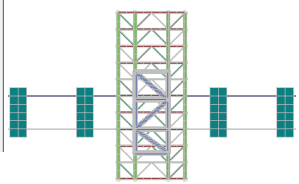




В. Виброперемещение частиц грунтового основания

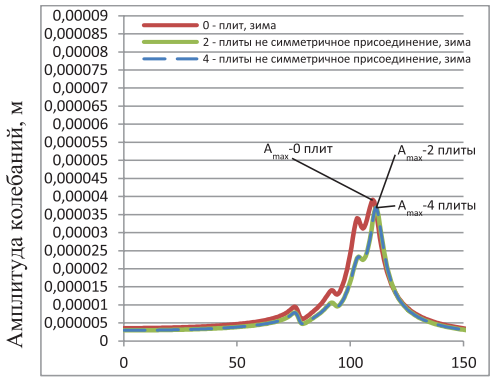


Г. 2 – плиты

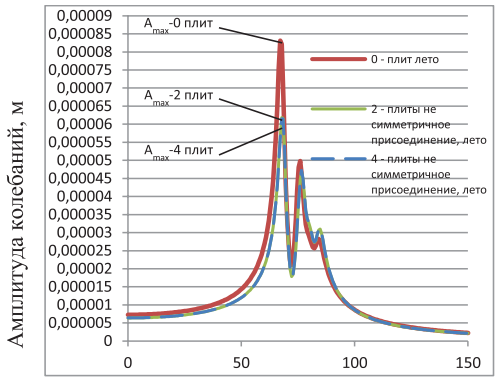


Д. 4 – плиты

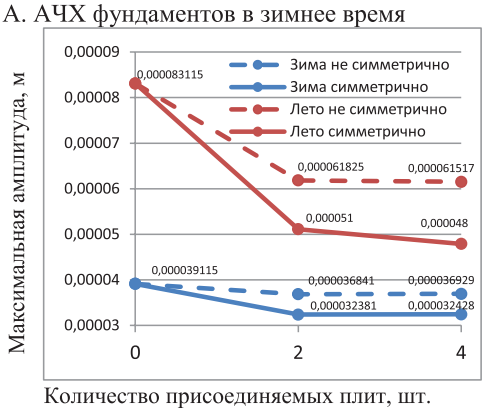
Рис. 4. Определение амплитуд колебаний фундамента с симметрично присоединенными ЖБплитами



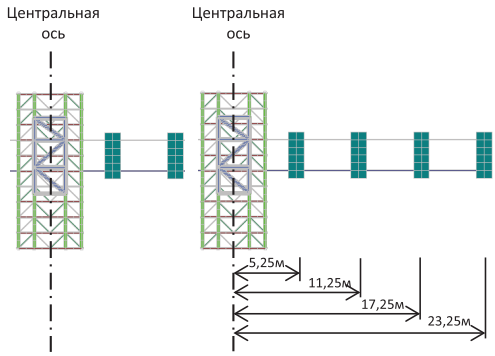
А. АЧХ фундаментов в зимнее время



Б. АЧХ фундаментов в летнее время

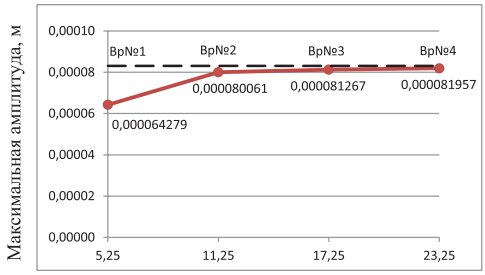


В. Сравнение A_{max}

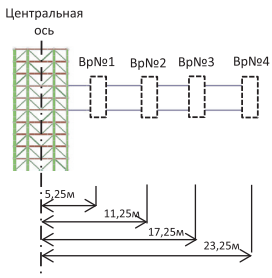


Г. 2 – ЖБплиты Д. 4 – ЖБплиты

Рис. 5. Сравнения АЧХ фундаментов с не симметрично присоединенными ЖБплитами

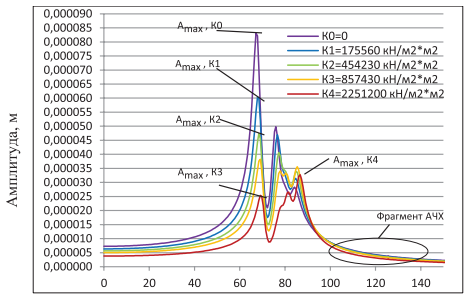


А. Кривая зависимости A_{max} от длины соединителя



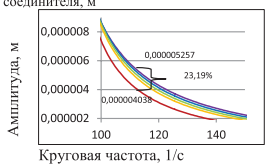
Б. Варианты присоединения

Рис. 6. Сравнение Amax для четырех вариантов присоединения, разно-удаленных ЖБплит



А. АЧХ для пяти вариантов жесткости соединителей

Условные обозначения:
$K_n=E\cdot A_n$ – n-й вариант коэф-та жесткости соединителя, кН/м$^2\cdot$м^2;
n – номер варианта коэффициента жесткости от 0 до 4;
E – модуль упругости материала соединителя, Па;
A_n – площадь поперечного сечения соединителя, м^2



Б. Фрагмент АЧХ в диапазоне от 100 до 150 1/с

В. Кривая зависимости Amax от коэффициента жесткости соединительных элементов

Г. Кривая зависимости λ_{Amax} от коэффициента жесткости соединительных элементов

Рис. 7. Зависимость АЧХ фундамента от коэффициента жесткости соединителей

2-х до 4-х практически не влияет на изменение A_{max}. В то же время, присоединение 2-х и 4-х ЖБплит в летний период уменьшает A_{max} на 38,5 % и 42,4 % соответственно.

В виду плотного расположения технологического оборудования может быть целесообразным и несимметричное присоединение ЖБплит к фундаменту, например, только с одной стороны (рис. 5). В этом случае при одинаковом количестве присоединяемых ЖБплит по результатам моделирования наблюдается уменьшение виброперемещений в зимнее время на 5,8 %, в летнее время на 25,6 %.

По результатам моделирования увеличение количества несимметрично присоединяемых ЖБплит с 2-х до 4-х не влияет на изменение A_{max} как в летний так и в зимний период эксплуатации. Таким образом несимметричное присоединение более 2-х ЖБплит нецелесообразно (см. рис. 5В). Позитивный эффект от несимметричного применения ЖБплит меньше на 16,8…32,8 % по сравнению с симметричной схемой, но достоинством этой схемы является ее универсальность в применении, особенно при плотном расположении технологического оборудования вокруг фундамента ГПА.

4. Присоединение ЖБплит на разном удалении от центральной оси фундамента

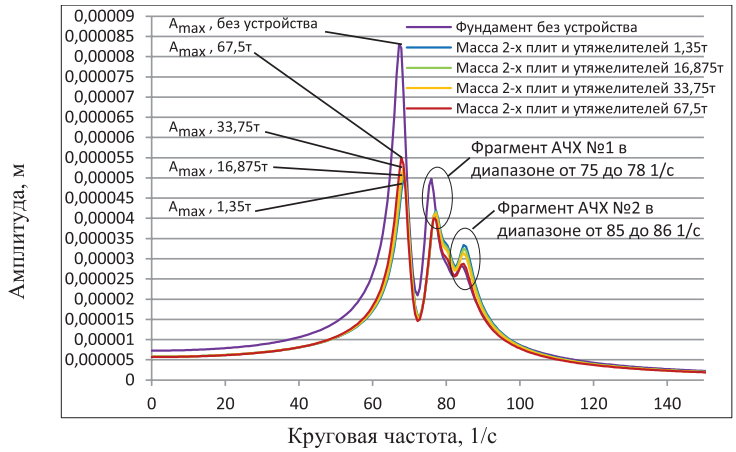
Рассмотрим A_{max} для четырех вариантов присоединения одной ЖБплиты на расстоянии от центральной оси фундамента 5,25 м, 11,25 м, 17,25 м и 23,25 м (рис. 6). Присоединение ЖБплиты на расстоянии 5,25 м уменьшает A_{max} на 22,7 %, при этом присоединение такой же плиты на расстояниях 11,25 м, 17,25 м, 23,5 м уменьшает амплитуду колебаний соответственно на 3,7 %, 2,2 % и 1,4 %. Таким образом, при увеличении длины соединительного элемента в 4 раза происходит потеря эффекта уменьшения амплитуд колебаний в 16 раз.

Эффективность работы соединительного элемента с коэффициентом жесткости 452760 ($Н\cdot м^2$)/$м^2$ (из квадратной трубы 90 х 90 мм с толщиной стенки 7 мм) при расстояниях ЖБплиты от оси фундамента более 10 м и 20 м составляет менее 5 % и 2 % соответственно. Очевидно, что для повышения эффекта от присоединения ЖБплит целесообразно увеличивать жесткость соединителей.

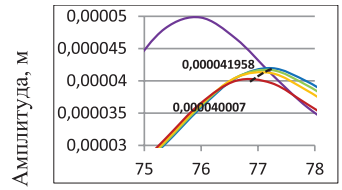
5. Присоединение ЖБплит через соединительные элементы с разными коэффициентами жесткости

По результатам сравнения АЧХ фундаментов с симметрично присоединенными ЖБплитами с коэффициентами жесткости соединителей от 175560 кН/м$^2\cdot$м^2 до 2251200 кН/м$^2\cdot$м^2 построены кривые зависимости A_{max} и λ_{Amax} от жесткости соединителей на рис. 7В, Г, где: λ_{Amax} – соответствующая A_{max} частота собственных колебаний фундамента. При увеличении жесткости соединителей, начиная от нулевого значения и до 2251200 кН/м^2*м^2, A_{max} уменьшается в 2,53 раза, при этом λ_{Amax} увеличивается на 28,97 %. В диапазоне частот от 100 до 150 1/с уменьшение амплитуд колебаний составляет более 23 % (см. рис. 7Б).

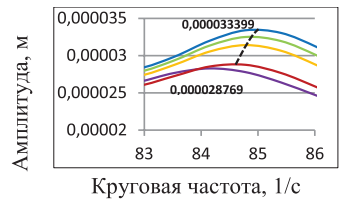
Таким образом, подход, связанный с увеличением жесткости соединительных элементов, хорошо применим для ГПА с круговой частотой воздействия динамических нагрузок более 100 1/с, например, для газотурбинных ГПА.



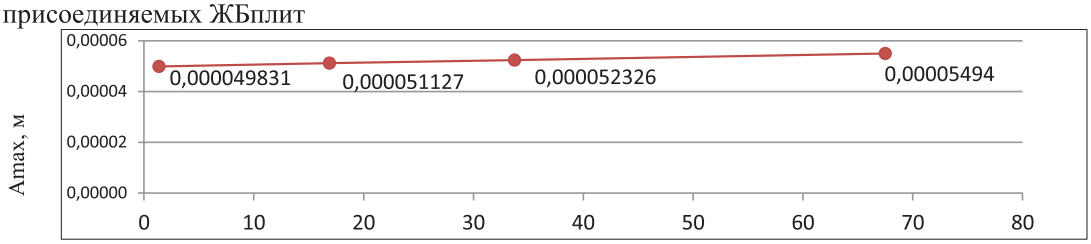
А. АЧХ фундамента для 4-х вариантов утяжеления присоединяемых ЖБплит



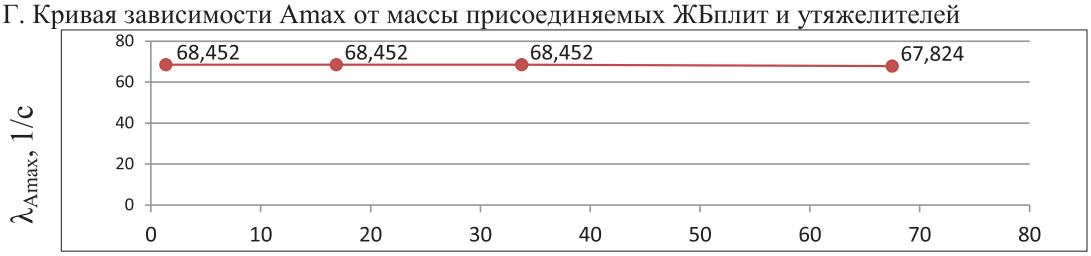
Б. Фрагмент АЧХ №1



В. Фрагмент АЧХ №2



Г. Кривая зависимости Amax от массы присоединяемых ЖБплит и утяжелителей



Д. Кривая зависимости λ_{Amax} от массы присоединяемых ЖБплит и утяжелителей

Рис. 8. Зависимость АЧХ фундамента от массы присоединяемых ЖБплит и утяжелителей

6. Размещение утяжелителей на поверхности ЖБплиты

По результатам анализа амплитудно-частотных характеристик увеличение общей массы $M_{ут}$ двух симметрично присоединяемых к фундаменту ЖБплит с утяжелителями не влияет на уменьшение A_{max}, а наоборот, в диапазоне частот от 67,5 до 68,45 1/с, при увеличении $M_{ут}$ с 1,35 т до 67,5 т увеличение A_{max} составляет 9,3 %, при этом λ_{Amax} уменьшается на 0,93 %. В то же время в диапазоне частот от 76 до 78 1/с наблюдается уменьшение максимальной амплитуды колебаний на 3,73 % и соответствующей ей частоты на 0,819 %, аналогично в диапазоне частот от 83 до 86 1/с (см. рис. 8Б, В).

По результатам АЧХ увеличение массы присоединяемых ЖБплит в диапазоне частот до 70 1/с не позволяет уменьшить A_{max}, в то же время в диапазоне частот от 76 до 78 1/с увеличение массы ЖБплит с 1,35 до 67,5 т уменьшает A_{max} на 3,7 %, а для частот от 83 до 87 1/с уменьшение A_{max} составляет 16,1 %.

Увеличение массы присоединяемых ЖБплит достаточно эффективно работает для ГПА с круговой частотой вращения роторов более 83 1/с что соответствует примерно 800…850 оборотам в минуту. При этом для ГПА с частотой вращения роторов менее 800…850 оборотов в минуту наблюдается обратный эффект, связанный с увеличением амплитуды колебаний.

7. Смерзание грунта с ЖБплитой

Определены АЧХ фундамента с присоединенными ЖБплитами для вариантов смерзания грунтового основания с ЖБплитой до глубины 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, 2 м, 2,5 м (рис. 9). Смерзание поверхности ЖБплиты с грунтовым основанием обеспечивается за счет работы хладагентов, проходящих через специальные полости, размещенные внутри плиты [1]. Также смерзание может быть обеспечено системой горизонтальной термостабилизации грунтов [6].

По результатам сравнения АЧХ фундамента с присоединенными ЖБплитами для пяти вариантов смерзания и случая, когда смерзания нет, наблюдается уменьшение $\lambda_{A\max}$ на 21,1 % и на 17,2 % при глубине смерзания грунта с ЖБплитой соответственно 0,5 м и 2,5 м, рис. 10В.

Необходимо отметить, что с одной стороны, увеличение объема смерзания грунта с ЖБплитой увеличивает присоединяемую массу мерзлого грунта, оказывая влияние на уменьшение частоты собственных колебаний фундамента, а с другой стороны, с увеличением объема смерзания увеличиваются жесткость системы фундамент-ЖБплита и частота собственных колебаний. При смерзании компонентов грунта с ЖБплитой на глубину 0,5 и 2,5 меторов происходит увеличение $A_{\max}$ на 118,1 % и 46 % соответственно (см. рис. 10Б).

По результатам расчетного моделирования и численных экспериментов определены АЧХ фундамента для случаев: симметричного и несимметричного присоединения устройства, присоединение включающего разное количество ЖБплит на разных расстояниях с различными коэффициентами жесткости соединительных элементов, а также с размещением утяжелителей на поверхности ЖБплиты и с учетом глубины смерзания ЖБплиты и грунтового основания.

Необходимо отметить, что лучший эффект в виде уменьшения параметров $A_{\max}$ и $\lambda_{A\max}$ при присоединении ЖБплит достигается при их симметричном присоединении к фундаменту (см. рис. 5Б).

Повысить эффект возможно за счет увеличения жесткости соединительных элементов (см. рис. 7В), или уменьшения расстояния присоединяемой ЖБплиты от фундамента, если это возможно из условий размещения технологического оборудования (см. рис. 6А). В этом случае достижение желаемого результата возможно и при несимметричном расположении ЖБплит (см. рис. 5В, Г).

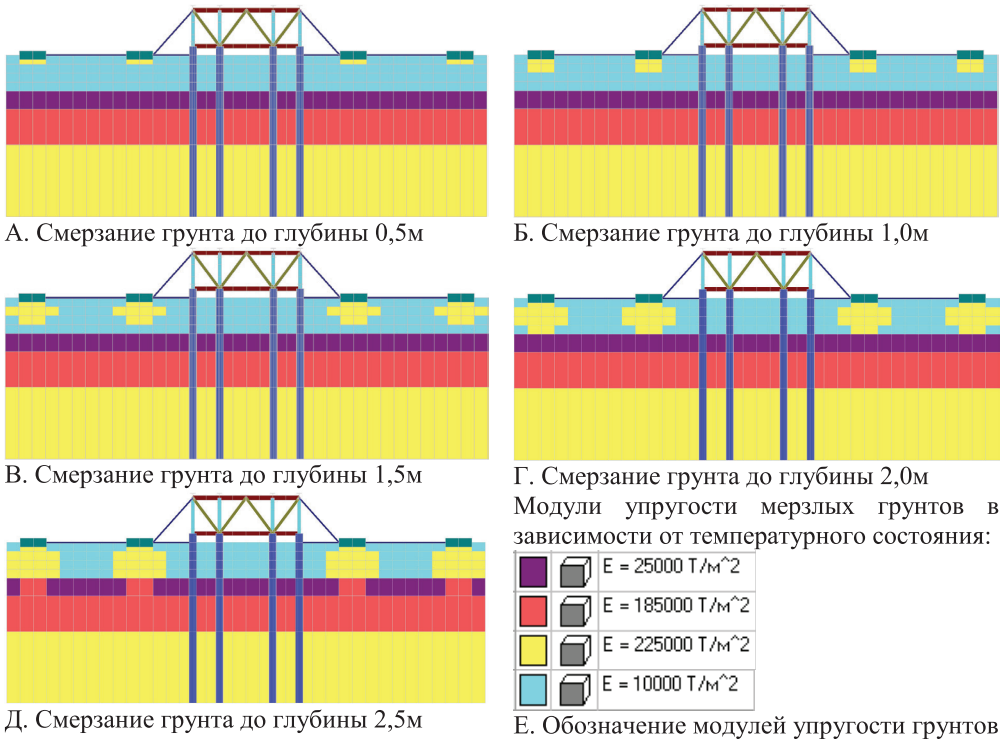
Увеличение массы присоединяемых ЖБплит за счет присоединения утяжелителей или намораживания грунта [1] также позволяет повысить эффект по уменьшению параметров $A_{\max}$ и $\lambda_{A\max}$, но только в диапазоне частот выше 1000 оборотов в минуту, это можно применять для газотурбинных ГПА с минимальной рабочей частотой вращения роторов 3000…3500 об/мин. В то же время для механизмов с частотой вращения 1000 об/мин и менее применение данного подхода требует проведения дополнительных научных исследований.

8. Заключение

Рассмотренный в статье Способ отличается простотой и повышенной надежностью, так в качестве утяжелителей для ЖБплит возможно использовать бетонные блоки, строительные смеси, сцементированный песок и т.д.

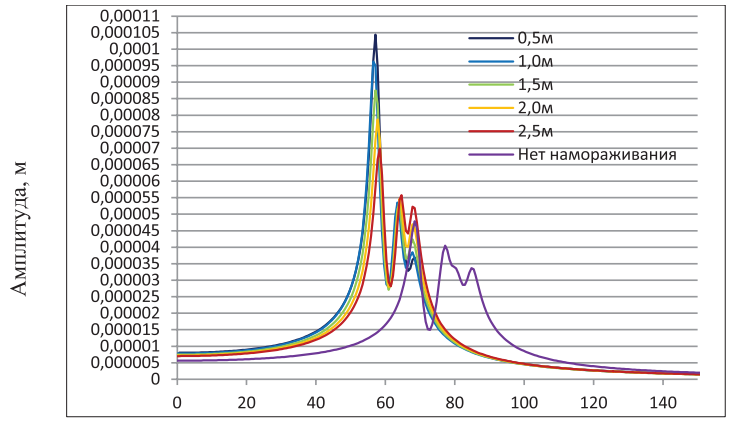
Результатами исследования выявлено, что при симметричном присоединении четырех железобетонных плит в летний период эксплуатации уменьшение виброперемещений составляет 42,4 %, а увеличение жесткости соединителей, присоединение дополнительных грузов и вмораживание в грунт железобетонных плит позволят уменьшить виброперемещения фундамента до 2,5 раз. Моделирование по определению надежности показало эффективность Способа в холодное и теплое время года:

- при симметричном и несимметрично присоединении ЖБплит;



А. Смерзание грунта до глубины 0,5м
Б. Смерзание грунта до глубины 1,0м
В. Смерзание грунта до глубины 1,5м
Г. Смерзание грунта до глубины 2,0м
Д. Смерзание грунта до глубины 2,5м
Модули упругости мерзлых грунтов в зависимости от температурного состояния:
Е. Обозначение модулей упругости грунтов

Рис. 9. Варианты глубины смерзания грунта с ЖБплитой

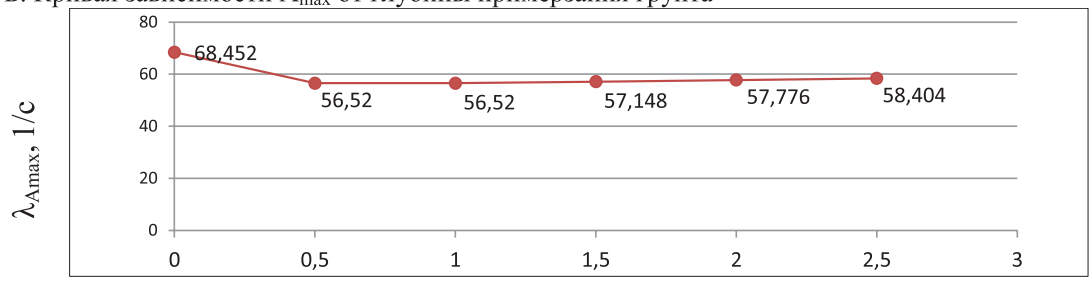


Круговая частота, 1/с

А. АЧХ для пяти вариантов глубины смерзания грунта под ЖБплитой

Глубина смерзания грунта от низа плиты, м

Б. Кривая зависимости A_{max} от глубины примерзания грунта



Глубина смерзания грунта от низа плиты, м

В. Кривая зависимости λ_{Amax} от глубины смерзания грунта

Рис. 10. Зависимость АЧХ фундамента от гдубины смерзания грунта с ЖБплитой

• на разном удалении ЖБплит друг от друга и от фундамента;

• при использовании соединительных элементов с разными параметрами жесткости;

• с использованием дополнительных утяжелителей;

• при смерзании с грунтом.

Исследования в области повышения надежности фундаментов при вибрационной нагрузке проводятся не только в нашей стране, но и за рубежом [7, 8, 9, 10, 11].

В заключение необходимо отметить, что для практического применения Способа предстоят дополнительные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, т.к., приведенные результаты вычислительных экспериментов показывают достаточно хорошие показатели уменьшения випроперемещений фундамента. Вместе с тем необходимо отметить, что для практического применения полученных результатов при разработке проектной документации и строительстве фундаментов необходимо проведение НИОКР, включающих верификацию и сравнение полученных результатов численного моделирования с натурным экспериментом.

Библиографический список

1. Тюрин М.А., Бочаров М.Е., Клейменов Е.А. Способ повышения динамической жесткости фундамента при вибрационной нагрузке и устройство для его реализации. Пат. №2687211 // Российская Федерация, МПК E02D 31/08. Заявитель и патентообладатель ООО «Газпром проектирование». – 2018137569; заявл. 2018.10.25; опубл. 2019.05.07.

2. Тюрин М.А., Воронцов М.А. Исследование динамических нагрузок на фундамент при работе газоперекачивающих агрегатов // Технологии нефти и газа. 2016. № 2. С. 45-50.

3. Тюрин М.А., Клейменов Е.А., Рябов В.А. и др. Математическое моделирование легких фундаментов ГПА с учетом грунтовых условий Ямала и Восточной

Сибири // Научный журнал российского газового общества. 2016. № 2. С. 27-32.

4. Тюрин М.А., Бочаров М.Е. Исследование воздействия динамических нагрузок на легкие фундаменты газоперекачивающих агрегатов в сложных геологических условиях // Сборник статей заочной научной конференции молодых ученых и специалистов предприятий газовой промышленности и учебных заведений Саратовской области «Новые технологии в газовой промышленности». Саратов, 21 декабря 2016. С. 76-79.

5. Тюрин М.А., Козлов С.И. Применение легких проветриваемых фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях Ямальской группы месторождений // Территория Нефтегаз. 2013. № 10. С. 62-70.

6. Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А. и др. Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений // Геотехника. Международный журнал. 2010. № 6. С. 4-22.

7. Ataulla Attar, Shahbaz Dandin. Economical Method of Reducing vibration on Machine Foundation // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2015. P. 89-97.

8. H. van Koten. Vibrations of machine foundations and surrounding soil// Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 2012. No. 1. P 29-54.

9. Rajib Ul Alam Uzzal. Dynamic response of a beam subjected to moving load and moving mass supported by Pasternak foundation // Journal of Shock and Vibration, Concordia Center for Advanced Vehicle Engineering, Mechanical and Industrial Engineering Department, Concordia University, Montreal, Canada. 2012. P. 205–220.

10. Galal A. Hassaan. Optimal Design of Machinery Shallow Foundations with Silt Soils // International Journal of Mechanical Engineering. 2014. Issue 3. P. 11–24.

11. George Gazetas. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Polytechnic lnstitute, Troy, New York, USA. 1983. Vol. 2. No. 1. P. 2-42.

Сведения об авторах

Тюрин Михаил Александрович – кандидат технических наук, руководитель группы прочностных расчетов отдела строительного проектирования Саратовского филиала ООО «Газпром проектирование», улица Сакко и Ванцетти, 4 , Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: mihail0710@yandex.ru.

Бочаров Михаил Евгеньевич – кандидат технических наук, начальник отдела стандартизации цифровых процессов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: bocharov.me@yandex.ru.

Воронцов Михаил Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории промысловых компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: m_vorontsov@list.ru.

Мельникова Анна Валерьевна – кандидат технических наук, главный специалист лаборатории предиктивного моделирования поврежденности линейно-протяженных и площадных объектов ЕСГ Корпоративного научно-технического центра коррозийного мониторинга и защиты от коррозии ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: A_Melnikova@vniigaz.gazprom.ru.

Вклад авторов в статью

Тюриным М. А. составлена основная идея исследования, осуществлена постановка задачи и разработан подход к ее решению.

Бочаровым М. Е. выполнен анализ литературы по теме исследования, сформулированы выводы по материалам статьи.

Воронцовым М. А. принято участие в постановке задачи и в разработке подхода к ее решению, обсуждении методов исследования и полученных результатов.

Мельниковой А. В. принято участие в обсуждении методов исследования и в анализе полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.