

На правах рукописи



ТЮРИН МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЙ
ФУНДАМЕНТОВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ
ГРУНТОВ ЯМАЛА И ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ**

25.00.19 - Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Научный руководитель:	доктор технических наук, Козлов Сергей Иванович
Официальные оппоненты:	Шаммазов Ильдар Айратович, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов», ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» Ляпичев Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела по организации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, АО «Газпром оргэнергогаз»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»

Защита состоится «19» декабря 2018 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.03, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 142717, Московская обл., Ленинский р-н, сельское поселение Развилковское, поселок Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте <http://www.vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Курганова Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Основной ресурсной базой газовой промышленности на ближайшую перспективу являются месторождения Крайнего Севера, а также Восточной Сибири. Сокращение затрат и сроков строительства компрессорных станций (КС) является актуальным для газовой отрасли. Одним из основных направлений решения данной задачи является отказ от массивных фундаментов, традиционно используемых в средней полосе страны, и размещение газоперекачивающего оборудования на лёгких опорных конструкциях. Такой подход особенно актуален при строительстве в грунтовых условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири.

В современной теории и действующих строительных нормах при вычислении амплитудно-частотных характеристик фундаментов под газоперекачивающие агрегаты (ГПА):

- не учитывается влияние массы и неоднородности грунтового основания;
- параметр демпфирования грунтового основания (ГО) не зависит от неоднородности грунтов, а так же от площади контакта поверхности фундамента с неоднородным грунтовым основанием;
- динамические нагрузки (ДН) не зависят от частоты вращения и точности балансировки роторов ГПА, и определяются как произведение веса ротора на коэффициент пропорциональности, для газотурбинных ГПА составляют 20% от общего веса роторов;
- расчет амплитуд колебаний массивных фундаментов, возводимых на твердомерзлых грунтах, допускается не выполнять, при этом нет показателя массивных фундаментов, на основании которого фундамент было бы возможным однозначно отнести к массивному или не массивному типу.

Означенные положения по учету влияния массы, демпфирования и периодических нагрузок в системе ГПА-фундамент-грунтовое основание приводят к тому, что для обеспечения приемлемых амплитудно-частотных характеристик требуемая по расчету масса фундамента достигает более 500 тон. Такие фундаменты возводятся на основаниях, сложенных, как правило, тальми грунтами на таких газопромысловых сооружениях как Волоколамская, Пуртазовская КС и д.р. Это приводит к увеличению материалоемкости, массы и возможным неравномерным осадкам фундамента.

На сегодняшний день является малоисследованной область допустимых деформаций фундаментов при эксплуатации ГПА. В связи с этим нет возможности оценить, какие деформации фундаментов под ГПА являются допустимыми или недопустимыми, в том числе и в рамках действующих строительных норм, обязательных к применению в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

В свете Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» при конструировании фундаментов под ГПА необходимо учитывать появление возможных аварийных ситуаций (АС). В строительных нормах нет рекомендаций по

обеспечению требований статьи 16 ФЗ №384 к «механической безопасности» фундаментов ГПА с учетом возможных аварийных ситуаций.

Для сокращения затрат на строительство фундаментов и размещения газоперекачивающего оборудования на легких опорных конструкциях с амплитудно-частотными характеристиками обеспечивающими нормальную эксплуатацию опорных конструкций, необходима разработка усовершенствованной расчетной модели учитывающей влияние массы и неоднородности грунтов, а также возможных аварийных ситуаций.

Степень разработанности темы исследования Некоторые вопросы определения амплитуд колебаний фундаментов под технологическое оборудование с периодическими нагрузками были исследованы в работах: Савинова О.А., Сорокина Е.С., Сорочана Е.А., Евдокимова Е.В., Иориш Ю.А., Кондина А.Д., Коренева Б.Г., Лобанова А.Н., Пановко Я.Г., Савоненко В.А., Смирнова А.Ф., Тимашенко С.П. и др. Однако, часть вопросов остается нерешенной. В связи с этим, исследование влияния массы неоднородного грунтового основания на вибрации фундаментов от воздействия периодических нагрузок во время эксплуатации ГПА с учетом требований ФЗ№384 в геологических условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири требует дальнейшей разработки.

Цель диссертационной работы исследование в области определения амплитуд вынужденных колебаний фундаментов ГПА с учетом влияния массы неоднородного грунтового основания в условиях Ямала и Восточной Сибири для обеспечения надежности эксплуатации магистральных газопроводов.

Задачи исследования Разработка усовершенствованной расчетной модели системы ГПА-фундамент-грунтовое основание для определения амплитудно-частотных характеристик фундамента, которая позволяет учитывать:

влияния массы грунтового основания на амплитудно-частотные-характеристики фундамента;

неоднородность слоистого грунтового основания по объемному весу, упругим характеристикам, сопротивлению упругим колебаниям при определении амплитудно-частотных характеристик фундамента;

периодическую нагрузку с учетом влияния частоты вращения, массы и точности балансировки роторов ГПА.

Разработка рекомендаций по обеспечению нормальных условий эксплуатации и требований статьи 16 ФЗ№384 к «механической безопасности» в части определения амплитудно-частотных характеристик фундамента ГПА с учетом аварийных ситуаций.

Разработка показателей для определения массивного типа фундамента под ГПА.

Научная новизна Разработана усовершенствованная расчетная модель системы ГПА-фундамент-грунтовое основание для определения амплитудно-частотных характеристик фундаментов ГПА с учетом массы упруго-вязкого, линейно деформируемого неоднородного по слоям грунтового основания,

позволяющая снизить материалоемкость фундаментов и обеспечить надежность магистрального газопровода.

Разработана методика определения параметра сопротивления упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-грунтовое основание, как суммы внутреннего сопротивления конструкции фундамента и сопротивления внешней среды, представленной неоднородным по слоям грунтовым основанием, учитывающая сопротивление упругим колебаниям системы с учетом площади контакта фундамента с грунтовым основанием.

По результатам обработки опытных данных и анализа причин аварийных остановок ГПА разработаны рекомендации по моделированию расчетных аварийных ситуаций для фундаментов ГПА в условиях Ямала и Восточной Сибири с учетом опыта эксплуатации на дожимной компрессорной станции Медвежьего месторождения.

Методы диссертационного исследования основаны на использовании теории колебаний строительных конструкций, сравнительных вычислительных экспериментах, исследованиях опытных данных динамических свойств материалов строительных конструкций и грунтов. Методы основаны на численном моделировании для оценки влияния модуля упругости, объемного веса и параметра сопротивления упругим колебаниям на амплитудно-частотные характеристики фундаментов ГПА. Для подтверждения теоретических исследований выполнен натурный эксперимент по замеру амплитуд колебаний фундамента ГПА.

Защищаемые положения Усовершенствованная расчетная модель системы ГПА-фундамент-грунтовое основание, актуальная для грунтовых условий Ямала и Восточной Сибири, которая позволяет учитывать: влияние массы и неоднородности грунтового основания по объемному весу, упругим характеристикам, сопротивлению упругим колебаниям на амплитудно-частотные-характеристики фундамента; влияние частоты вращения, массы и точности балансировки роторов ГПА на периодические нагрузки.

Методика определения параметра сопротивления упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-грунтовое основание с учетом неоднородности грунтов и площади контакта поверхности фундамента с грунтами.

Рекомендации по определению амплитудно-частотных характеристик фундамента с учетом аварийных ситуаций.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность полученных выводов и результатов исследования подтверждается использованием современных методов экспериментальных измерений (виброметр TV300), использованием стандартизированных математических методов, сертифицированных пакетов компьютерных программ (Mathcad), анализом результатов экспериментальных и теоретических исследований отечественных и зарубежных исследователей.

Практическая и теоретическая ценность Реализован ряд проектов с использованием результатов проделанных научных исследований при строительстве легких стальных конструкций фундаментов под газотурбинные

ГПА на КС «Сынинская», КС «Интинская», КС «Воркутинская» на участке газопровода «Бованенково-Ухта». Результаты исследований применяются при разработке фундаментов ГПА на мерзлых грунтах газопровода «Сила Сибири». Результаты работы могут быть использованы в проектных организациях при проектировании немассивных фундаментов под газотурбинные ГПА. Проведенные исследования позволяют снизить затраты на строительство фундаментов ГПА.

Разработаны рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации и требований Федерального закона №384 к механической безопасности фундаментов ГПА, включающие: сценарии расчетных аварийных ситуаций; нагрузки, соответствующие сценариям; предельно допустимые деформации и амплитуды колебаний фундамента в точках крепления технологического оборудования; предельно допустимые ускорения колебаний поверхности фундамента, контактирующей с грунтовым основанием.

Разработаны рекомендации по определению полигармонических силовых воздействий на фундамент от ГПА. В дополнение действующих строительных норм разработаны: показатели в части однозначного определения массивного и немассивного типа фундамента ГПА; показатели предельных допустимых деформаций фундаментов ГПА.

Сведены в таблицу экспериментальные данные модуля затухания колебаний и построена кривая зависимости модуля затухания от модуля упругости для грунтов Ямала и Восточной Сибири. Построен двухпараметрический график зависимости параметра сопротивления упругим колебаниям от модуля упругости грунтов и частоты собственных колебаний фундамента.

Апробация работы Основные результаты исследования были представлены на II и VI Научно-практических конференциях «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2010г., 2015г.), IV Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций ОАО «Газпром» «Актуальные проблемы развития газовой промышленности Восточной Сибири и дальнего Востока» (ПАО «ВНИПИгаздобыча», Саратов 2013г.), заочной научной конференции молодых ученых и специалистов предприятий газовой промышленности и учебных заведений Саратовской области «Новые технологии в газовой отрасли» (ПАО «ВНИПИгаздобыча», Саратов-Чебоксары 2016г.), XII всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (ПАО «Газпром» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва 2017 г.).

Публикации По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 в ведущих рецензируемых журналах, определенных Минобрнауки России.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 120 наименований. Работа изложена на 146 страницах, включая 68 рисунков и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и практическая значимость совершенствования современной расчетной модели легких фундаментов ГПА на грунтах Ямала и Восточной Сибири.

В первой главе выполнен обзор климатических и геологических условий полуострова Ямал и Восточной Сибири.

Выполнен обзор научной литературы, посвященной теории расчетов фундаментов под машины с периодическими нагрузками, экспериментальных исследований демпфирующих характеристик грунтов и деформаций фундаментов ГПА. По результатам исследования экспериментальных данных инженерно-геологического мониторинга подвижек свайных фундаментов, проводившегося с 1989 по 1995 годы на дожимной компрессорной станции Медвежьего месторождения, а также по данным многолетнего опыта эксплуатации выявлено, что деформация фундаментов выше 10 мм недопустима для нормальной эксплуатации ГПА.

Проведен обзор отечественных строительных норм на предмет общих требований, в том числе требований к допустимым деформациям фундаментов ГПА, положений по определению динамической нагрузки от ГПА, демпфирующих характеристик системы ГПА-фундамент-грунтовое основание. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе разработана усовершенствованная расчетная модель, позволяющая учитывать влияние массы и неоднородности грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундаментов ГПА в грунтовых условиях Ямала и Восточной Сибири.

В основе модели лежит разбиение неоднородного грунтового основания на однородные слои до условной глубины H_g (рисунок 1). На глубине H_g перемещение сваи от воздействия внешней нагрузки численно равно нулю. В пределах одного слоя такие параметры как объемный вес ρ , модуль затухания колебаний Φ и коэффициент постели k грунтов назначаются в соответствии с инженерно-геологическими изысканиями, имеют усредненное значение.

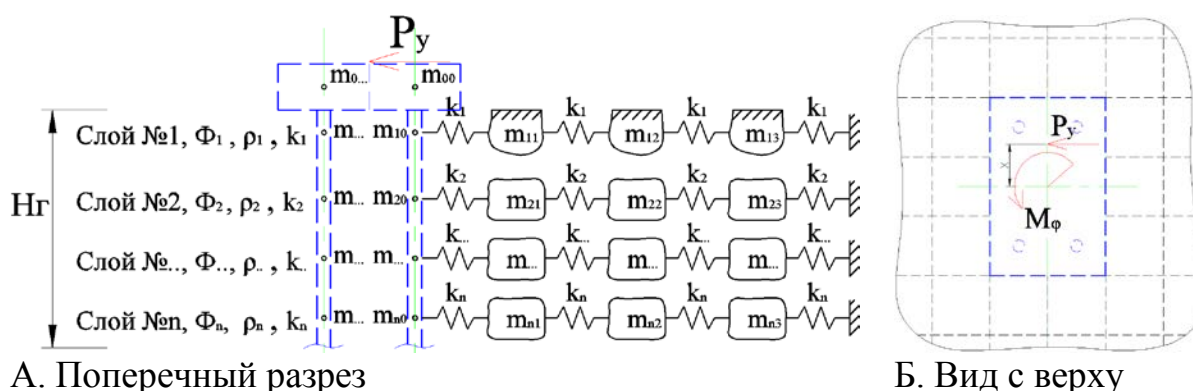


Рисунок 1. Расчетная модель системы ГПА-фундамент-грунтовое основание

В усовершенствованной расчетной модели используются уравнения вынужденных колебаний:

$$\ddot{y} \cdot K_y / \lambda_y^2 + \gamma \cdot \dot{y} \cdot K_y / \lambda_y + K_y y = P_y \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi} \cdot K_\varphi / \lambda_\varphi^2 + \gamma \cdot \dot{\varphi} \cdot K_\varphi / \lambda_\varphi + K_\varphi \varphi = M_\varphi \sin(\omega t), \quad (2)$$

где: y – перемещение, м; φ – угол поворота, рад; K_y – коэффициент жесткости фундамента по направлению оси Y , Н/м; K_φ – коэффициент жесткости фундамента при повороте относительно оси Z , Н·м; $\lambda_y, \lambda_\varphi$ – соответственно поступательные и крутильные круговые частоты собственных колебаний, 1/с; ω – частота вынужденных колебаний, 1/с; γ – параметр сопротивления упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-грунтовое основание; $P_y \sin(\omega t)$ – периодическая сила, действующая на фундамент и изменяющаяся по закону $\sin(\omega t)$, Н; $M_\varphi \sin(\omega t)$ – периодический момент относительно вертикальной оси Z , действующий на фундамент и изменяющаяся по закону $\sin(\omega t)$, Н·м.

Для вычисления поступательной и крутильной частот собственных колебаний $\lambda_y, \lambda_\varphi$ с учетом влияния массы грунтового основания в усовершенствованной расчетной модели используется зависимости:

$$\lambda_y = \sqrt{g \cdot \Delta y_o / \sum P_k \cdot \Delta y_k^2}, \quad (3)$$

$$\lambda_\varphi = \sqrt{g \cdot \Delta \varphi_o / \sum P_k \cdot \Delta \varphi_k^2}, \quad (4)$$

где: $P_k = m_k \cdot g$ – вес k -й ячейки системы ГПА-фундамент-основание; g – ускорение свободного падения м/с^2 ; $\Delta y_k, \Delta \varphi_k$ – линейное и угловое перемещение k -го центра масс ячейки системы ГПА-фундамент-основание от действия соответственно единичной силы $P=1\text{Н}$ и момента $M=1\text{Н}\cdot\text{м}$.

В усовершенствованной расчетной модели рассматривается задача взаимодействия сваи с упругим грунтовым основанием. Для решения этой задачи используется решение Э. Винклера. В качестве основной неизвестной принимается функция прогибов сваи $v=v(y)$. Уравнение изгиба сваи, контактирующей с упругим грунтовым основанием, имеет вид:

$$v^{IV} + 4\beta^4 \cdot v = q/E_c I, \quad (5)$$

где: $\beta = \sqrt[4]{k \cdot b / 4E_c \cdot I}$ – коэффициент, который зависит от величины жесткости основания $k \cdot b$ и изгибной жесткости сваи $E_c I$; k – коэффициент жесткости упругого основания Н/м^3 ; b – ширина сваи, м; q – реакция отпора грунта на единицу длины сваи, Н/м ; E_c – модуль упругости материала сваи Па; I – момент инерции сваи м^4 ; y – перемещение по направлению оси Y , м.

Влияние массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундамента учитывается до глубины H_g , на которой прогиб сваи от воздействия внешних нагрузок равен нулю.

$$v=v(y)=0, \quad (6)$$

Вопросами вычисления напряжений и деформаций в грунтовом основании занимались Ж. В. Буссинеск, А. Ляв, В. Г. Короткин, М. Фламан, У. Т. Кельвин, М. И. Горбунов-Посадов, Е. Мелан, Р. Миндлин и др. Решения для

определения напряжений и перемещений от воздействия сосредоточенных сил, приложенных внутри грунтового основания на некоторой глубине от поверхности, для пространственной задачи получено Р. Миндлином.

Для вычисления амплитудно-частотных характеристик фундамента в усовершенствованной расчетной модели назначаются границы области грунтового основания по глубине H_g и в горизонтальной плоскости L_g , до которых достаточно учитывать влияние массы грунтов с приемлемой точностью. Выполняется расчет по определению собственной частоты колебаний (СЧК) фундамента. В первом приближении расстояние от грани фундамента до границы грунтового основания в плане принимается $0.5 \cdot B$, где B – ширина фундамента. Во втором приближении границы системы расширяются на $0.5B$, вычисляется собственная частота колебаний фундамента ГПА λ_{12} . Вычисляется разность собственных частот колебаний фундамента в первом λ_{11} и втором приближении λ_{12} по формуле,

$$\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n+1}, \quad (7)$$

Последовательное увеличение границ грунтового основания L_g и вычисление собственных частот колебаний фундамента выполняется до условия,

$$\Delta\lambda \leq \lambda_n \cdot k_{\text{пт}}, \quad (8)$$

где: $k_{\text{пт}}$ – коэффициент, характеризующий приемлемую точность вычислений СЧК фундамента с учетом влияния массы области грунтового основания ограниченной в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Параметр сопротивления упругим колебаниям в системе ГПА-фундамент-грунтовое основание определяется как сумма внутреннего γ_1 – сопротивления конструкции фундамента и внешнего γ_2 – сопротивления среды

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (9)$$

Параметр сопротивления колебаниям неоднородной внешней среды γ_2 , вычисляется по формуле

$$\gamma_2 = \gamma_a \cdot k_a + \gamma_r \cdot k_r + \gamma_n \cdot k_n, \quad (10)$$

где: $k_a + k_r + k_n = 1$; γ_a – внешнее сопротивление колебаниям в воздушной среде; γ_r – то же в грунтовом основании; γ_n – то же в среде «n»; $k_a = A_a/A$, $k_r = A_r/A$, $k_n = A_n/A$ – коэффициенты, характеризующие отношение площади поверхности конструкции фундамента к площади контакта с атмосферным воздухом, грунтовым основанием или другими возможными видами внешней среды; A – общая площадь надземной и подземной конструкции фундамента до глубины H_g ; A_a – площадь поверхности конструкции фундамента, контактирующая с атмосферным воздухом; A_r – то же с грунтовым основанием до глубины H_g ; A_n – то же с другими материалами которыми может быть представлена внешняя среда.

Параметр сопротивления упругим колебаниям грунтового основания в усовершенствованной расчетной модели имеет вид

$$\gamma_{\Gamma} = \Phi_{\Gamma 0} \cdot \lambda, \quad (11)$$

где: $\Phi_{\Gamma 0}$ - модуль затухания колебаний неоднородного грунтового основания до глубины H_{Γ} , с; λ – частота собственных колебаний фундамента, 1/с.

Неоднородность грунтового основания по модулю затухания колебаний грунтов до глубины H_{Γ} учитывается модулем затухания колебаний неоднородного грунтового основания $\Phi_{\Gamma 0}$ с учетом численного значения площади проекций функции прогибов сваи $v(y)$ от воздействия внешней периодической нагрузки в слоях $1, 2, \dots, i$ до глубины H_{Γ} :

$$\Phi_{\Gamma 0} = \frac{\Phi_1 \cdot \int_0^{z_1} v(y) dz + \Phi_2 \cdot \int_{z_1}^{z_2} v(y) dz + \dots + \Phi_n \cdot \int_{z_{i-1}}^{z_i} v(y) dz}{\int_0^{z_i} v(y) dz}, \quad (12)$$

где: $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i$ – модули затухания грунтов, расположенных в слоях $1, 2, \dots, i$; $v(y)$ – функция прогибов сваи; z_1, z_2, \dots, z_{i-1} – соответственно глубина слоев $1, 2, \dots, i-1$; z_i – глубина слоя, соответствующая глубине H_{Γ} .

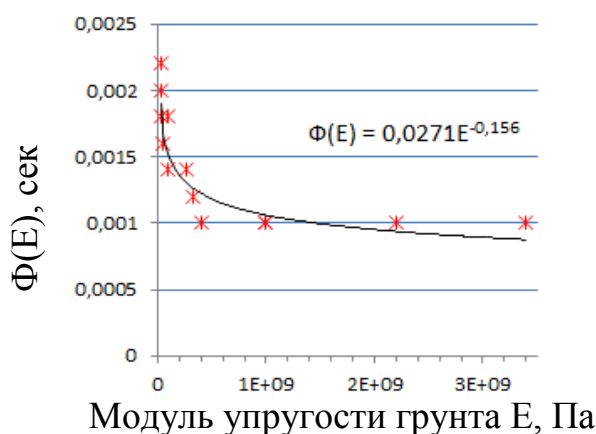
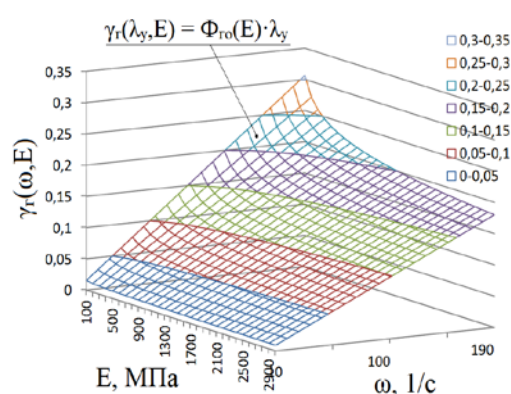
По результатам обработки инженерно-геологических изысканий проектов магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта», «Сила Сибири» и экспериментальных исследований демпфирующих свойств грунтов, приведенных в работах Савинова О.А, Коренева Б.Г, Павлюка Н.П., Сорокина Е.С. и других, сведены в таблицу экспериментальные данные измерения модуля затухания колебаний Φ и соответствующие упругие характеристики грунтов E, k , (таблица 1).

Таблица 1 - Обобщение опытных данных для талых и мерзлых грунтов

Наименование грунтов	Φ , сек	E , МПа	k , Н/м ³
Мерзлые грунты: Пески крупные, глины, суглинки при температуре $t = - 5,0^{\circ}\text{C}$	0,001	3400	708,9
Те же грунты при температуре $t = - 2,0^{\circ}\text{C}$	0,001	2200	458,7
Те же грунты при температуре $t = - 0,5^{\circ}\text{C}$	0,001	1000	208,5
Талые грунты: Скальные, полускальные грунты	0,001	1000	208,5
Пески крупные, гравелистые грунты	0,001	400	83,4
Глины и суглинки твердые, пески крупные	0,0012	320	66,7
Пески средней крупности и мелкие, супеси твердые, суглинки и глины тугопластичные	0,0014	264	55
Пески пылеватые, супеси, глины и суглинки мягко пластичные. Пески насыпные уплотненные	0,0016	88	18,3
Глины и суглинки текучепластичные	0,0018	88	18,3
Насыпные грунты: Глины и суглинки уплотненные	0,0018	40	8,3
Глины и суглинки свежая насыпь, неуплотненные	0,0018	24	5
Пески средней крупности и мелкие, супеси твердые	0,0020	24	5
Пески крупные	0,0022	24	5

По результатам обработки экспериментальных данных получена кривая в виде зависимости модуля затухания колебаний от модуля упругости грунта и

построена двух параметрическая функция параметра сопротивления упругим колебаниям в грунтовом основании (рисунки 2 и 3).

Рисунок 2. График функции $\Phi(E)$ Рисунок 3. График функции $\gamma_r(\lambda_r, E)$

Расчетная периодическая нагрузка от газотурбинных ГПА вычисляется как центробежная сила по формуле

$$P = U_{per} \cdot \omega^2 \cdot k_r, \quad (13)$$

где: U_{per} - допустимое значение остаточного дисбаланса для данного типа машины, кг·м; $U_{res} = m \cdot e$ - остаточный дисбаланс ротора по результатам испытаний на стенде, кг·м; $k_r = U_{res}/U_{per}$ - поправочный коэффициент, равный отношению остаточного дисбаланса ротора U_{res} к допустимому U_{per} значению для данного типа машины по данным производителей ГПА.

В таблице 2 приведены результаты сравнения периодических нагрузок, вычисленных по усовершенствованной расчетной модели и строительным нормам при работе 3-х роторов, действующих на опору двигателя при максимальной частоте вращения для ГПА-25 «Урал».

Таблица 2 – Сравнение периодических нагрузок, вычисленных по усовершенствованной расчетной модели и СП26.13330.2012

Источник нагрузки	Частота вращ-я, об./мин.	Динамическая нагрузка по		Сравнение $\frac{СП - УРМ}{УРМ} * 100\%$
		УРМ, Н	СП, Н	
Ротор силовой турбины	5250	21,8	92,9	327.3%
Ротор турбины низкого давления	4600	238,7	1328,6	456.6%
Ротор компрессора высокого давления	12000	580,4	474,7	-18.2%
Суммарная	-	840,8	1896,2	125.5%

Из полученных результатов расчётного исследования следует, что требуется доработка рекомендаций в СП26.13330.2012 в части определения динамической нагрузки на фундаменты от ГПА. С одной стороны, более точный учёт динамической нагрузки позволит обоснованно снизить показатели металлоёмкости конструкции фундамента, а с другой, необходимо исключить возможность того, что динамическая нагрузка, определённая по СП, окажется ниже фактической. Так динамическая нагрузка по СП от ротора компрессора

высокого давления при частоте вращения 12000об/мин меньше центробежной силы по УРМ на 18,2%.

В современной теории расчетов амплитуда колебаний фундаментов ГПА от воздействия периодических нагрузок вычисляются для одной базовой частоты ω вращения ротора, но у современных газотурбинных ГПА существует несколько источников периодических нагрузок, воздействующих на фундамент с отличными друг от друга частотами. В двигателе и компрессоре ГПА-25 «Урал» есть пять деталей, вращающихся с тремя отличающимися частотами.

Для газотурбинных ГПА, где одновременно роторы вращаются с различающимися частотами, вычисление амплитуд колебаний фундамента от периодической нагрузки, воздействующей с одной базовой частотой, является приближенным. Одновременное периодическое воздействие на фундамент от нескольких вращающихся роторов, являющихся источниками гармонических колебаний, представляет собой полигармоническое силовое воздействие. В усовершенствованной расчетной модели амплитуда колебаний фундамента рассматривается как результат протекания нескольких процессов при одновременном воздействии нескольких источников периодических нагрузок. Суммарная амплитуда колебаний фундамента определяется по принципу суперпозиции.

$$\sum_{i=1}^n y_i = A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2) + \dots + A_n \sin(\omega_n t + \delta_n), \quad (14)$$

где: $A_1, A_2 \dots A_n$ – амплитуды колебаний от воздействия периодических нагрузок $P_1, P_2 \dots P_n$; $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$ – начальные фазовые углы; $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$ – угловые частоты воздействия источников периодических нагрузок.

На примере ГПА-25 «Урал» частоты вращения роторов в один момент времени различаются более, чем в 2,5 раза. Соответственно источники периодических нагрузок воздействуют на фундамент с различающимися частотами $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_5$. В ГПА-25 «Урал» частоты вращения роторов изменяются в соответствии с графиками, приведенными на рисунке 4.

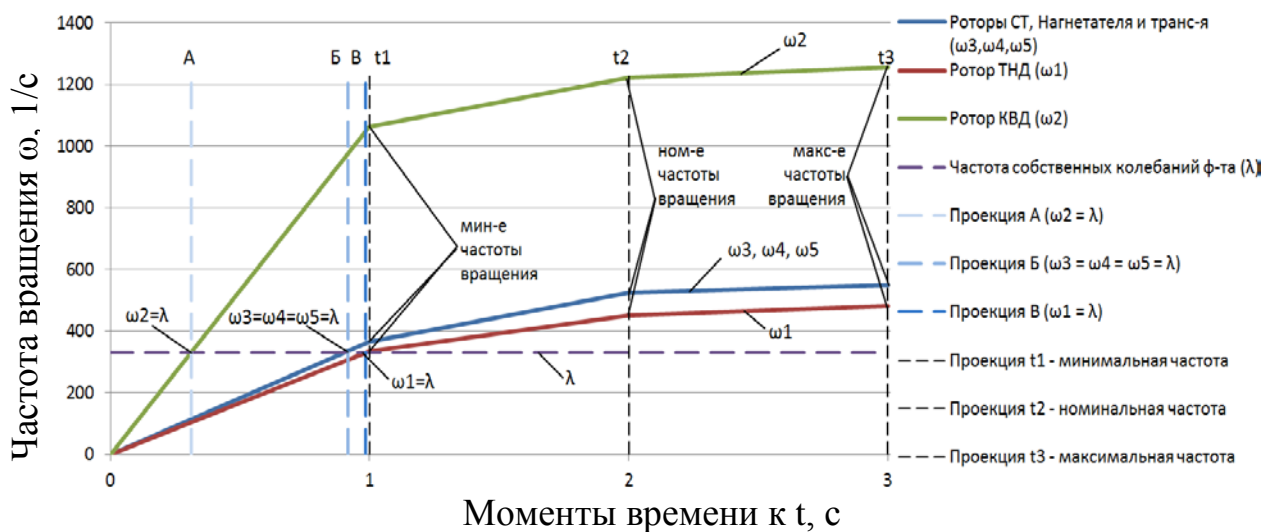


Рисунок 4. Графики изменения частот воздействия источников периодических нагрузок

Проекции А, Б и В соответствуют моментам времени, когда: частота вращения ротора компрессора высокого давления (КВД) совпадает с частотой собственных колебаний условного фундамента $\omega_2 = \lambda$, (проекция А); частоты вращения роторов силовой турбины (СТ), нагнетателя и трансмиссии совпадает с частотой собственных колебаний фундамента $\omega_3 = \omega_4 = \omega_5 = \lambda$ (проекция Б), и частота вращения ротора турбины низкого давления (ТНД) совпадает с частотой собственных колебаний фундамента $\omega_1 = \lambda$ (проекция В). Проекции t1, t2, t3 на рисунке 4 соответствуют моментам времени, когда частоты вращения роторов $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_5$ имеют соответственно минимальное, номинальное и максимальное значение.

В фундаментах ГПА необходимо учитывать полигармонический характер амплитуд колебаний. Это актуально для современных ГПА, где частоты вращения роторов могут отличаться в два и более раз и возможна ситуация, когда на примере рассмотренного условного фундамента частота вращения одного ротора ω_2 более, чем в 2,5 раза превышает частоту собственных колебаний фундамента λ . В тоже время частоты вращения роторов $\omega_{3,4,5}$ и ω_1 отличается от собственной частоты колебаний, соответственно на 1,5% и 10,9% (проекция t1 на рисунке 4).

В третьей главе выполнена экспериментальная проверка усовершенствованной расчетной модели на примере фундамента ГПА-25 «Урал» на КС-4 «Воркутинская», входящей в «Систему магистральных газопроводов Бованенково-Ухта» и сравнение амплитудно-частотных характеристик фундамента, вычисленных в усовершенствованной расчетной модели и по СП26.13330.2012 с измеренными значениями при помощи виброметра TV300. Измерения колебаний фундамента выполнялись в точках №1, №2 под рамой ГТД и №3 под рамой компрессора, при номинальной частоте вращения роторов ГПА. На рисунке 5 приведены результаты сравнения амплитуд колебаний фундамента вычисленных по СП и в усовершенствованной расчетной модели с результатами измерений.

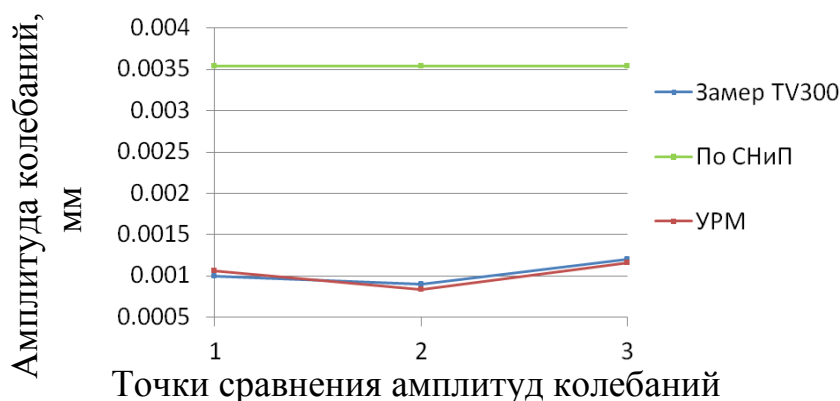
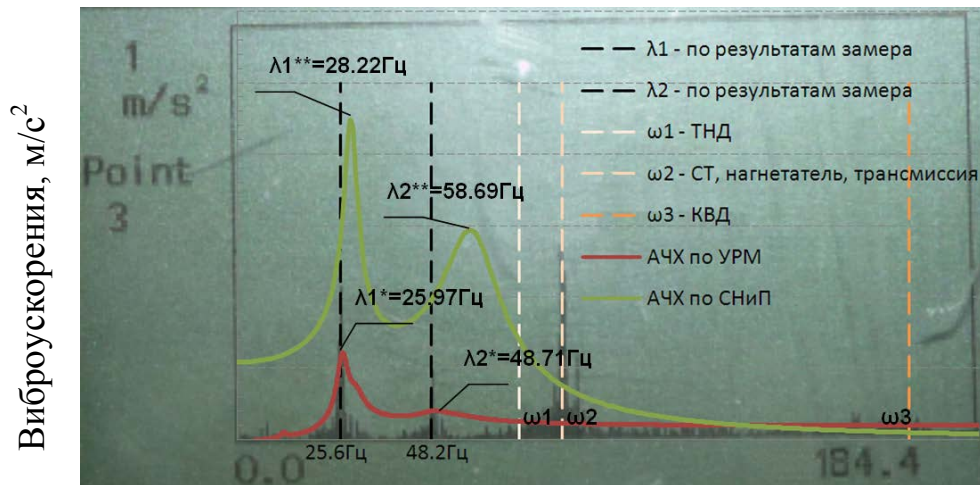


Рисунок 5. Сравнение расчетных амплитуд колебаний с результатами измерений

На рисунке 6 представлены результаты измерения колебаний в точке №3 в виде спектрального распределения интенсивности ускорений в диапазоне частот от 0 до 184 Гц.



Спектр частот по результатам замера, Гц

Рисунок 6. Наложение спектральной диаграммы и графиков амплитуд колебаний, вычисленных по СП26.13330.2012 и по УРМ

На графике спектральной диаграммы отмечены значения измеренных ускорений, соответствующие частотам собственных колебаний фундамента $\lambda_1=25.6$ Гц, $\lambda_2=48,2$ Гц, а также частоты, соответствующие номинальной частоте вращения роторов турбины низкого давления – ω_1 , силовой турбины, нагнетателя и трансмиссии – ω_2 и ротора компрессора высокого давления – ω_3 . На спектральную диаграмму нанесены кривые амплитуд колебаний фундамента в точке №3 в диапазоне частот от 0 до 184.4 Гц вычисленные по УРМ и по СП26.13330.2012.

Разница между вычисленной по усовершенствованной расчетной модели и измеренной первой и второй частотами собственных колебаний фундамента составляет 1,45% и 1.06% соответственно. Вычисленные по усовершенствованной расчетной модели амплитуды колебаний фундамента в точках №1, 2, 3 отличаются от измеренных значений соответственно на 6.02%, 6,37% и 3,6%. Разница измеренных амплитуд и вычисленных по СП26.13330.2012 составляет от 2,95 до 3,93 раз. Полученное отклонение до 3,93 раз вычисленных амплитуд колебаний по СП от измеренных обусловлено тем, что расчетные периодические нагрузки не совпадают с фактическими, так как не учитывается: частота вращения, точность балансировки и полипериодический характер воздействия; влияние массы грунтового основания и его неоднородность по объемному весу и параметру сопротивления упругим колебаниям.

В четвертой главе Разработаны рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА и «требований к механической безопасности» статьи 16 ФЗ №384, включающие сценарии расчетных аварийных ситуаций; нагрузки, соответствующие сценариям расчетных аварийных ситуаций; предельные допустимые деформации и амплитуды колебаний фундамента в точках крепления технологического оборудования; предельные допустимые ускорения колебаний поверхности

фундамента, контактирующей с грунтовым основанием для предотвращения деформации фундамента от постоянного воздействия периодических нагрузок.

Рекомендации для обеспечения нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА и выполнения требований «механической безопасности» ФЗ№ 384 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Рекомендации для обеспечения нормальных условий эксплуатации и требований «механической безопасности»

Рекомендации	Методология выполнения рекомендаций
1. Сценарии расчетных аварийных ситуаций	Группы сценариев расчетных аварийных ситуаций (АС). АС №1 – изменение свойств грунтов. Например, переход грунтов из твердомерзлого в пластично мерзлое состояние, из-за выхода из строя термостабилизаторов. АС №2 – потеря несущей способности 10% свай. АС №3 – аварийные нагрузки, из-за разбалансировки роторов ГПА. АС №4 - прочие непредусмотренные в АС №1...3.
2. Нагрузки соответствующие сценариям расчетных АС	1. Основное сочетание нагрузок в соответствии с действующими строительными нормами. Учитывается для АС №1,2,3. 2. Периодическая нагрузка от ГПА, при нормальных условиях эксплуатации. Учитывается для АС №1,2. 3. Периодические нагрузки из-за разбалансировки роторов. Учитывается в группе АС №3.
3. Предельно допустимая деформация	Предельно допустимая деформация фундамента в соответствии с требованиями производителей ГПА, при их отсутствии деформации в точках крепления рамы ГПА и нагнетателя не должно превышать $\Delta s < 10\text{мм}$.
4. Предельно допустимая амплитуды колебаний	Предельно допустимая амплитуда колебаний фундамента в соответствии с требованиями производителей ГПА, при их отсутствии по требованиям действующих строительных норм и правил.
5. Предельно допустимые ускорения колебаний поверхности фундамента контактирующей с грунтовым основанием	Для предотвращения деформации грунтового основания и фундамента ГПА от воздействия периодических нагрузок, рекомендуется ограничение ускорений колебаний поверхности фундамента, контактирующей с грунтовым основанием. Ограничение ускорений, не приводящих к появлению дополнительных деформаций от воздействия периодических нагрузок, выполняется на основании данных инженерно-геологических изысканий.

Для нормальных условий эксплуатации и сценариев расчетных аварийных ситуаций №1,2 расчетный остаточный дисбаланс ротора U_{res} принимается по данным производителя ГПА.

Для группы сценариев аварийных ситуаций №3 учитывается дополнительная аварийная нагрузка, которая представляет собой центробежную силу от дисбаланса ротора вылетевшей лопатки U_d . Суммарная периодическая нагрузка определяется по формуле

$$F = U_{per} \omega^2 k_{п+} + U_{per} \omega^2 k_{ac}, \quad (15)$$

где: $k_{ac} = U_d / U_{per}$ – коэффициент дополнительного дисбаланса для аварийной ситуации АС №3, U_d – аварийный дополнительный дисбаланс по данным производителей ГТУ.

На протяжении всего срока службы газотурбинные ГПА более 90% времени находятся в эксплуатируемом состоянии. Фундамент является источником вынужденных колебаний грунтового основания. Из-за постоянного воздействия периодических нагрузок и вибрации грунты, контактирующие с фундаментом, подвержены дополнительным осадкам.

По результатам обобщения экспериментальных исследований (проведенных в работе Савинов О.А.) возможны дополнительные деформации в водонасыщенных заиленных песках, текуче-пластичных глинах и других слабых грунтах при ускорениях колебаний частиц грунта $a_r > 0.05m/c^2$; в песках (кроме указанных) и в пластичных глинистых грунтах при $a_r > 0.15m/c^2$. Для предотвращения деформаций грунтов от воздействия периодических нагрузок ускорения частиц грунта a_r не должны превышать ускорения $a_{кр}$, при котором происходит дополнительное уплотнение грунтов по данным инженерно-геологических изысканий и испытаний.

Для предотвращения осадок грунтового основания и деформации фундамента от воздействия периодических нагрузок, рекомендовано ограничение ускорений $a_{ф}$ колебаний поверхности фундамента ГПА, контактирующей с грунтовым основанием

$$a_{ф} \leq a_{кр}. \quad (16)$$

Разработан показатель массивных фундаментов ГПА. Рекомендуется считать фундамент условно массивным при выполнении условия

$$\omega^* / \omega_{min} \leq 1, \quad (17)$$

где: ω_{min} – минимальная эксплуатационная частота вращения роторов ГПА, 1/с; ω^* – верхняя граница диапазона частот условно повышенных амплитуд колебаний 1/с, которой соответствует значение $0,1tg(\alpha)_{min}$ в диапазоне частот λ_2

$< \omega < \omega_{min}$; $tg(\alpha)_{min} = \left(\frac{\partial}{\partial \omega} A(\omega) \right)_{min}$ – минимальное значение тангенса угла α

касательной к графику функции $A(\omega)$ в диапазоне частот $\lambda_2 < \omega < \omega_{min}$;

α – угол наклона касательной к графику функции $A(\omega)$, в точке которой соответствует ω^* ;

$\lambda_{1,2}$ – 1-я и 2-я собственные частоты колебаний фундамента, 1/с.

Для трех вариантов фундамента которым соответствует коэффициент жесткости $9,14 \cdot 10^9$, $3,94 \cdot 10^9$, $1,45 \cdot 10^9$ Н/м выполнен расчет показателя ω^* условного массивного типа фундамента, которому соответствует значение $0,1tg(\alpha)_{min}$. На рисунке 7 приведены графики зависимости показателя ω^* от жесткости и массы надземной части фундамента ГПА.

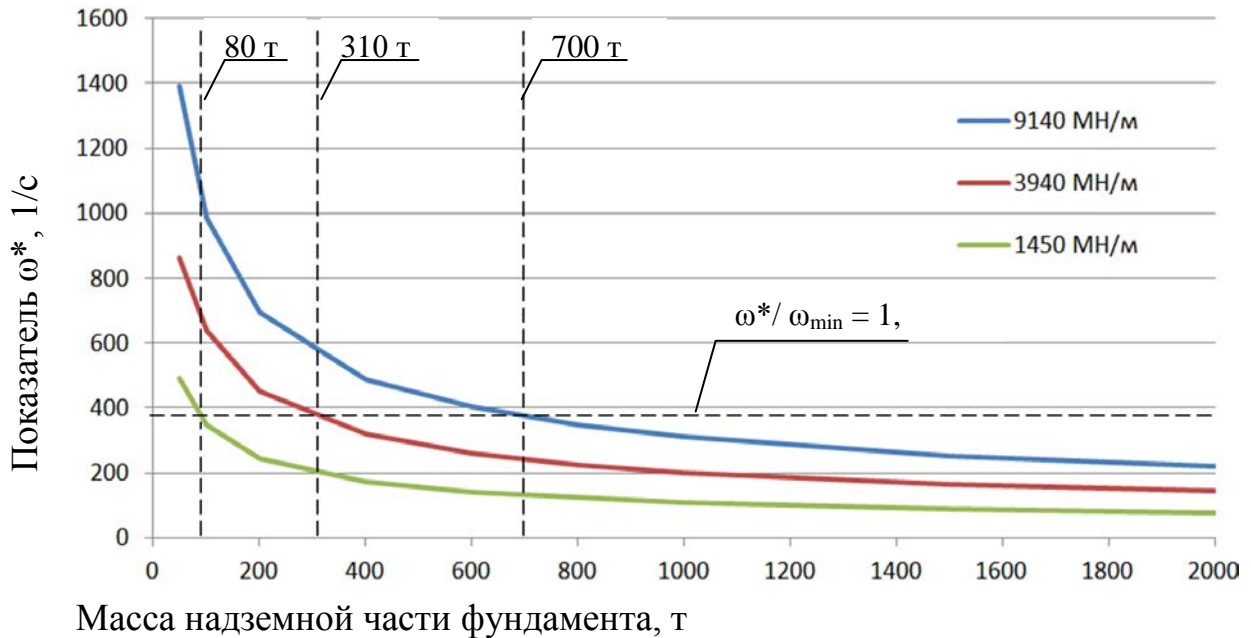


Рисунок 7. Графики зависимость показателя ω^* от жесткости и массы фундамента

При вычислении показателя ω^*/ω_{min} учитывается максимальная прогнозируемая жесткость фундамента в течении всего срока эксплуатации. Из графика на рисунке 7 на примере ГПА32 «Ладога» с минимальной рабочей частотой вращения роторов $\omega_{min}=367$ 1/с видно, что при размещении агрегата на фундаменте с коэффициентом жесткости $9,14 \cdot 10^9$ Н/м условие $\omega^*/\omega_{min} \geq 1$ выполняется и фундамент относится к условно массивному типу когда его масса больше или равна 700 т. При размещении агрегата на фундаменте с коэффициентом жесткости $1,45 \cdot 10^9$ Н/м условие $\omega^*/\omega_{min} \geq 1$ выполняется при массе фундамента составляющей 80 т и более.

Выполнено моделирование амплитудно-частотных характеристик фундамента под ГПА мощностью 25 МВт на ГП2 Бованенковского НГКМ. Получены результаты расчета амплитуд колебаний фундамента от воздействия периодических нагрузок, соответствующих нормальным условиям эксплуатации и с учетом сценариев расчетных аварийных ситуаций, на примере трех вариантов грунтовых условий.

Нормальным условиям эксплуатации соответствуют два варианта грунтовых условий №1 и №2 для холодного и теплого времени года. Для учета аварийных условий эксплуатации ГПА в соответствии с рекомендациями в таблице 3 рассмотрены сценарии аварийных ситуаций. Краткое описание вариантов грунтовых условий: №1, время года – зима, площадка сложена мерзлыми насыпными песками до глубины 5м и коренными вечномерзлыми

суглинками в твердомерзлом состоянии; №2, как в варианте №1, время года – лето, до глубины 2 м грунты в талом состоянии; №3, все грунты в талом состоянии.

Теоретическое обоснование влияния массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундаментов выполнено на примере трех вариантов грунтовых условий. Область грунтового основания, в пределах которой учитывается влияние массы грунтов, ограничена размерами по глубине H_g и в плане L_g . В таблице 4 приведены результаты расчета первой частоты собственных колебаний λ_n и $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n-1}$, для трех вариантов системы ГПА-фундамент-основание где учитывается влияние массы грунтового основания в области с размерами в плане от $L_g=0$ до $L_g=108$ м.

Таблица 4 - Результаты расчета λ_n и $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n-1}$

Грунтовые условия		№1		№2		№3	
Жесткости фундамента		$9,14 \cdot 10^9 \text{Н/м}$		$1,45 \cdot 10^9 \text{Н/м}$		$1,41 \cdot 10^9 \text{Н/м}$	
Размеры $L_{\Gamma} \times L_{\Gamma}$, м	Площадь, м^2	λ_n , 1/с	$\Delta\lambda$, 1/с	λ_n , 1/с	$\Delta\lambda$, 1/с	λ_n , 1/с	$\Delta\lambda$, 1/с
0	0	390,85	-	144,51	-	141,09	-
12x12	144	390,83	0,02	142,13	2,38	139,42	1,67
24x24	576	-	-	140,61	1,52	137,86	1,56
... x ...	...	...	...	...	...	...	...
108x108	11664	390,79	-	138,31	0,12	135,51	0,12
$\Delta\lambda \leq \lambda_n \cdot k_{\text{пг}}$		0,02% < 0,39%		0,12% < 0,138%		0,12% < 0,135%	

В таблице 5 приведены результаты сравнения собственных частот λ_1 колебаний легкого фундамента ГПА, вычисленных по усовершенствованной расчетной модели и СП26.13330.2012 для нормальных условий эксплуатации и трех расчетных сценариев аварийных ситуаций.

Таблица 5 - Сравнение собственных частот колебаний фундамента

Условия эксплуатации	№ Варианта грунтовых условий, № сценария расчетной АС	По УРМ		По СП	
		λ_1 , 1/с	$A(\omega)_{\text{max}}$, мм	λ_1 , 1/с	$A(\omega)_{\text{max}}$, мм
Нормальные	Грунтовые условия №1	390,79	0.004	430.5	0.03384
	Грунтовые условия №2	138,32	0,00818	260,6	0.09192
Аварийные	Грунтовые условия №3, АС №1	135,51	0.00824	-	-
	Грунтовые условия №2, АС №2	130,6	0,00847	-	-
	Грунтовые условия №2, АС №3	138,32	0,01636	-	-

На рисунке 8 приведены расчетные амплитуды колебаний частиц грунтового основания при воздействии периодических нагрузок

соответствующих нормальным условиям эксплуатации фундамента для грунтовых условий №2, вычисленные по формуле Р. Миндлина.

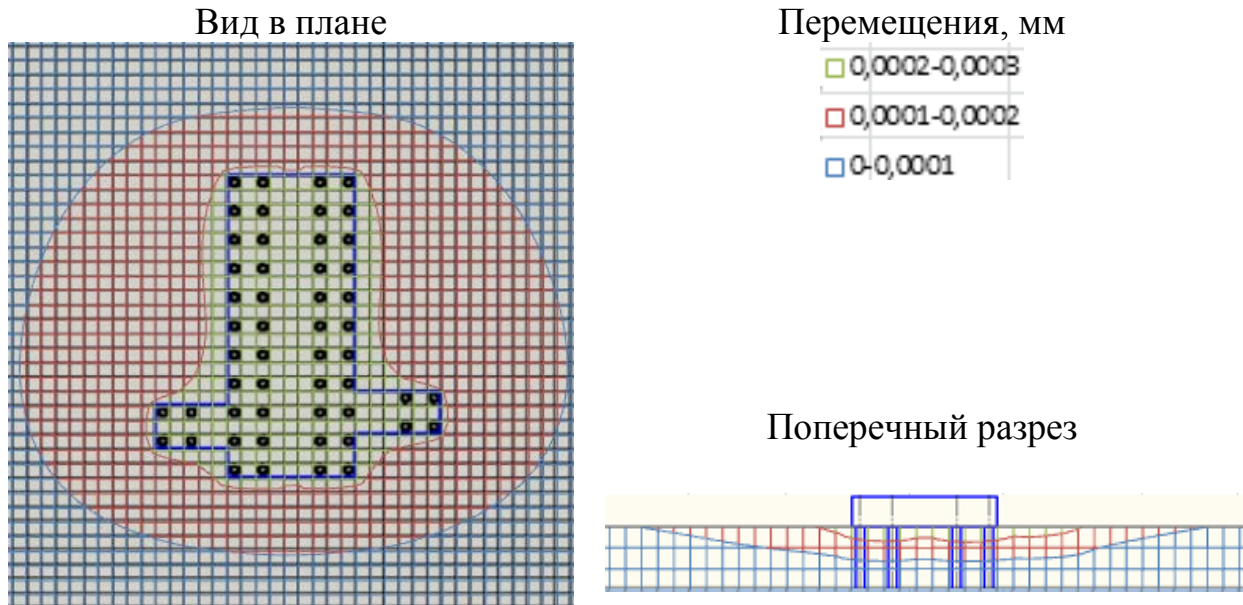


Рисунок 8. Амплитуды колебаний частиц грунтового основания при частоте вращения роторов $n_1=n_4=n_5=5000$ об/мин, $n_2 = 4300$ об/мин, $n_3=11670$ об/мин.

Выполнена проверка ускорений частиц грунта, контактирующего с поверхностью фундамента, на предмет предупреждения дополнительных осадок от воздействия периодических нагрузок при нормальных условиях эксплуатации фундаментов ГПА. Максимально допустимое ускорение грунтов, при котором не появляется дополнительная осадка – $0,15 \text{ м/с}^2$. Максимальная амплитуда колебаний и ускорение частиц грунта при номинальной частоте вращения роторов составляют соответственно $A(\omega)=0,0003 \text{ мм}$ и $a_{\text{ф}}(\omega)=0,082 \text{ м/с}^2 < 0,15 \text{ м/с}^2$, что меньше допустимого значения, воздействие динамических нагрузок не приводит к дополнительным осадкам и деформациям грунтового основания.

По усовершенствованной расчетной модели частоты собственных колебаний фундамента для всех вариантов грунтовых условий ниже рабочего диапазона частот вращения роторов. Амплитуды колебаний фундамента меньше допустимого $0,03 \text{ мм}$ по требованию завода изготовителя ГПА. Максимальная расчетная амплитуда колебаний по методике усовершенствованной расчетной модели - $0,01636 \text{ мм}$, что составляет $54,5\%$ от допустимого значения по данным завода изготовителя ГПА и соответствует расчетному сценарию аварийной ситуации № 3. По СП26.13330.2012 жесткости и массы рассматриваемого легкого фундамента не достаточно для обеспечения требуемого уровня вибрации при нормальных условиях эксплуатации. В этом случае для снижения вибрации необходимо увеличение массы и применение массивного типа фундамента.

Рассмотрена конструкция массивного фундамента ГПА традиционно применяемая в средней полосе страны, с габаритами в плане $17,05 \times 6,4 \text{ м}$,

высота железобетонного ростверка 1,8м, масса 600 т. Для вариантов грунтовых условий №1,2 осадка легкого фундамента 0,004мм, осадка массивного 0,432мм. Для варианта грунтовых условий №3 осадка легкого фундамента - 0,165мм составляет 0,85% от осадки массивного – 19,4мм, которая превышает 10 мм и является недопустимой для нормальной эксплуатации ГПА по опытным данным. Материалоемкость массивного фундамента больше на 1087%, чем у легкого. Легкий фундамент под ГПА является более выгодным по затратам материала и трудоемкости производства, что особенно актуально в условиях Ямала и Восточной Сибири.

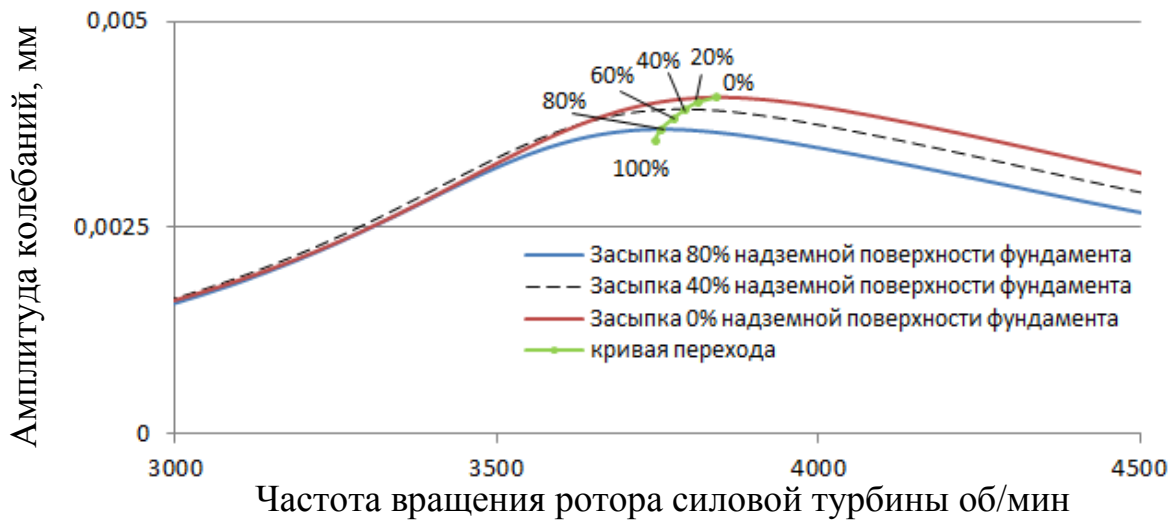
По результатам проведенных исследований частичная или полная засыпка надземной поверхности фундамента грунтом увеличивает площадь контакта фундамента с грунтовым основанием, жесткость системы фундамент-основание, параметр сопротивления упругим колебаниям, уменьшает амплитуду колебаний и изменяет частоту собственных колебаний фундамента. Выполнен вычислительный эксперимент по сравнению расчетных частот собственных колебаний фундамента для грунтовых условий №1 и №2 с учетом влияния массы грунтов в зависимости от высоты h_3 и размеров L_3 засыпки надземной поверхности фундамента.

В таблице 6 приведены расчетные частоты собственных колебаний фундамента λ_1 и λ_2 в зависимости от объема отсыпки $V = h_3 \cdot L_3 \cdot L_3$ и размеров отсыпки в плане L_3 при высоте отсыпки $h_3 = 1$ м, для грунтовых условий №1 и №2.

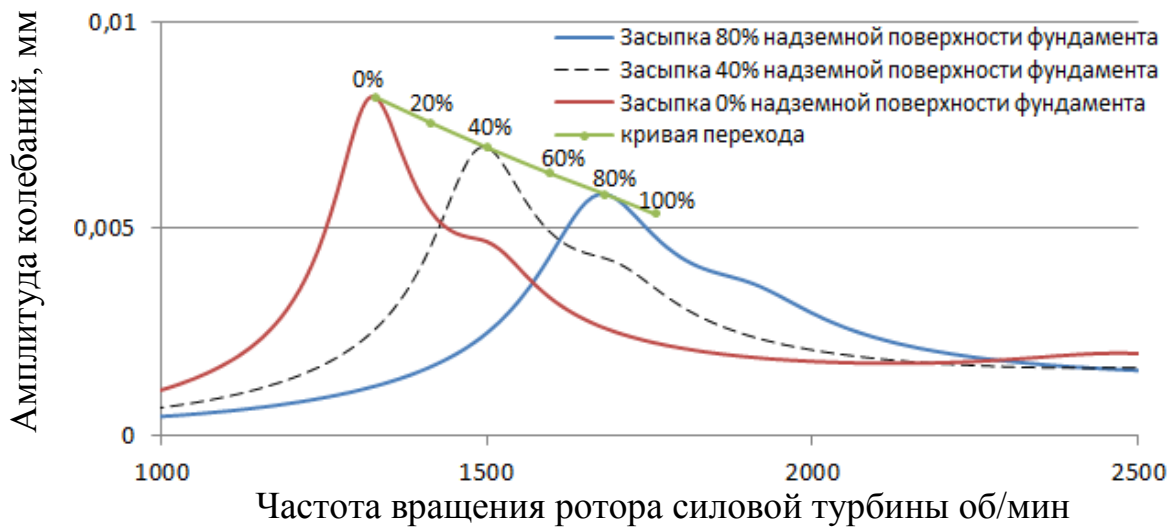
Таблица 6 - Зависимость параметров λ_1 и λ_2 от объема отсыпки

Объем отсыпки, м ³	Размеры отсыпки, м	Грунтовые условия №1		Грунтовые условия №2	
		λ_1 , 1/с	λ_2 , 1/с	λ_1 , 1/с	λ_2 , 1/с
11664	108x108	182,9	351,88	381,2	757,1
...	... x ...	...	...	...	...
576	24x24	190,3	352,4	394,4	758,4
136	17x8	195,38	354,98	403,5	764,64

Вычислены графики амплитудно-частотных характеристик фундамента ГПА в диапазоне частот вращения роторов силовой турбины и нагнетателя от 3000 до 4500 об/мин для грунтовых условий №1 и от 1000 до 2500 об/мин для грунтовых условий №2 (рисунок 9). Графики приведены для условий заполнения 80%, 40% и 0% надземной поверхности фундамента песком средней крупности с модулем упругости 50 МПа и объемным весом 1650 кг/м³ при $L_3 = 108$ м. Кривая перехода на графиках изображает численное значение частоты собственных колебаний λ_1 и соответствующие амплитуды колебаний для заполнения надземной части фундамента от 0% до 100%.



Б. Графики амплитудно-частотных характеристик для грунтовых условий №1



Б. Графики амплитудно-частотных характеристик для грунтовых условий №2

Рисунок 9. Графики амплитудно-частотных характеристик для заполнения 80%, 40% и 0% надземной поверхности фундамента песком в грунтовых условиях №1 и №2

В грунтовых условиях №1 засыпка надземной части фундамента от 100% до 20% увеличивает жесткость системы фундамент основание соответственно на 11,8% и 0,7%; увеличивает значение параметра сопротивления упругим колебаниям соответственно на 157,6% и 31,5%; уменьшает частоту собственных колебаний λ_1 фундамента соответственно на 2,45% и 0,71%; уменьшает максимальную амплитуду $A(\lambda_1)$ колебаний на 13,1% и 1,5%. В грунтовых условиях №2 объем засыпки надземной части фундамента от 100% до 20% увеличивает жесткость системы фундамент основание соответственно на 106,9% и 15,6%; увеличивает параметр сопротивления упругим колебаниям соответственно на 120,6% и 24,1%; увеличивает частоту собственных колебаний λ_1 фундамента соответственно на 32,26% и 6,33%; уменьшает максимальную амплитуду $A(\lambda_1)$ колебаний на 34,5% и 7,6%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана усовершенствованная расчетная модель, позволяющая учитывать влияние массы и неоднородности слоистого грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундаментов ГПА и полипериодический характер воздействия нагрузок. Разработаны методики:
 - вычисления собственной частоты колебаний фундамента с учетом влияния массы и неоднородности слоистого грунтового основания;
 - вычисления параметра сопротивления упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-основание как сумма внутреннего сопротивления конструкции фундамента и сопротивления неоднородной внешней среды;
 - вычисления амплитуд колебаний фундамента ГПА от одновременного воздействию нескольких источников периодических нагрузок, представляющих собой полигармоническое силовое воздействие, с учетом неодинаковости дисбалансов и частот вращения роторов ГПА.
2. В результате анализа экспериментальных данных построена кривая зависимости модуля затухания колебаний, от модуля упругости грунтов. Впервые построена поверхность в виде двухпараметрического графика зависимости параметра сопротивления упругим колебаниям от собственной частоты колебаний фундамента и модуля упругости грунтов.
3. Разработаны рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации и «требований механической безопасности» (статьи 2, 16 Федерального закона №384) фундаментов ГПА в грунтовых условиях Ямала и Восточной Сибири. Рекомендации включают в себя сценарии расчетных аварийных ситуаций; нагрузки, соответствующие сценариям; предельные допустимые деформации и амплитуды колебаний фундамента; предельные допустимые ускорения колебаний поверхности фундамента, контактирующей с грунтовым основанием.
4. Разработаны показатели массивных фундаментов ГПА, которые являются дополнением действующих строительных норм в части определения массивного и не массивного типа фундамента.
5. Выполнено экспериментальное исследование амплитуд колебаний фундамента ГПА «Урал» мощностью 25 МВт на КС-4 «Воркутинская». Разница между вычисленной по усовершенствованной расчетной модели и измеренной при помощи виброметра TV300 первой и второй собственных частот колебаний фундамента составляет 1,45% и 1,06% соответственно. Вычисленные по усовершенствованной расчетной модели амплитуды колебаний фундамента в точках №1, 2, 3 отличаются от измеренных значений на 6,02%, 6,37% и 3,6% соответственно.
6. Выполнены сравнительные расчеты амплитудно-частотных характеристик фундамента под ГПА мощностью 25МВт на ГП2 Бованенковского НГКМ по усовершенствованной расчетной модели и по СНиП на примере трех вариантов грунтовых условий для нормальных и аварийных условий эксплуатации. По результатам сравнительных расчетов увеличение площади контакта

конструкции фундамента с грунтовым основанием, с одной стороны, способствует увеличению жесткости и влияния массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики, а с другой стороны увеличивает сопротивление упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-основание. Поэтому для снижения вибрации фундаментной конструкции целесообразно создавать конструкции фундаментов со сравнительно высокой площадью контакта поверхности фундамента с естественным или искусственным грунтовым основанием.

7. Выполнен вычислительный эксперимент по сравнению собственных частот колебаний фундамента для грунтовых условий №1 и №2 с учетом влияния засыпки надземной части фундамента грунтом. Засыпка поверхности надземной части фундамента грунтом до 100% в грунтовых условиях №1 и №2 уменьшает амплитуду колебаний фундамента соответственно на 13,1% и 34,5%. Частота собственных колебаний в грунтовых условиях №1 уменьшается на 2,45%, в грунтовых условиях №2 увеличивается на 32,26%. Проведенные исследования позволяют снизить затраты на строительство и реализовать применение легкого фундамента ГПА в геологических условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Тюрин М.А. Применение легких проветриваемых фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях Ямальской группы месторождений / М.А. Тюрин, С.И. Козлов // журнал Территория Нефтегаз, 2013, №10 – С. 62-70.
2. Тюрин М.А. Анализ методов расчета фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях / М.А. Тюрин // журнал Территория Нефтегаз, 2014, №4 – С. 66-73.
3. Тюрин М.А. Исследование динамических нагрузок на фундамент при работе газоперикачивающих агрегатов / М.А. Тюрин, М.А. Воронцов // журнал Технологии нефти и газа, 2016, №2 – С. 45-50.
4. Тюрин М.А. Математическое моделирование легких фундаментов ГПА с учетом грунтовых условий Ямала и Восточной Сибири / М.А. Тюрин, Е.А. Клейменов, В.А. Рябов, Д.М. Яковлев, М.Е. Бочаров // Научный журнал российского газового общества, 2016, №2 – С. 27-32.
5. Тюрин М.А. «Исследование воздействия динамических нагрузок на фундамент при работе ГПА» // Инновационный потенциал молодых ученых и специалистов ПАО «Газпром». Материалы научно-практических конференций молодых ученых и специалистов ПАО «Газпром» - призеров 2015 года. – СПб.; ООО «Газпром экспо», 2016. С. 133-139.
6. Тюрин М.А. Исследование воздействия динамических нагрузок на легкие фундаменты газоперикачивающих агрегатов в сложных геологических условиях / М.А. Тюрин, М.Е. Бочаров // 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.

7. Тюрин М. А. Особенности проектирования фундаментов ГПА на мощных искусственных основаниях на примере ГП-2 Бованенковского НГКМ. // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» проходившей в ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2010г.

8. Тюрин М. А. Особенности проектирования фундаментов ГПА на примере КС магистрального газопровода «Сила Сибири» и моделирование системы ГПА – фундамент – грунтовый массив с учетом гипотетически возможных аварийных ситуаций // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные проблемы развития газовой промышленности Восточной Сибири и дальнего Востока», проходившей в ПАО «ВНИПИГаздобыча», Саратов 2013г.

9. Тюрин М. А. Исследование динамических нагрузок на фундамент при работе ГПА // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» проходившей в ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2015г.

10. Тюрин М. А. Исследование амплитудно-частотных характеристик фундаментов газоперекачивающих агрегатов на грунтах Ямала и Восточной Сибири // Тезисы докладов XII всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» проходившей в РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2017 г.

Подписано к печати «__» ____ 2018 г.

Заказ № ____

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».