

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, <b>Козлов Сергей Иванович</b>
Официальные оппоненты:	<b>Шаммазов Ильдар Айратович,</b> доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов», ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»  <b>Ляпичев Дмитрий Михайлович,</b> 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  $\rho$ , модуль затухания колебаний  $\Phi$  и коэффициент постели  $k$  грунтов назначаются в соответствии с инженерно-геологическими изысканиями, имеют усредненное значение.

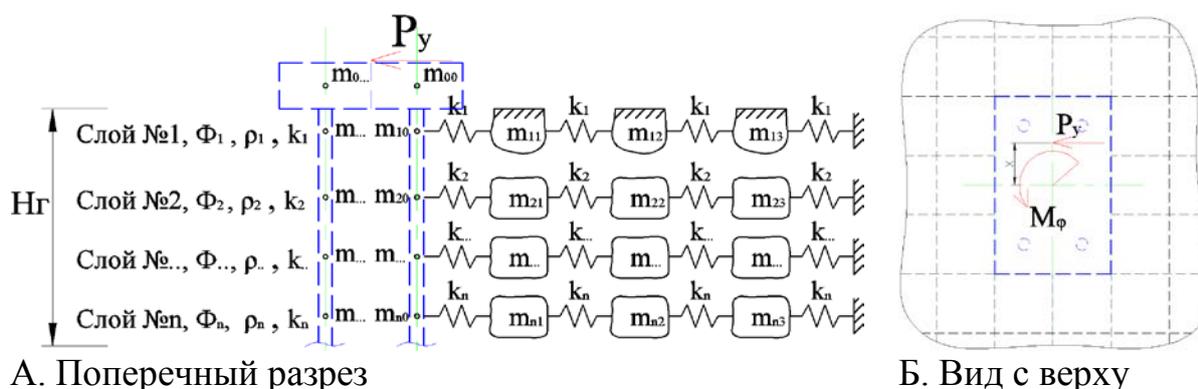


Рисунок 1. Расчетная модель системы ГПА-фундамент-грунтовое основание

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;  $\varphi$  – угол поворота, рад;  $K_y$  – коэффициент жесткости фундамента по направлению оси  $Y$ , Н/м;  $K_\varphi$  – коэффициент жесткости фундамента при повороте относительно оси  $Z$ , Н·м;  $\lambda_y, \lambda_\varphi$  – соответственно поступательные и крутильные круговые частоты собственных колебаний, 1/с;  $\omega$  – частота вынужденных колебаний, 1/с;  $\gamma$  – 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<sup>2</sup>;  $\Delta y_k, \Delta \varphi_k$  – линейное и угловое перемещение  $k$ -го центра масс ячейки системы ГПА-фундамент-основание от действия соответственно единичной силы  $P=1$ Н и момента  $M=1$ Н·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<sup>3</sup>;  $b$  – 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<sup>4</sup>;  $y$  – 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  $\lambda_{12}$ . Вычисляется разность собственных частот колебаний фундамента в первом  $\lambda_{11}$  и втором приближении  $\lambda_{12}$  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  $\gamma_1$  – сопротивления конструкции фундамента и внешнего  $\gamma_2$  – сопротивления среды

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

Параметр сопротивления колебаниям неоднородной внешней среды  $\gamma_2$ , вычисляется по формуле

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

где:  $k_a + k_r + k_n = 1$ ;  $\gamma_a$  – внешнее сопротивление колебаниям в воздушной среде;  $\gamma_r$  – то же в грунтовом основании;  $\gamma_n$  – 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  $H_{\Gamma}$ , с;  $\lambda$  – частота собственных колебаний фундамента, 1/с.

Неоднородность грунтового основания по модулю затухания колебаний грунтов до глубины  $H_{\Gamma}$  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  $H_{\Gamma}$ :

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

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  $H_{\Gamma}$ .

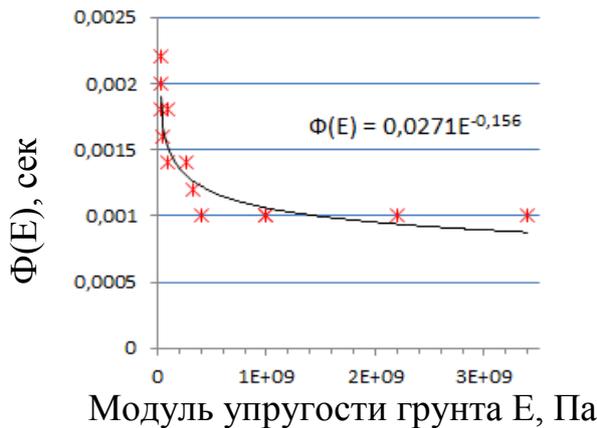
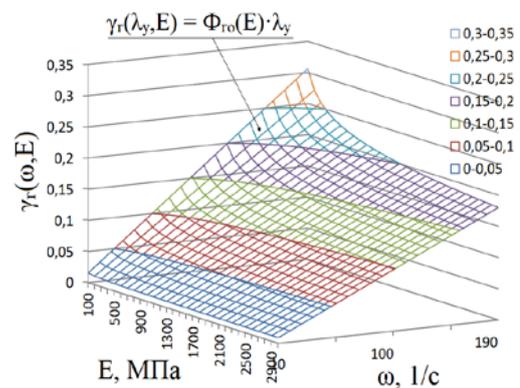
По результатам обработки инженерно-геологических изысканий проектов магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта», «Сила Сибири» и экспериментальных исследований демпфирующих свойств грунтов, приведенных в работах Савинова О.А, Коренева Б.Г, Павлюка Н.П., Сорокина Е.С. и других, сведены в таблицу экспериментальные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

Таблица 1 - Обобщение опытных данных для талых и мерзлых грунтов

Наименование грунтов	$\Phi$ , сек	$E$ , МПа	$k$ , Н/м <sup>3</sup>
<b>Мерзлые грунты:</b> 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
<b>Талые грунты:</b> 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
<b>Насыпные грунты:</b> 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  $\gamma_r(\lambda, E)$ 

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;  $k_p = U_{res}/U_{per}$  - 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  $\omega$  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.

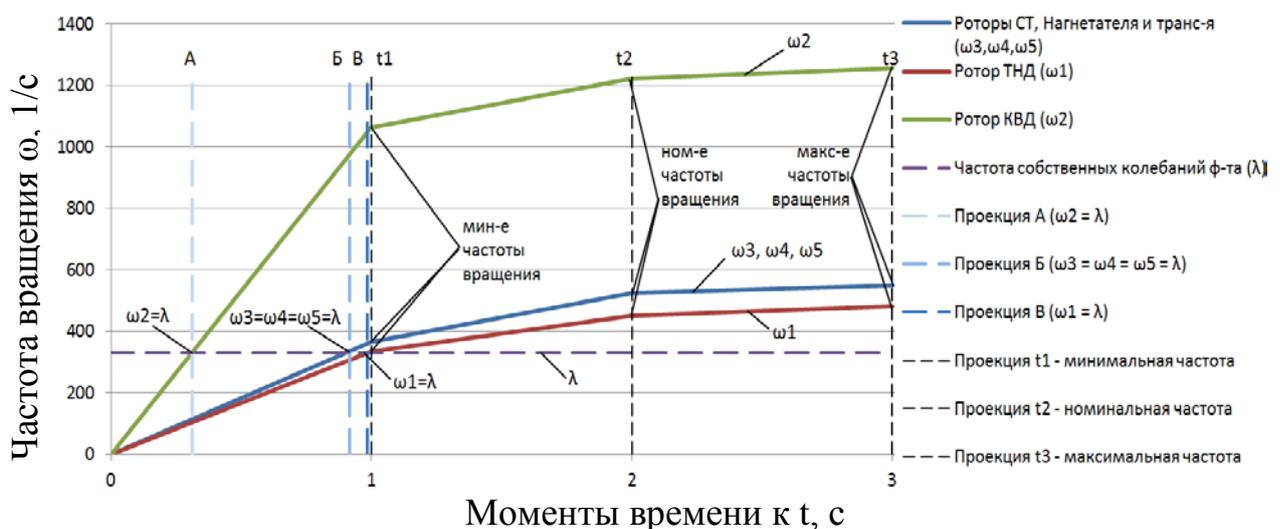


Рисунок 4. Графики изменения частот воздействия источников периодических нагрузок

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  $\omega_2$  более, чем в 2,5 раза превышает частоту собственных колебаний фундамента  $\lambda$ . В тоже время частоты вращения роторов  $\omega_{3,4,5}$  и  $\omega_1$  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.

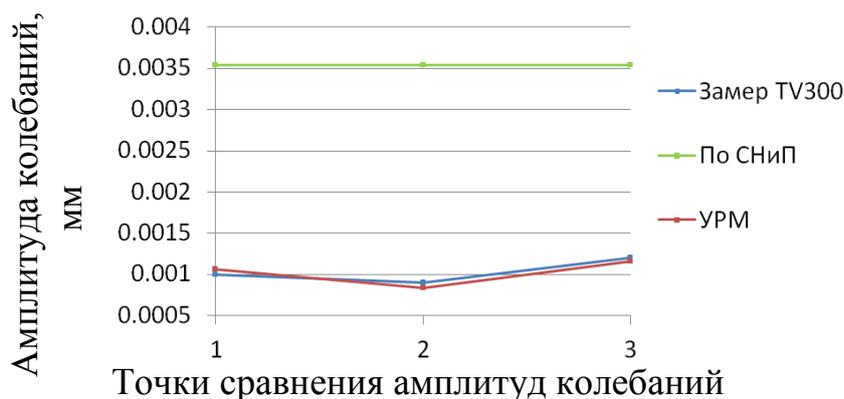
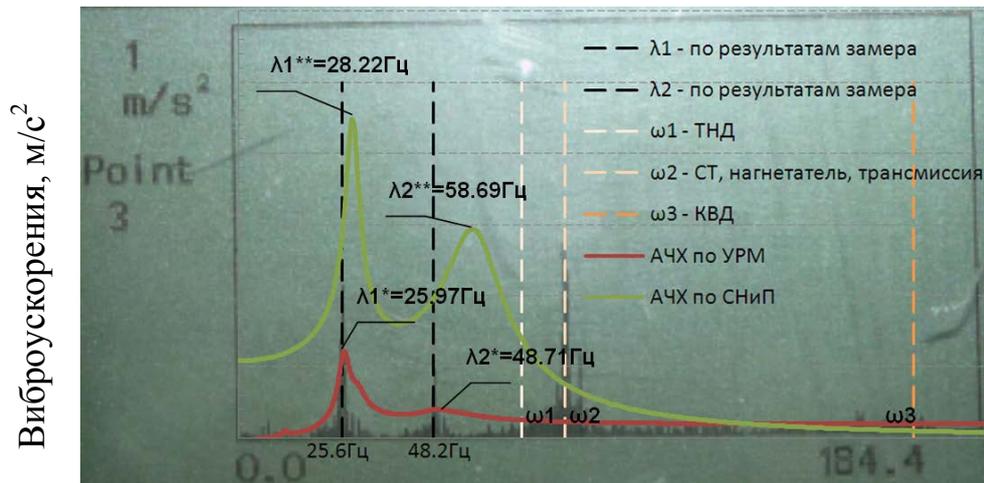


Рисунок 5. Сравнение расчетных амплитуд колебаний с результатами измерений

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 –  $\omega_1$ , силовой турбины, нагнетателя и трансмиссии –  $\omega_2$  и ротора компрессора высокого давления –  $\omega_3$ . 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  $a_r > 0.05 \text{ м/с}^2$ ; в песках (кроме указанных) и в пластичных глинистых грунтах при  $a_r > 0.15 \text{ м/с}^2$ . 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:  $\omega_{min}$  – минимальная эксплуатационная частота вращения роторов ГПА, 1/с;  $\omega^*$  – верхняя граница диапазона частот условно повышенных амплитуд колебаний 1/с, которой соответствует значение  $0,1 \text{ tg}(\alpha)_{min}$  в диапазоне частот  $\lambda_2$

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

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

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

$\lambda_{1,2}$  – 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  $\omega^*$  условного массивного типа фундамента, которому соответствует значение  $0,1tg(\alpha)_{min}$ . На рисунке 7 приведены графики зависимости показателя  $\omega^*$  от жесткости и массы надземной части фундамента ГПА.

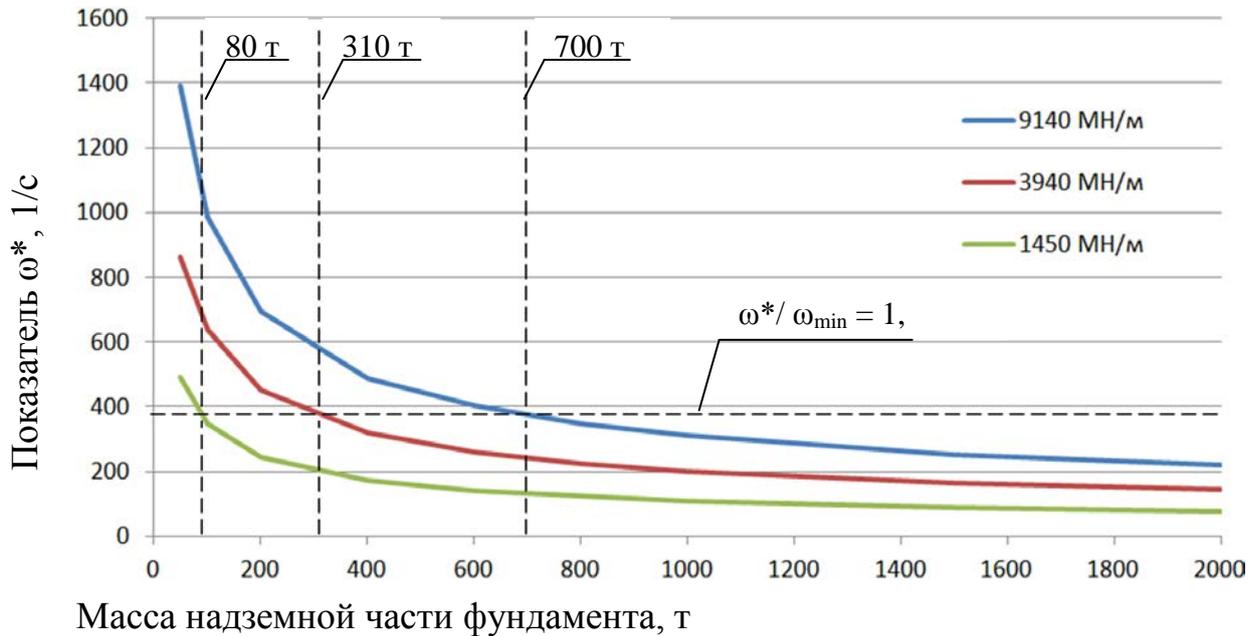


Рисунок 7. Графики зависимость показателя  $\omega^*$  от жесткости и массы фундамента

При вычислении показателя  $\omega^*/\omega_{min}$  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  $\lambda_n$  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  $\lambda_n$  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, $\text{м}^2$	$\lambda_n$ , 1/с	$\Delta\lambda$ , 1/с	$\lambda_n$ , 1/с	$\Delta\lambda$ , 1/с	$\lambda_n$ , 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  $\lambda_1$  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	
		$\lambda_1$ , 1/с	$A(\omega)_{\text{max}}$ , мм	$\lambda_1$ , 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.

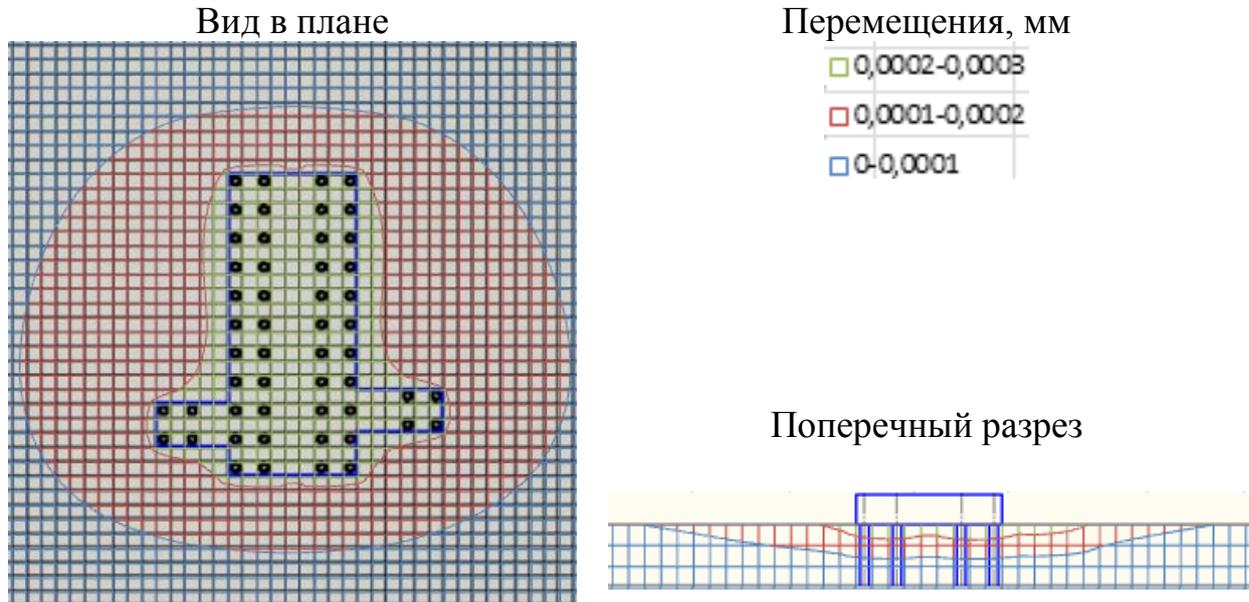


Рисунок 8. Амплитуды колебаний частиц грунтового основания при частоте вращения роторов  $n_1=n_4=n_5=5000$  об/мин,  $n_2 = 4300$  об/мин,  $n_3=11670$  об/мин.

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.

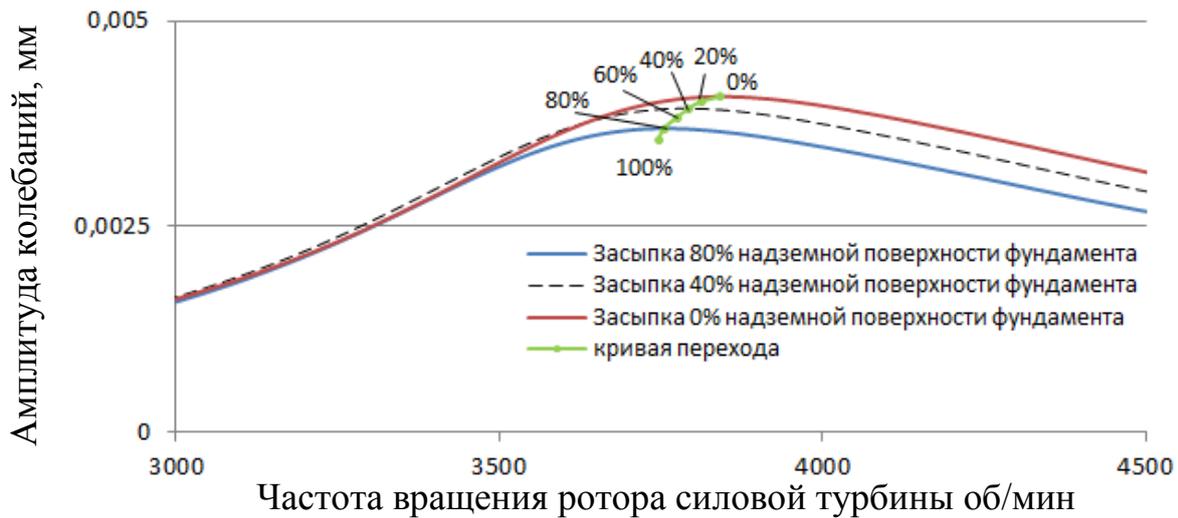
По результатам проведенных исследований частичная или полная засыпка надземной поверхности фундамента грунтом увеличивает площадь контакта фундамента с грунтовым основанием, жесткость системы фундамент-основание, параметр сопротивления упругим колебаниям, уменьшает амплитуду колебаний и изменяет частоту 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  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  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.

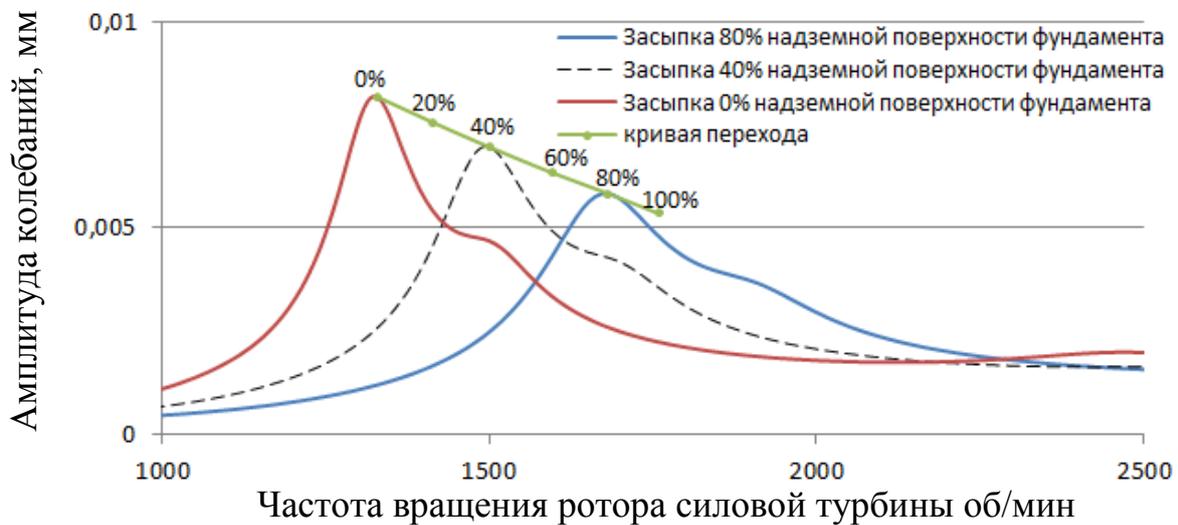
Таблица 6 - Зависимость параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от объема отсыпки

Объем отсыпки, м <sup>3</sup>	Размеры отсыпки, м	Грунтовые условия №1		Грунтовые условия №2	
		$\lambda_1$ , 1/с	$\lambda_2$ , 1/с	$\lambda_1$ , 1/с	$\lambda_2$ , 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/м<sup>3</sup> при  $L_3 = 108$ м. Кривая перехода на графиках изображает численное значение частоты собственных колебаний  $\lambda_1$  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  $\lambda_1$  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  $\lambda_1$  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».