

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ»  
(ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

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

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Козлов Сергей Иванович

Москва – 2018

## Оглавление

Введение.....	4
<b>ГЛАВА 1. Анализ взаимодействия ГПА, фундамента и грунтового основания.....</b>	<b>13</b>
1.1 Грунтовые условия полуострова Ямал и Восточной Сибири.....	13
1.2 Особенности мерзлых грунтов Ямала и Восточной Сибири.....	16
1.3 Массивные и Легкие фундаменты под ГПА в условиях Ямала и Восточной Сибири.....	19
1.4 Общие требования к проектированию фундамента ГПА.....	22
1.5 Основные положения современной теории расчетов фундаментов ГПА...	26
1.6 Воздействия и нагрузки на фундамент ГПА .....	29
1.7 Характеристики жесткости системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание.....	35
1.8 Демпфирующие свойства системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание.....	40
1.9 Параметр демпфирования в современной теории расчетов.....	45
1.10 Обоснование «Усовершенствованной расчетной модели».....	50
1.11 Цели и задачи исследования.....	53
1.12 Выводы.....	54
<b>ГЛАВА 2. Совершенствование современной расчетной модели взаимодействия ГПА с фундаментом и грунтовым основанием.....</b>	<b>56</b>
2.1 Усовершенствованная расчетная модель системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание.....	56
2.2 Взаимодействие свайного фундамента и грунтового основания.....	60
2.3 Влияние массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики фундамента.....	66
2.4 Сопротивление упругим колебаниям в системе ГПА-Фундамент-грунтовое основание.....	67

2.5 Периодические нагрузки от вращения роторов ГПА.....	73
2.6 Амплитуды колебаний фундамента ГПА от воздействия нескольких источников периодических нагрузок.....	81
2.7 Выводы.....	84
<b>ГЛАВА 3. Экспериментальная проверка математической модели системы ГПА – фундамент - грунтовое основание.....</b>	<b>85</b>
3.1 Аппаратура для решения виброметрической задачи .....	85
3.2 Описание объекта исследования.....	89
3.3 Расчет вибраций фундамента ГПА-25 «Урал» по строительным нормам...	91
3.4 Экспериментальная проверка математической модели фундамента.....	95
3.5 Выводы.....	98
<b>ГЛАВА 4. Практическое применение усовершенствованной расчетной модели на примере ГПА мощностью 25МВт на ГП-2 Бованенковского НГКМ.....</b>	<b>99</b>
4.1 Рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА.....	99
4.2 Показатели массивных фундаментов ГПА.....	104
4.3 Практическое применение усовершенствованной расчетной модели.....	108
4.4 Влияние массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундамента.....	113
4.5 Влияние засыпки надземной части фундамента на амплитудно-частотные характеристики.....	124
4.6 Выводы и общие рекомендации.....	131
Заключение.....	132
Список литературы.....	135

## Введение

Актуальность темы исследования. На территории России находятся крупнейшие в мире запасы природного газа. Основной ресурсной базой газовой промышленности на ближайшую перспективу являются месторождения Крайнего Севера, а также Восточной Сибири. Добыча и транспортировка газа все больше смещается в зону распространения многолетнемерзлых и вечномёрзлых грунтов.

Компрессорная станция (КС) – один из основных технологических объектов в составе систем добычи, хранения и транспорта газа. Сокращение затрат и сроков их строительства является актуальным для газовой отрасли. Одним из основных направлений решения данной задачи является отказ от массивных фундаментов и размещение газоперекачивающего оборудования на лёгких проветриваемых опорных конструкциях. Такой подход особенно актуален при строительстве в климатических и грунтовых условиях, удалённых районах без развитой инфраструктуры полуострова Ямал, Восточной Сибири [54], [83], [88].

Основное преимущество лёгких проветриваемых фундаментов под газоперекачивающие агрегаты (ГПА) в условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири можно охарактеризовать следующим образом:

- сравнительно низкая материалоемкость и затраты на транспорт строительных материалов до места строительства;
- не требуется производство бетонных работ (сырые процессы при отрицательных температурах), что актуально при строительстве в холодное время года в климатических условиях Крайнего Севера;
- грунтовое основание, сложенное мерзлыми грунтами, проветривается.

Тепло, выделяемое при работе ГПА, рассеивается в воздухе. Мерзлые грунты не подвержены растеплению, чего нельзя сказать о массивных фундаментах, которые закрывают грунтовое основание, не давая ему проветриваться, передают тепловую энергию от ГПА в грунтовое основание,

способствуя растеплению мерзлых грунтов и снижению их прочностных характеристик.

Производители ГПА выдвигают жесткие требования к опорным конструкциям. В техническом задании на проектирование амплитуда колебаний опорной конструкции от воздействия динамических нагрузок при эксплуатации ГПА-25 «Урал» не должна превышать 0,03мм. При отсутствии в задании на проектирование требований к предельно допустимой амплитуде колебаний, при частоте вращения ротора более 1500 об/мин по строительным нормам амплитуда горизонтальных колебаний фундамента газотурбинных ГПА не должна превышать 0,05мм. Для обеспечения указанных требований фундаменты ГПА, как правило, возводятся в массивном исполнении.

Степень разработанности темы исследования. В современной теории и действующих строительных нормах при вычислении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фундаментов под газоперекачивающие агрегаты:

- 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 составляет 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 сооружение 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.

В строительных нормах не регламентируются максимальные допустимые деформации фундаментов ГПА. В связи с этим нет возможности оценить, какие деформации являются допустимыми или недопустимыми в рамках действующих строительных норм, обязательных к применению в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

В свете Федерального закона (ФЗ) 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). Сегодня в строительных нормах нет рекомендаций по обеспечению требований статьи 16 ФЗ №384 к «механической безопасности» фундаментов ГПА с учетом возможных аварийных ситуаций.

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 является актуальной темой диссертации.

Цель диссертационной работы определение 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, включающей методику 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 включающая методику определения амплитудно-частотных характеристик фундаментов ГПА с учетом массы упруго-вязкого, линейно деформируемого неоднородного по слоям грунтового основания, которая позволяет 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.).

Работа «Исследование динамических нагрузок на фундамент при работе ГПА» удостоена диплома победителя на VI Научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» проходившей в ООО «Газпром ВНИИГАЗ, 2015г.

Работа «Исследование воздействия динамических нагрузок на легкие фундаменты газоперекачивающих агрегатов в сложных геологических условиях» удостоена диплома за II место на научной конференции молодых ученых и специалистов предприятий газовой промышленности и учебных заведений Саратовской области «Новые технологии в газовой отрасли» проходившей в ПАО «ВНИПИгаздобыча», 2016г.

Работа «Исследование амплитудно-частотных характеристик фундаментов газоперекачивающих агрегатов на грунтах Ямала и Восточной Сибири» удостоена диплома за III место на 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.

Работа «Особенности проектирования фундаментов ГПА на примере КС магистрального газопровода «Сила Сибири» и моделирование системы ГПА – фундамент – грунтовый массив с учетом гипотетически возможных аварийных ситуаций» стала призером и удостоена диплома III – степени на IV Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций ОАО «Газпром» «Актуальные проблемы развития газовой промышленности Восточной Сибири и дальнего Востока», проходившей в ПАО «ВНИПИгаздобыча», Саратов 2013г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них три в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России.

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.

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. 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.

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 и соответствующие упругие характеристики грунтов. По результатам обработки экспериментальных данных получена кривая в виде зависимости модуля затухания колебаний от модуля упругости грунта и построена двухпараметрическая функция параметра сопротивления упругим колебаниям в грунтовом основании.

Приведены результаты сравнения периодических нагрузок, вычисленных по методике усовершенствованной расчетной модели и по строительным нормам.

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 строительным нормам [70] с измеренными значениями при помощи виброметра TV300.

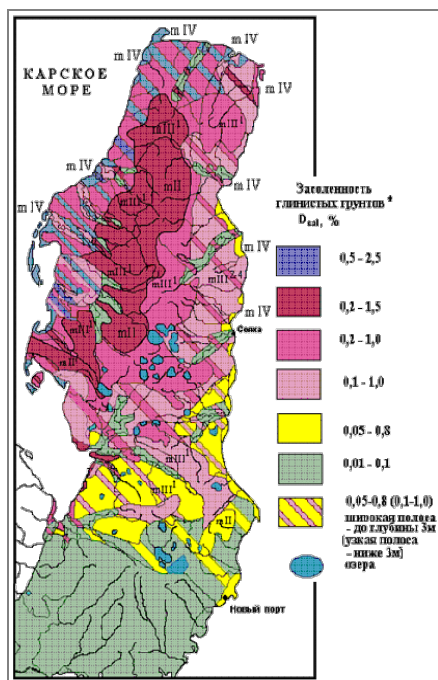
В четвертой главе. Разработаны рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА и «требований к механической безопасности» статьи 16 ФЗ№384. Разработан показатель массивных фундаментов ГПА.

В заключении сформулированы основные выводы, результаты и рекомендации по работе.

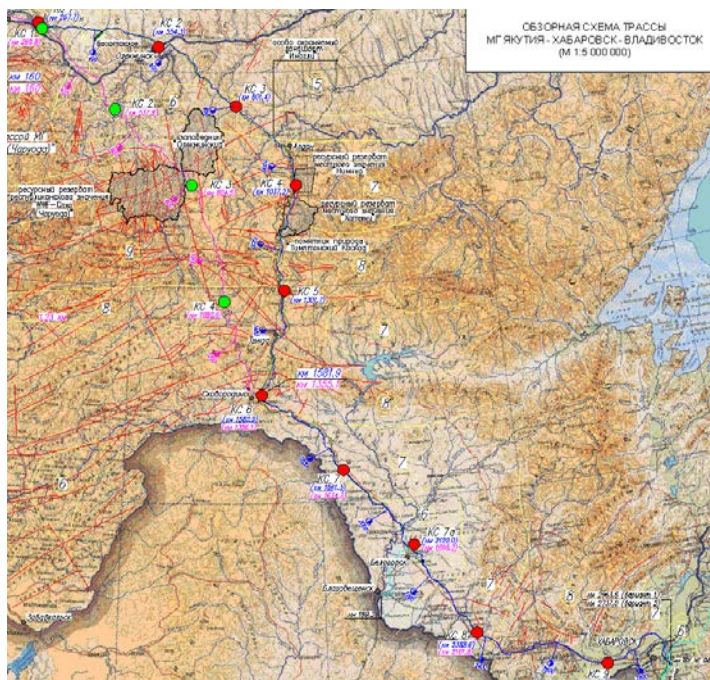
## ГЛАВА 1. Анализ взаимодействия ГПА, фундамента и грунтового основания

### 1.1 Грунтовые условия полуострова Ямал и Восточной Сибири

Добыча углеводородного сырья в настоящее время смещается в зону вечномёрзлых грунтов полуострова Ямал [54] и Восточной Сибири, рисунок 1.1. На территории Ямала завершается строительство газопровода «Бованенково-Ухта», а в Восточной Сибири начато строительство газопровода «Сила Сибири» протяженностью около четырех тысяч километров, который должен стать локомотивом развития газовой промышленности нашей страны на ближайшую перспективу. Реализация крупных нефтегазовых проектов XXI века представляет собой масштабное строительство различных объектов на территориях, не имеющих аналогов по степени сложности геологических условий. Грунты полуострова Ямал повсеместно засолены. На территориях Восточной Сибири также встречаются засоленные грунты. При повышении температуры несущая способность мерзлых, засоленных грунтов снижается [95].



А. Полуостров Ямал



Б. Газопровод «Сила Сибири»

Рисунок 1.1 - Полуостров Ямал [54] и Восточная Сибирь

На Ямале высокий уровень паводкового подтопления, поэтому на площадках обустройства Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ)

создают искусственные насыпи высотой от 3,5 до 7м, рисунок 1.2. Однако даже искусственные основания в условиях полуострова Ямал обладают недостаточной несущей способностью. Использовать такие основания недопустимо без их специальной подготовки, что приводит к увеличению стоимости и времени строительства.



Рисунок 1.2 - Паводок 2009 г. на территории Бованенковского НГКМ [54]

Основные факторы, затрудняющие строительство объектов газового комплекса в грунтовых условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири:

- Грунты в многолетнемерзлом и вечномерзлом состоянии;
- Засоленность грунтов;
- Высокий уровень паводков.

Газотранспортная система включает в себя газоперекачивающие агрегаты (ГПА) - инженерные сооружения, эксплуатация которых сопровождается тепловыделением, динамическими нагрузками на фундаменты, вибрациями и т.п.

Сооружения газового комплекса в зоне многолетнемерзлых пород строятся с сохранением их оснований в мерзлом состоянии. Основным типом фундаментов является свайный. Нормальные условия эксплуатации таких фундаментов обеспечивается за счет поддержания грунтов основания в мерзлом состоянии. Для этого применяют проветриваемые подполья и создают специальные

горизонтальные и вертикальные системы охлаждения грунтового основания, рисунок 1.3.



А. Проветриваемое подполье с



Б. Испарительная часть

вертикальными термостабилизаторами      горизонтальной системы охлаждения

Рисунок 1.3 - Системы охлаждения грунтового основания [54]

Проветриваемое подполье рассеивает теплоту, которая выделяется через пол отапливаемых зданий и сооружений, и тем самым обеспечивает сохранность мерзлых грунтов оснований.

Мероприятия по охлаждению (термостабилизации) грунтового основания нужны, но их недостаточно для обеспечения требований к "механической безопасности" фундамента ГПА. Статья 16 Федерального закона № 384 регламентирует, что выполнение требований механической безопасности должно быть обеспечено расчетами, подтверждающими, что в процессе строительства и эксплуатации здания или сооружения его строительная конструкция не достигнет предельного состояния по прочности и устойчивости. Однако в действующих строительных нормах отсутствуют рекомендации и методики расчета на аварийные ситуации.

Поскольку невозможно полностью исключить вероятность возникновения аварийных ситуаций, вызванных деятельностью человека (взрывы газа, теракты, пожары, наезды транспорта и т.д.) или природные явления (землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований), необходимо обеспечивать определенную степень безопасности за счет уменьшения

вероятности разрушения несущих конструкций. При помощи численного моделирования можно оценить устойчивость конструкции к возможным аварийным ситуациям, а также сопоставить возможные сценарии аварийных ситуаций.

## **1.2 Особенности мерзлых грунтов Ямала и Восточной Сибири**

Особенность мерзлых грунтов Ямала и Восточной Сибири состоит в том, что при повышении температуры их механические характеристики существенно изменяются: уже в отрицательном диапазоне температур грунты переходят в пластично мёрзлое состояние. Льдистость грунтов может достигать 60-90%. При оттаивании сильно льдистые грунты теряют свою несущую способность.

По категории льдистости грунты классифицируются на:

Сильно льдистые – содержание льда более 50%,

Льдистые - содержание льда от 25% до 50%,

Слабо льдистые - содержание льда менее 25%.

В соответствии с ГОСТ 25100-2011 мерзлый грунт это - грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий в своем составе видимые ледяные включения и (или) лед-цемент и характеризующийся криогенными структурными связями.

В зависимости от времени существования мерзлые грунты разделяются на:

Вечномерзлые – время существования более 100 лет;

Многолетнемерзлые – время существования от 3 до 100 лет;

Сезонно мёрзлые – 1...2 года;

Кратковременно мёрзлые – от нескольких часов до нескольких суток.

По физическому состоянию грунты классифицируются на:

Твердомерзлые – прочносаянные льдом, практически несжимаемые;

Пластично мёрзлые – обладают вязкими свойствами и характеризуются относительно большой сжимаемостью в мерзлом состоянии [56]. К таким грунтам



относятся мерзлые грунты при их величине отрицательной температуры более высокой, чем температура, характеризующая твердомерзлое состояние грунтов.

При действии внешней нагрузки на мерзлые грунты возникают деформации различного вида.

Виды деформаций мерзлых грунтов [95] разделяются на три основных класса:

- I – мгновенные деформации (упругие деформации в твердомерзлых грунтах),
- II – длительные деформации (деформации уплотнения в пластично мерзлых грунтах, вызванные их оттаиванием),
- III – деформации разрушения.

По опытным данным [95] зависимость модуля упругости мерзлых грунтов от отрицательной температуры при температуре до  $-10^{\circ}\text{C}$  имеет вид, рисунок 1.4

$$E(t) = 1000 \cdot (\alpha + \beta t), \quad [\text{МПа}] \quad (1.1)$$

где:  $t$  – отрицательная температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты определяемые опытным путем, приведенные в работе Цитовича Н.А. [95],  $\alpha = 0,5$  и  $\beta = 2,1$  – для песков;  $\alpha = 0,4$  и  $\beta = 1,4$  – для суглинков;  $\alpha = 0,5$  и  $\beta = 0,23$  – для глин.

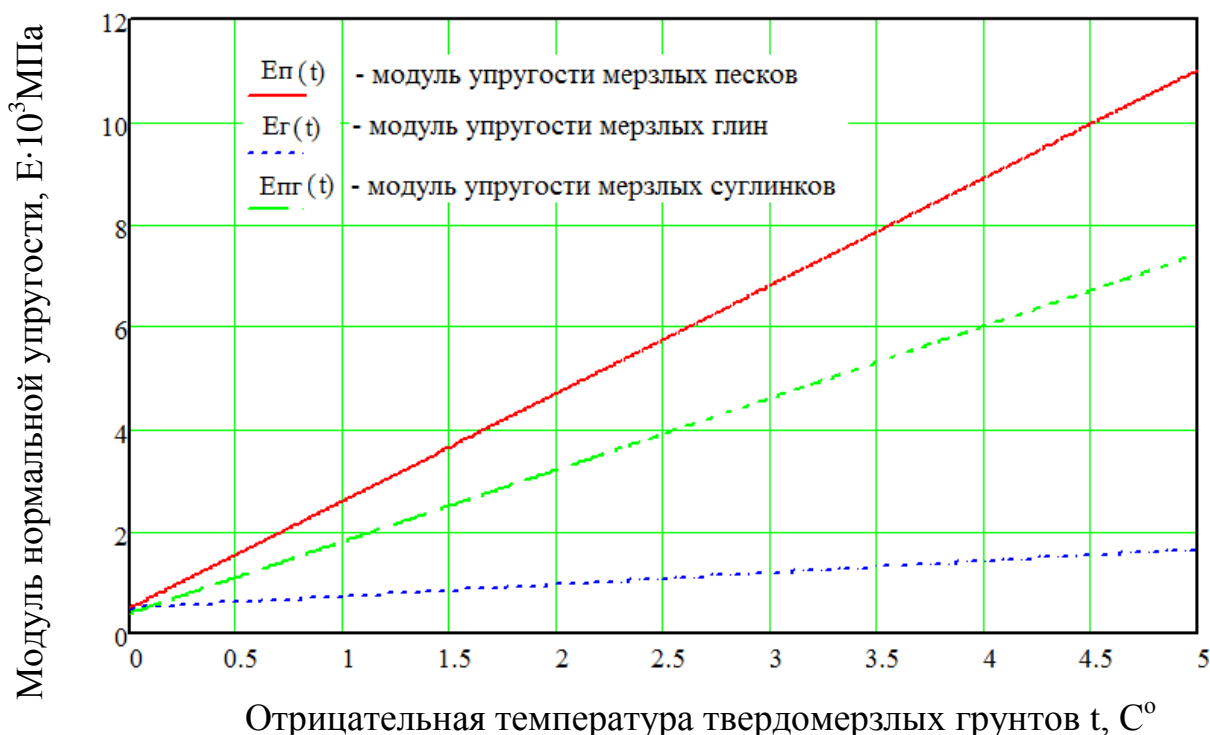


Рисунок 1.4 - Зависимость модуля упругости мерзлых грунтов от величины отрицательной температуры при внешнем давлении  $0,2\text{МПа}$

На основе зависимости (1.1) возможно определение упругих характеристик мерзлых грунтов по наблюдениям за температурным состоянием грунтового основания под фундаментом ГПА с использованием сети термометрических скважин (ТС). Графики температурного состояния и модуля упругости  $E(t)$  мерзлых грунтов по результатам замеров приведены на рисунке 1.5.

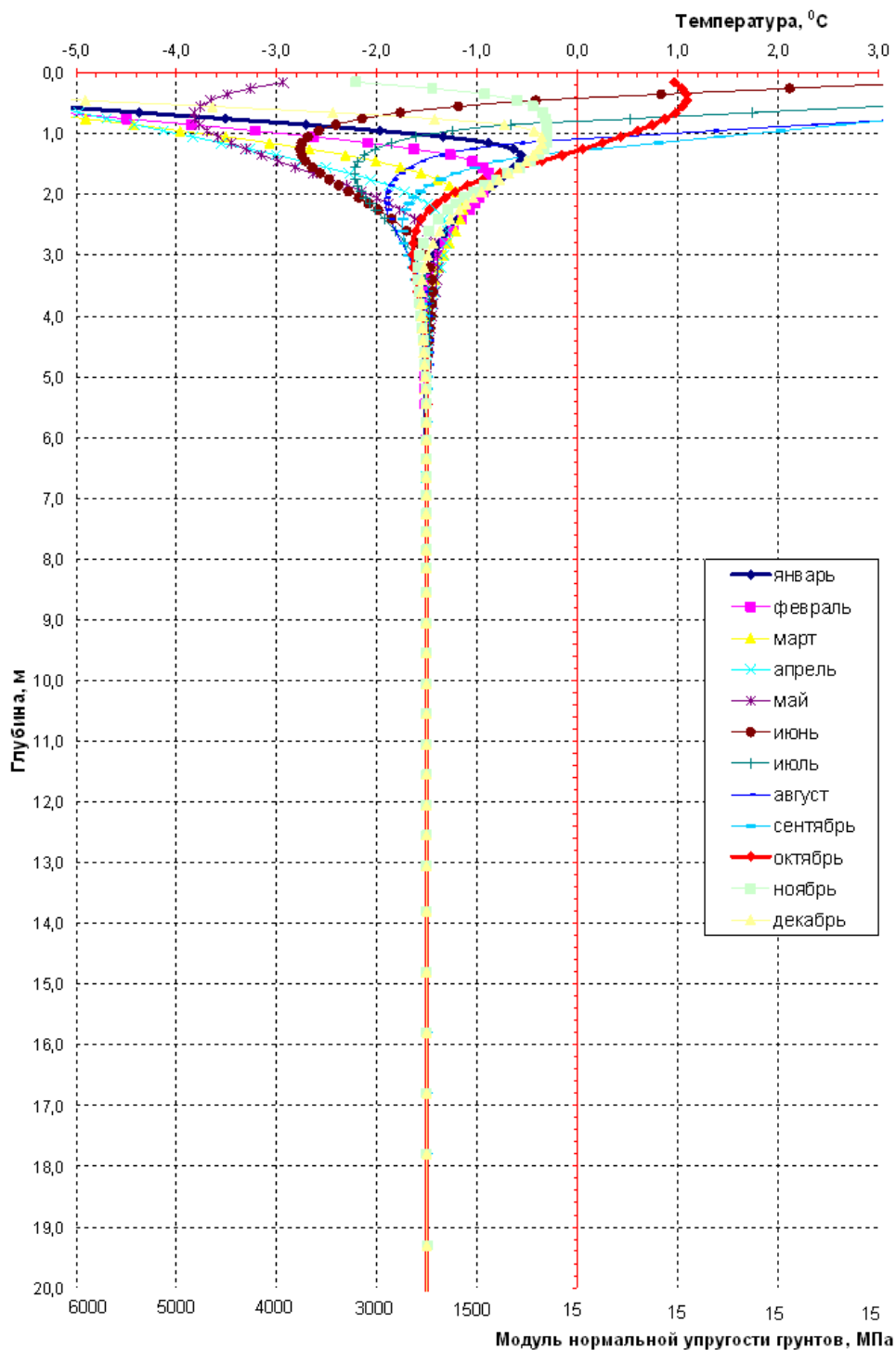


Рисунок 1.5 - Графики изменения температур и модулей упругости мерзлых грунтов в течение года

Для современных фундаментов ГПА средняя планируемая бесперебойная эксплуатация составляет более 30 лет. Длительные деформации вечномерзлых грунтов в основании ГПА недопустимы, поэтому необходимо предусматривать сохранение грунтов под фундаментами ГПА в твердомерзлом состоянии. Такие грунты по своим упругим характеристикам являются практически несжимаемыми. Для сохранения отрицательных температур твердомерзлых грунтов необходимо предусматривать конструкцию фундамента, которая позволяет проветривать грунтовое основание под ГПА, например легкие стальные конструкции.

Нужно отметить, что массивные железобетонные фундаменты полностью закрывают грунтовое основание и не позволяют ему проветриваться, обладают высокой теплопроводностью, передавая часть тепловой энергии в грунтовый массив. Это способствует повышению температуры и оттаиванию мерзлых грунтов. Легкие стальные фундаменты позволяют проветривать основание фундамента, что способствует сохранению температур грунтов основания в их естественном состоянии [54].

### **1.3 Массивные и Легкие фундаменты под ГПА в условиях Ямала и Восточной Сибири**

Тяжелые природные условия Ямала и Восточной Сибири: низкие отрицательные температуры (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), суровые и длинные зимы (7 - 9 месяцев), вечномерзлые грунты, а так же отдаленность от экономически развитых районов страны и слабое развитие транспортной сети (менее 0,2 км на 100 км территории) - приводят к тому, что стоимость строительства фундаментов под ГПА в несколько раз превышает стоимость их строительства в средней полосе страны.

В умеренной климатической зоне фундаменты под ГПА строятся в виде массивных железобетонных блоков обладающих сравнительно высокой массой. Вибрации и динамические нагрузки гасятся за счет массы фундамента. В

условиях Ямала и Восточной Сибири из-за большой материалоемкости и больших трудозатрат экономически не выгодно строительство массивных железобетонных фундаментов под ГПА. Более целесообразно в таких условиях применять легкие, проветриваемые, стальные типы фундаментов, таблица 1.1.

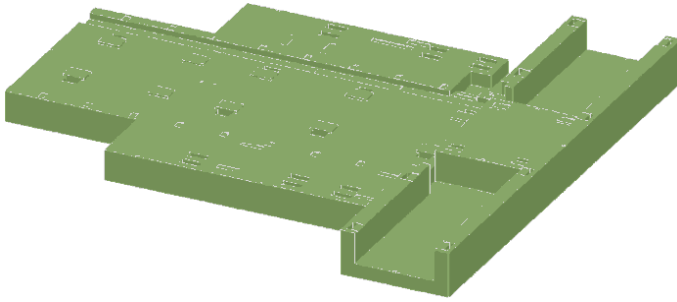
Таблица 1.1

Сравнение «Массивных железобетонных» и «Легких проветриваемых»  
фундаментов под ГПА

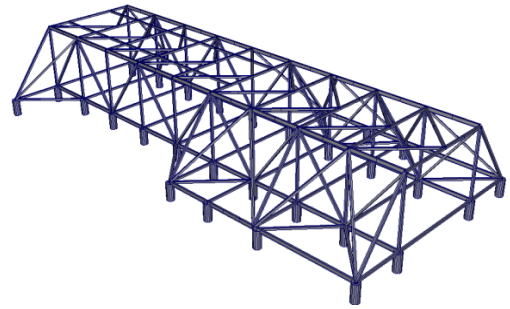
Массивные фундаменты	«Легкие проветриваемые фундаменты»
1. Свайное основание не проветривается.	1. Свайное основание проветривается.
2. Проведение бетонных работ (сырых процессов) и возведение массивных железобетонных ростверков в условиях отрицательных температур.	2. Для возведения стального ростверка бетонные работы (сырые процессы) не требуются.
3. Большая материалоемкость (суммарная масса бетона на один ростверк – 500т и более).	3. Сравнительно маленькая материалоемкость (суммарная масса всего ростверка 20...30т).
4. Удаленность и слабо развитая инфраструктура месторождений, увеличивают стоимость транспорта строительных материалов.	4. По сравнению с массивными ж.б. фундаментами затраты на транспорт строительных материалов в 8 ... 10 раз меньше.
5. По [69], [70] «Расчет вертикальных и горизонтальных колебаний массивных фундаментов ... производить не следует».	5. Для возведения легких стальных фундаментов под ГПА требуется обоснование [69], [70].

По результатам сравнения в таблице 1.1 необходимо отметить преимущества легкого фундамента по сравнению с массивным:

- Свайное основание проветривается, это создает условия для сохранения вечномерзлых грунтов в твердомерзлом состоянии, рисунок 1.6;
- Отсутствие бетонных работ при отрицательных зимних температурах снижает трудоемкость возведения таких фундаментов;
- Материалоемкость и затраты на транспорт, строительных материалов до места строительства меньше в 8 ... 10 раз.



А. Массивный железобетонный  
фундамент



Б. Легкий проветриваемый  
фундамент

Рисунок 1.6 - Массивные и «Легкие проветриваемые фундаменты» под ГПА

«Легкие проветриваемые фундаменты» не относятся к массивному типу фундаментов, поэтому требуется анализ на предмет воздействия динамических нагрузок, с учетом возможных аварийных ситуаций. Напомним, что по [70] горизонтальная амплитуда колебаний фундамента ГПА при частоте вращения ротора  $> 1500$  об/мин не должна превышать – 0,05мм.

Фундаменты под оборудование с динамическими нагрузками [70] могут быть: массивные, рамные, плитные. В строительных нормах упоминается, что для массивных фундаментов на твердомерзлых грунтах расчет на определение амплитуд колебаний не требуется. Но нет разъяснения, какими параметрами должен обладать массивный фундамент. К таким параметрам относятся масса фундамента, амплитудно-частотные характеристики и др. В связи с этим, необходимо создание рекомендаций, на основании которых возможно фундамент однозначно относить к массивному или не массивному типу. Необходима разработка методики по расчету амплитудно-частотных характеристик легких типов фундаментов, учитывающая влияние массы грунтового основания.

## 1.4 Общие требования к проектированию фундамента ГПА

В строительных нормах [70], сформулированы основные требования к проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками:

Фундаменты должны удовлетворять требованиям расчета по прочности;

Колебания фундаментов не должны оказывать вредного влияния на технологические процессы, оборудование и приборы, расположенные на фундаменте или вне его, а также находящиеся вблизи конструкции зданий или сооружений;

Фундаменты машин с динамическими нагрузками могут быть, бетонными, железобетонными монолитными, сборными, сборно-монолитными, а при соответствующем обосновании – металлическими [70]. По типу конструкции фундаменты машин делятся на: массивные; стенчатые; рамные; облегченные, различных конструктивных типов;

Фундаменты машин, как правило, должны быть отделены сквозным швом от смежных фундаментов здания, сооружения и оборудования, а также от пола.

Подожву фундаментов следует предусматривать прямоугольной формы в плане и располагать на одной отметке. Высоту фундаментов следует назначать минимальной из условий размещения технологического оборудования;

Фундаменты машин с динамическими нагрузками, мощностью 25 МВт и более, не допускается возводить на насыпных грунтах;

При проектировании свайных фундаментов следует стремиться к совмещению на одной вертикали центра тяжести (ЦТ) плана свай и линий действия равнодействующей статических нагрузок от веса машины и ростверка. Эксцентриситет не должен превышать, для грунтов с расчетным сопротивлением  $R_0 \leq 150$  кПа 3 %, а для грунтов с расчетным сопротивлением  $R_0 > 150$  кПа 5% размера стороны подошвы фундамента. На рисунке 1.7 на примере массивного железобетонного свайного фундамента под ГПА-16 «Урал» приведена схема расположения центров тяжести плана свай, машины и ростверка.

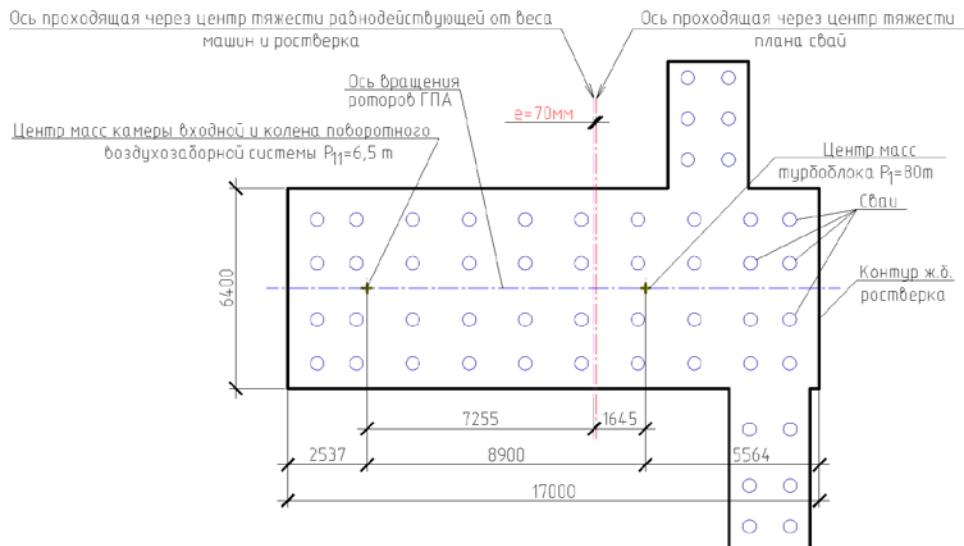


Рисунок 1.7 - Схема расположения центров тяжести свай, машины и ростверка

Выполнение перечисленных требований для фундаментов ГПА в условиях Ямала и Восточной Сибири затруднено из-за:

- климатических условий Ямала и Восточной Сибири, где из-за высокого уровня паводковых вод создают искусственные насыпи высотой до 7м.

- расположение технологических коммуникаций и конструкция ГПА - затрудняет выполнение требований по совмещению центра тяжести фундамента и линии действия равнодействующей всех статических нагрузок.

- для возведения легких стальных фундаментов под ГПА в соответствии с требованиями [69], требуется научное обоснование.

При возведении фундаментов под ГПА на слабых и насыпных грунтах Ямала необходимо учитывать возможную вертикальную деформацию фундамента от воздействия внешних нагрузок обусловленных весом фундамента, оборудования и т.д. В действующих строительных нормах максимальная допустимая деформация фундамента ГПА не нормируется, в связи с этим нет возможности оценить какие деформации являются допустимыми или недопустимыми в рамках действующих строительных норм. ГПА чувствительны к появлению малейших деформаций опорных конструкций. Нужно отметить, что «нулевая» деформация фундамента от воздействия внешних нагрузок - невозможна, так как любой материал обладает конечным модулем упругости и деформируется при воздействии силы.

По данным наблюдений проделанных в начале 80-х годов [5], [16] за деформациями фундаментов наружных газовых обвязок турбоагрегатов промыслов Медвежьего месторождения расположенного в пределах Надым-Пуровского района было обнаружено, что на 8-10-й год эксплуатации, ряд сооружений испытывают деформации обусловленные подвижкой фундаментов. На тот момент инструментальные наблюдения за величинами подвижек фундаментов не проводились, деформации фундаментов определялись по косвенным признакам: перекосам каркасов, изгибам трубопроводов, вибрациям турбоагрегатов [16] и т.д.

К середине 80-х годов из-за деформаций фундаментов неоднократно останавливались ГПА на ДКС для ремонта турбин и выравнивания опор газовых обвязок. В 1986-1990 годах была оборудована сеть инженерно-геологического мониторинга, включающая в себя деформационные марки на опорах наружных газовых обвязок турбоагрегатов [16]. На рисунке 1.8 приведены данные наблюдений за подвижками свайных фундаментов во времени на ДКС-6 Медвежьего месторождения.

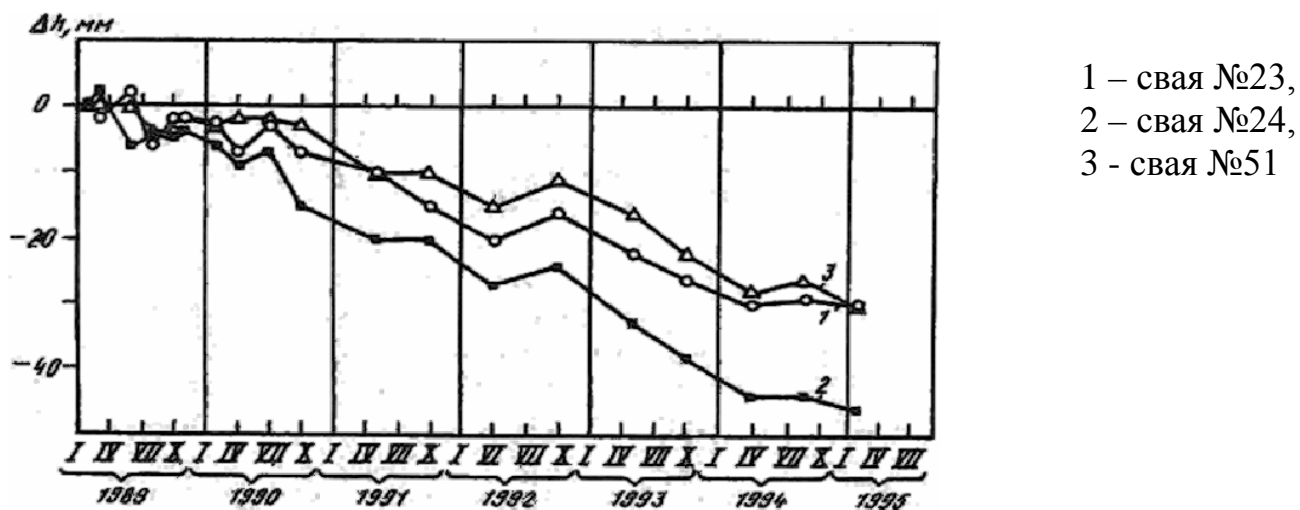


Рисунок 1.8 - Графики подвижки свайных фундаментов во времени на ДКС-6, «гитара», выход труб [16]

На основе анализа опытных данных и многолетнего опыта эксплуатации объектов газового комплекса показатель оценки деформационных явлений фундаментов ГПА от 0 до 5 мм считается допустимым по данным исследований



[16]. Деформация от 5 до 10 мм требует мер по выравниванию опор наружных газовых обвязок, деформация выше 10 мм – недопустима для нормальной эксплуатации ГПА [16]. В СТО Газпром 2-2.1-435-2010 даются рекомендации о предельных деформациях оснований фундаментов ГПА которые не должны превышать 10мм. Необходимо отметить, что в действующих строительных нормах предельная деформация фундамента ГПА не нормируется, по этому необходимо дополнение строительных норм в части показателей допустимости деформации.

Необходимо отметить, что по опытным данным [62] дополнительная осадка фундаментов появляется из-за сотрясений грунта. Поверхность фундамента ГПА соприкасающаяся с грунтовым основанием является источником сотрясений грунтов. В таблице 1.2 приводятся опытные данные влияния сотрясений на осадки опытных фундаментов при длительном воздействии [63].

Таблица 1.2

Данные, характеризующие влияние сотрясений грунта на осадки фундаментов

Ускорение колебаний поверхности грунта около фундаментов м/с <sup>2</sup>	Характеристика динамических осадок фундаментов	
	В водонасыщенных заиленных песках, текучепластичных глинах и других слабых грунтах	В песках , (кроме указанных рядом) и пластичных глинистых грунтах
<0.05	осадки < 2мм	Осадок нет
0.05 ... 0.15	осадки 2 – 3 мм/год	осадки 1 - 2мм/год
0.15 ... 0.30	осадки 3 – 5 мм/год	осадки 2 – 3 мм/год
0.30 ... 0.50	осадки > 5 мм/год	осадки 3 – 5 мм/год

В действующих строительных нормах нет рекомендаций по ограничению допустимых ускорений колебаний частиц грунта, приводящих к появлению дополнительных осадок фундаментов ГПА. На основе накопленных опытных данных, для предотвращения деформаций грунтового основания и фундамента ГПА от вибрационного воздействия динамических нагрузок, необходима разработка рекомендаций о допустимых ускорениях поверхности фундамента соприкасающейся с грунтовым основанием и оказывающее на него вибрационное воздействие.

## 1.5 Основные положения современной теории расчетов фундаментов ГПА

Вопросы проектирования и расчета фундаментов под турбоагрегаты и технологическое оборудование с периодическими нагрузками исследовались 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.

В трудах [34], [35], [36], [39], [40], [41], [49], [50], [51], [52], [53], [62], [63], [64] и многих других для расчета фундаментов ГПА на воздействие динамических нагрузок вводятся следующие допущения:

- 1) основание считается упругим и лишенным массы.
- 2) центр масс фундамента совпадает с осью приложения периодических нагрузок по осям X, Y, Z.

С учётом этих допущений, динамический расчет фундаментов сводился к задаче о колебаниях твердого тела на упругом основании. Колебания рассматриваемого вида, по оси X без учета затухания, описывается дифференциальным уравнением [31]

$$m \cdot x'' + K_x x = P_x(t), \quad (1.2)$$

где  $x = A_x \sin \omega t$  - отклонение фундамента от равновесного положения по направлению оси X в любой момент времени  $t$ , м;

$\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний фундамента, 1/с;

$P_x(t) = P_x \sin \omega t$  - возмущающая периодическая сила, Н;

$m$  – масса фундамента с установленном на нем оборудованием, кг;

$K_x$  – коэффициент жесткости системы фундамент – грунтовое основание, Н/м;

$\lambda_x = \sqrt{\frac{K_x}{m}}$  -угловая частота свободных поступательных колебаний фундамента в направлении оси X, 1/с.

Выражение для реакции грунтового основания, без учета затухания по [63] имеет вид

$$R_x = -Q - K_x \cdot x, \quad (1.3)$$

где  $Q = mg$  – вес тела,  $H$ ;

$m$  – масса тела, кг;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

В приведенном выше решении основание системы представляет собой идеально упругие невесомые связи. Такое допущение является приближенным. В действительности вследствие наличия внутреннего трения (неупругих сопротивлений) и рассеивания энергии в грунтовой массе колебания фундаментов оказываются затухающими.

В [38], [62], [63] и других работах зависимость между равнодействующей реакцией упругого основания и перемещениями фундамента представлена:

для горизонтальных перемещений по оси  $X$

$$R_x = K_x(x + \Phi x'), [H], \quad (1.4)$$

для вертикальных перемещений по оси  $Z$

$$R_z = K_z(z + \Phi z'), [H], \quad (1.5)$$

для поворота относительно оси  $Z$

$$L = K_\psi(\psi + \Phi \psi'), [H \cdot m], \quad (1.6)$$

где  $\Phi$  – коэффициент (модуль затухания), характеризующий неупругие сопротивления грунтового основания перемещением фундамента, в сек.

На основе выше изложенных допущений динамический расчет фундамента включает в себя определение горизонтальных, вертикальных и крутильных амплитуд колебаний из уравнений, описывающих колебания фундамента [62]:

Вынужденные поступательные колебания по направлению оси  $X$ ,

$$m \cdot x'' + \Phi \cdot K_x \cdot x' + K_x x = P_x(t) \quad (1.7)$$

Вынужденные поступательные колебания по направлению оси  $Z$ ,

$$m \cdot z'' + \Phi \cdot K_z \cdot z' + K_z z = P_z(t) \quad (1.8)$$

Вынужденные крутильные колебания вокруг вертикальной оси  $Z$ ,

$$\theta \cdot \psi'' + \Phi \cdot K_\psi \cdot \psi' + K_\psi \psi = P_\psi(t) \quad (1.9)$$

Где  $\psi = A_\psi \sin \omega t$  – угол поворота фундамента относительно вертикальной оси в любой момент времени  $t$ , рад;

$\omega$  – угловая частота вынужденных колебаний фундамента, 1/с;

$M_\psi(t) = M_\psi \sin \omega t$  – возмущающий периодический момент пары сил, Н·м;

$K_\psi$  – коэффициент угловой жесткости системы фундамент – грунтовое основание, Н·м/рад.

$\lambda_\psi = \sqrt{\frac{K_\psi}{\theta}}$  – угловая частота свободных крутильных колебаний фундамента

относительно вертикальной оси Z, 1/с;

$\theta$  – момент инерции массы фундамента относительно вертикальной оси, кг·м<sup>2</sup>.

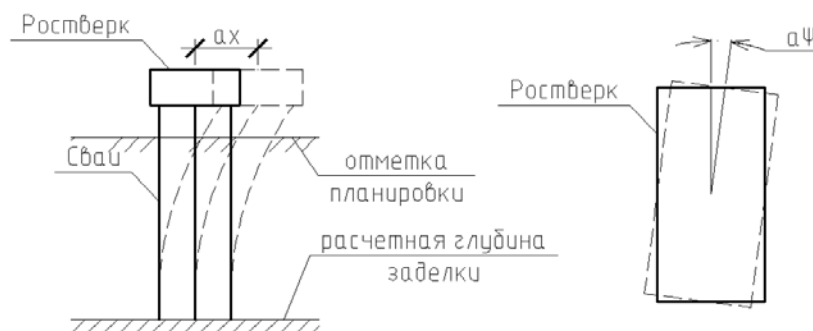
Используемые условные обозначения для формулы (1.7)  $x$ ,  $P_x$ ,  $K_x$ ,  $\lambda_x$  те же, что для (1.2). Условные обозначения для формулы (1.8)  $z$ ,  $P_z$ ,  $K_z$ ,  $\lambda_z$  – такие же, как в (1.2) и (1.7) отличаются только направлением по оси Z.

В современной теории расчета фундаментов по действующим строительным нормам [70], решается задача колебания системы с одной степенью свободы. Расчетные амплитуды колебаний фундамента по [70] согласуются с (1.7), (1.8), (1.9) и определяются как сумма поступательных и крутильных колебаний, рисунок 1.9:

$$a_{h,\psi} = a_x + a_\psi l_b, \quad (1.10)$$

где  $a_x$  – амплитуда горизонтальных колебаний центра тяжести верхней плиты, м;

$a_\psi$  – амплитуда (угол поворота), радиан, крутильных колебаний верхней плиты относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести фундамента.



А. Поступательные колебания

Б. Крутильные колебания

Рисунок 1.9 - Амплитуды колебаний ростверка

## 1.6 Воздействия и нагрузки на фундамент ГПА

Газоперекачивающие агрегаты это сложные технические объекты, от работы которых зависит безопасность и экономическая эффективность транспортировки природного газа по магистральным газопроводам. ГПА находят применение в головных (ГКС), линейных (ЛКС) и дожимных (ДКС) компрессорных станциях магистральных газопроводов, а также в подземных хранилищах газа (ПХГ) и в специальных технологических устройствах.

Нагрузки, передаваемые на фундамент от ГПА, разделяются на:

- статические (от веса оборудования),
- динамические (центробежные силы от вращения роторов, особые нагрузки, связанные с аварийными ситуациями и т.п.).

Для расчета фундаментов под ГПА в соответствии с действующими строительными нормами необходимы следующие исходные данные:

- технологические характеристики машин (наименование, тип, частота вращения роторов, мощность, общая масса и масса движущихся частей);
- данные о значениях, местах приложения и направлениях действия статических нагрузок, а также об амплитудах, частотах, законе изменения во времени, местах приложения и направления действия динамических нагрузок в условиях нормальной эксплуатации, а также в аварийных режимах;

На рисунок 1.10 изображены схемы расположения центров масс роторов на примере ГПА-16 «Урал», в таблице 1.3 приведены данные для расчета динамических нагрузок по документации производителей ГПА-10 .... ГПА-32.

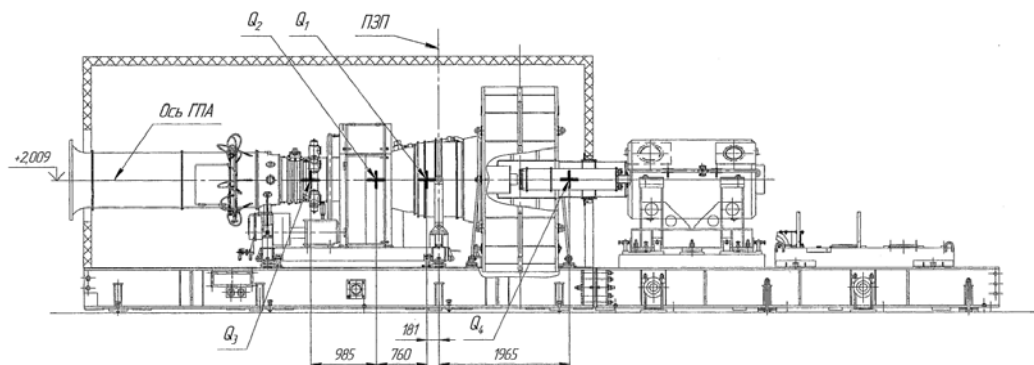


Рисунок 1.10 - Схема расположение центров масс роторов ГПА-16«Урал»

## Данные для расчета динамических нагрузок

Параметр	ГПА10 «Урал»	ГПА12 «Урал»	ГПА16 «Урал»	ГПА25 «Урал»	ГПА32 «Ладога»
<b>Номинальная мощность, МВт</b>	10	12	16	25	32
<b>Ротор силовой турбины (СТ)</b>					
Масса, Q <sub>1</sub> [кг]	120	650	650	670(750)	2250
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	9450	6825	5631	5250	-
номинальная	9000	6500	5300	5000	5715
минимальная	6300	4550	3710	3500	-
<b>Ротор турбины высокого давления (ТВД)</b>					
Масса, Q <sub>2</sub> [кг]	180	182	187	-	6770
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	11000	11204	10963	-	-
номинальная	10720	11027	10844	-	7455
минимальная	7504	8695	9751	-	-
<b>Ротор турбины низкого давления (НД)</b>					
Масса, Q <sub>2</sub> [кг]	-	-	-	753(853)	2500
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	-	-	-	4600	-
номинальная	-	-	-	4300	5307
минимальная	-	-	-	3200	-
<b>Ротор компрессора высокого давления (КВД)</b>					
Масса, Q <sub>3</sub> [кг]	173,5	190	191	410(510)	-
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	11000	11204	10963	12000	-
номинальная	10720	11027	10844	11670	-
минимальная	7504	8695	9751	10150	-
<b>Трансмиссия ГТУ</b>					
Масса, Q <sub>4</sub> [кг]	152	152	-	160(180)	5715
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	9450	6825	5631	5250	-
номинальная	9000	6500	5300	5000	5307
минимальная	6300	4550	3710	3500	-
<b>Двигатель</b>					
Масса, Q <sub>5</sub> [кг]	3400	3780	5670	7600	-
<b>Ротор нагнетатель</b>					
Масса, Q <sub>6</sub> [кг]	470	780	1350	1350	1576
Скорость вращения [об./мин.]:					
максимальная	-	-	-	-	-
номинальная	-	-	-	-	5555
минимальная	-	-	-	-	-

На рисунке 1.11 изображена схема приложения максимальных допустимых сил и моментов, действующих на компрессор относительно его центральных осей по требованиям технической документации производителей ГПА, в таблице 1.4 приведены численные значения этих сил и моментов для ГПА-10 ... ГПА-32.

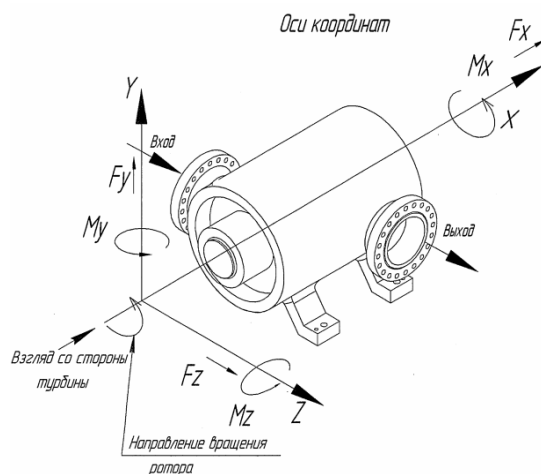


Рисунок 1.11 - Схема допустимых нагрузок на фланцы компрессора ГПА-16

Таблица 1.4

Максимальные допустимые нагрузки на компрессор, указанные в технической документации производителей ГПА.

Тип ГПА	Суммарные максимально допустимые силы и моменты, действующие на компрессор, относительно его центральных осей.	
	Суммарные силы F, Н	Суммарные моменты M, Н*м
ГПА-10	$F_x \leq 9000$ $F_y \leq 22700$ $F_z \leq 18200$	$M_x \leq 13800$ $M_y \leq 6900$ $M_z \leq 6900$
ГПА-12	$F_x \leq 33000$ $F_y \leq 85000$ $F_z \leq 68000$	$M_x \leq 50000$ $M_y \leq 25000$ $M_z \leq 25000$
ГПА-16	$F_x \leq 33000$ $F_y \leq 85000$ $F_z \leq 68000$	$M_x \leq 50000$ $M_y \leq 25000$ $M_z \leq 25000$
ГПА-25	$F_x \leq 36360$ $F_y \leq 91480$ $F_z \leq 73180$	$M_x \leq 55560$ $M_y \leq 27780$ $M_z \leq 27780$
ГПА-32	$F_x \leq 36360$ $F_y \leq 91480$ $F_z \leq 73180$	$M_x \leq 55560$ $M_y \leq 27780$ $M_z \leq 27780$

На рисунке 1.12 изображена схема расположения опорных платиков рамы ГТУ и рамы компрессора для ГПА-16, в таблице 1.5 приведены результирующие нагрузки от веса рам ГТУ и компрессора.

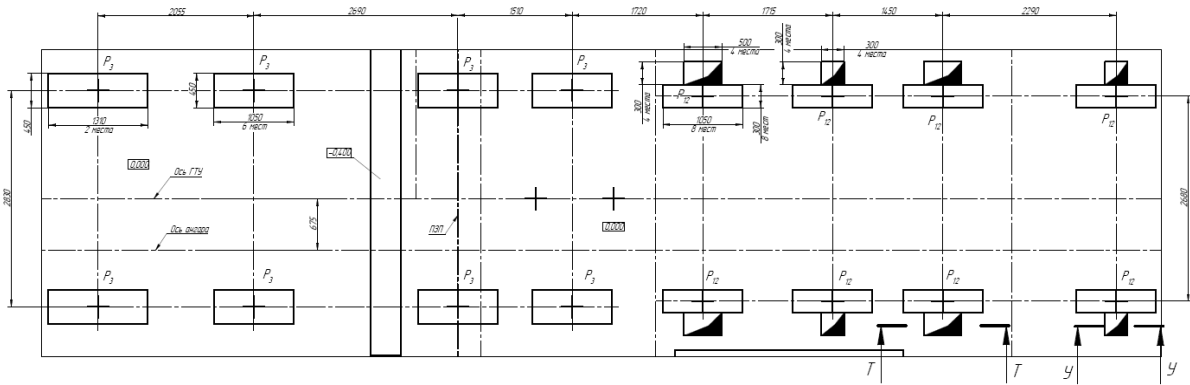


Рисунок 1.12 - Схема расположения платиков  $P_3$  - рамы ГТУ и платиков  $P_{12}$  рамы - компрессора ГПА-16

Таблица 1.5

Результирующие нагрузки от веса рам ГТУ и компрессора.

Наименование оборудования	ГПА10	ГПА12	ГПА16	ГПА25	ГПА32
Вес рамы силовой турбины с установленным оборудованием, [кг].	6000	6500	6500	10500	70000
Вес рамы компрессора турбины с установленным оборудованием, [кг].	5500	10000	10000	15000	50000

Проектирование и расчет фундаментов под ГПА выполняется с учетом технологических особенностей ГПА, расположения опорных закладных деталей в плане и по высоте, статических нагрузок от веса оборудования, динамических нагрузок от вращения роторов, нагрузок на фланцы компрессора и др.

В соответствии с положениями [70] расчетные динамические нагрузки от воздействия движущихся частей машины различаются - для вычисления амплитуд колебаний и усилий в элементах конструкции фундамента.

По действующим строительным нормам для расчета амплитуд колебаний динамические нагрузки определяется как произведение нормативной динамической нагрузки  $F_n$  соответствующей нормальным условиям эксплуатации машины и коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f = 1$ .

При расчете прочности элементов конструкций фундамента [70] расчетная динамическая нагрузка определяется как эквивалентная статическая нагрузка

$$F_d = \gamma_f \eta F_n \quad (1.11)$$



В таблице 1.6 приведены численные значения коэффициентов надежности  $\gamma_f$  и динамичности  $\eta$  для определения  $F_d$ , по [70].

Таблица 1.6

Численные значения коэффициентов  $\gamma_f$  и  $\eta$ 

Частота вращения, об/мин	Коэффициент надежности $\gamma_f$	Коэффициент $\eta$ для нагрузок	
		вертикальных	горизонтальных
менее 500	4	3	2
от 500 до 1500	4	3-6*	2
от 1500 до 2000	4	6-10*	2
св. 2000	4	10	2

В [70] коэффициент динамичности  $\eta$  характеризует зависимость  $F_d$  в от частоты вращения роторов ГПА. Для вычисления усилий в элементах конструкции фундамента, по строительным нормам не требуется определять частоты собственных колебаний фундамента, при прохождении которых усилия могут возрастать многократно. По строительным нормам, назначаются коэффициенты динамичности  $\eta$  в зависимости от частоты вращения роторов и направлений нагрузок, таблица 1.6. На рисунке 1.13 приведен график изменения суммарной горизонтальной и вертикальной эквивалентных статических нагрузок от роторов на примере ГПА «Урал» мощностью 16МВт, по рекомендациям [70].

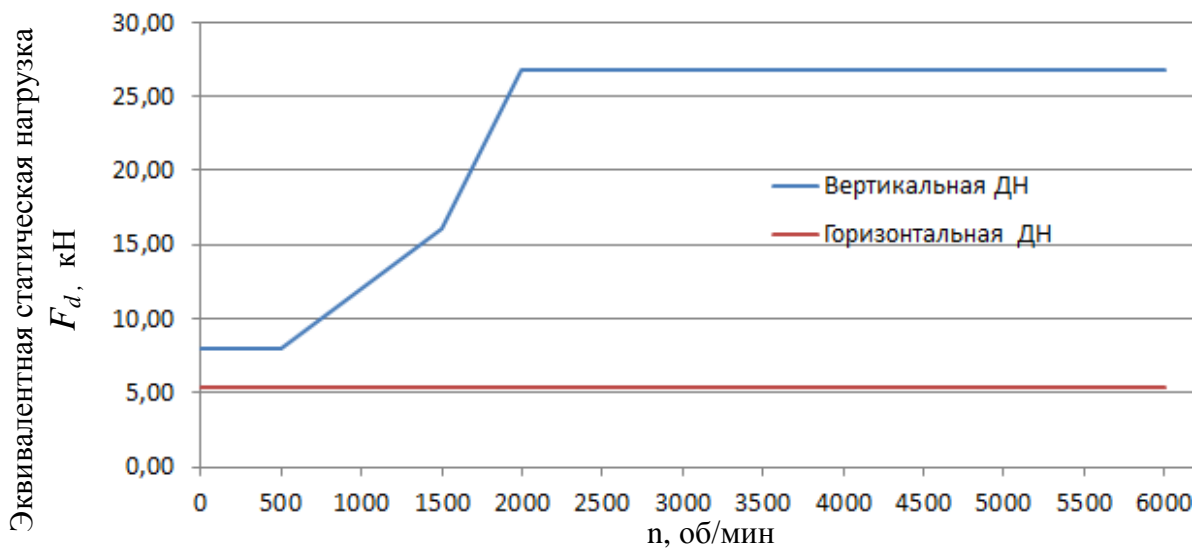


Рисунок 1.13 - График изменения суммарной горизонтальной и вертикальной эквивалентной статической нагрузки на примере ГПА-16 «Урал»

Резонансная частота вращения ротора ГПА – это его угловая частота вращения  $\omega$ , 1/сек, которая численно равна собственной частоте колебаний фундамента  $\lambda$ , 1/сек.

Необходимо отметить, что в соответствии с [70] для газотурбинных двигателей (ГТД) мощностью более 25 МВт значение коэффициента  $\eta$  следует уменьшать в два раза, по сравнению с ГТД мощностью которых менее 25МВт.

По [70] коэффициент  $\eta$  относится к железобетонным фундаментам, для стальных фундаментов значение коэффициента  $\eta$  не регламентируется, поэтому требуется доработка норм на предмет добавления рекомендаций по расчету легких стальных фундаментов под ГПА.

При отсутствии в задании на проектирование нормативных динамических нагрузок (вертикальных  $F_{n,v}$  и горизонтальных  $F_{n,h}$ , Н), по [70] нагрузки определяются по формуле:

$$F_{n,v} = F_{n,h} = \mu \sum_{i=1}^s G_i \quad (1.12)$$

где  $\mu = 0,2$  - коэффициент пропорциональности для ГТД, по [70];

$s$  - число роторов;  $G_i$  - вес каждого ротора машины, кН.

Расчетные динамическая нагрузка по [70] для легких типов фундаментов могут не соответствовать реальным динамическим нагрузкам возникающих при работе газотурбинных ГПА так как:

- коэффициент динамичности  $\eta$  строго регламентируется в зависимости от частоты вращения роторов и направлений нагрузок, при этом не учитывается остаточный дисбаланс роторов двигателя и компрессора ГПА;

- при мощности газотурбинных ГПА более 25МВт значение коэффициента  $\eta$  для вертикальных нагрузок следует уменьшать в два раза, таким образом, при всех прочих равных показателях расчетная динамическая нагрузка от работы ГПА мощностью 25,01МВт в 2 раза меньше, чем у ГПА мощностью 24,99МВт;

- в [70] не реализована методика определения динамических нагрузок для стальных фундаментов, так как коэффициент  $\eta$  относится к железобетонным фундаментам, для стальных фундаментов в [70] коэффициент  $\eta$  не регламентируется;

- по [70] для ГТД нормативная динамическая нагрузка вычисляется как произведение суммарной массы всех роторов на коэффициент пропорциональности  $\mu = 0,2$ . По [70] динамическая нагрузка  $F_n$ , имеет постоянное значение, не зависит от частоты вращения и дисбаланса роторов двигателя и компрессора ГПА.

Учитывая выше сказанное необходимо создание рекомендаций по определению динамических нагрузок от работы ГПА, для легких стальных фундаментов, возводимых в условиях Ямала и Восточной Сибири.

## **1.7 Характеристики жесткости системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание**

Основная упругая характеристика естественного основания фундаментов - коэффициент упругого равномерного сжатия  $C_z$  - определяется по результатам испытаний по методике [70]. Как правило, на стадии проектирования и расчета фундаментов ГПА на компрессорных станциях, испытания грунтового основания для определения коэффициента  $C_z$  - не выполняются. В реальных условиях выполняются испытания несущей способности свайных фундаментов во время строительства, но это не имеет отношение к определению упругих характеристик основания  $C_z$ .

По [38], [62], [70] при отсутствии экспериментальных данных значение  $C_z$  [кН/м<sup>3</sup>] определяется по формуле

$$C_z = b_o \cdot E \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right), \quad (1.13)$$

где  $b_0$  - коэффициент,  $m^{-1}$ , принимаемый равным для песчаных грунтов 1, для супесей и суглинков 1,2, для глин и крупнообломочных грунтов 1,5;

$E$  - модуль деформации грунта под подошвой фундамента;

$A$  - площадь подошвы фундамента,  $m^2$ ;

$A_{10}=10 m^2$ .

Необходимо отметить, что  $C_z$  по [38], [70], соответствует случаю, когда грунтовое основание по своим упругим характеристикам однородное. На практике однородные основания встречаются редко. Грунтовые основания представлены множеством напластований инженерно-геологических элементов, рисунок 1.14. Грунтовое основание неоднородно в вертикальной и горизонтальной плоскости. В строительных нормах не упоминается о том, как вычислять  $C_z$  в том случае, если грунтовое основание сильно неоднородное.

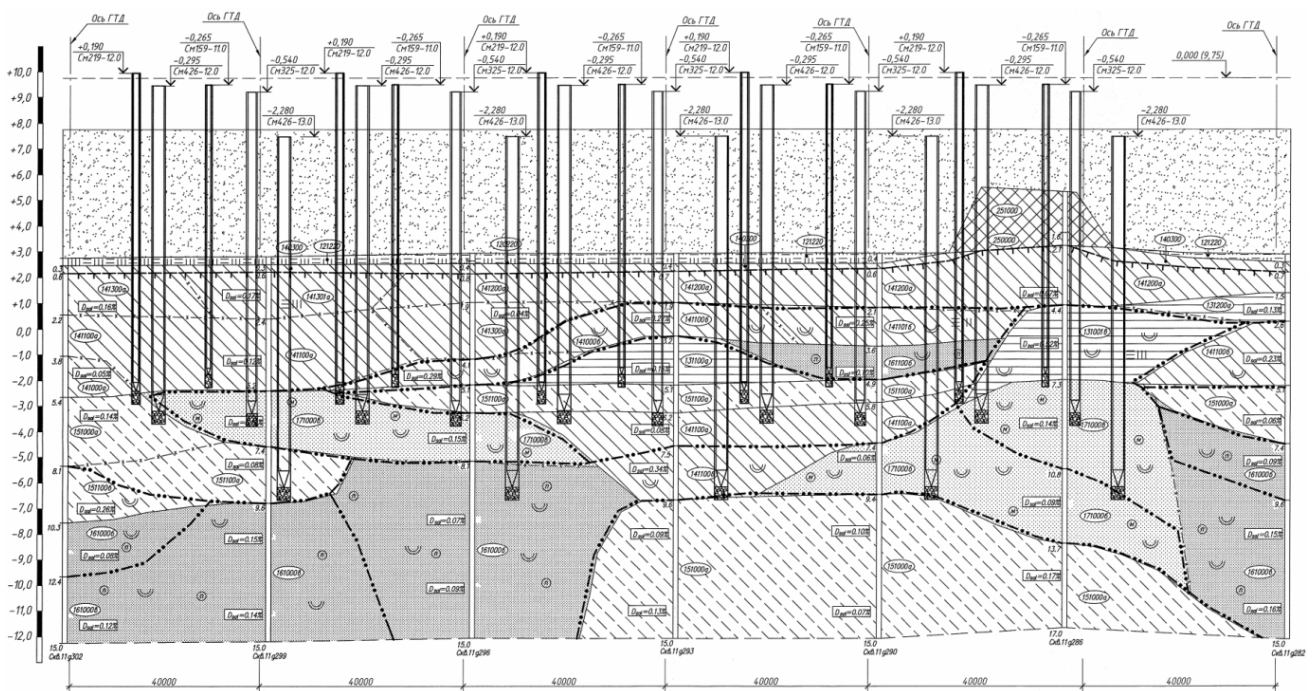


Рисунок.1.14 - Геологический разрез грунтового основания под Компрессорным цехом дожимной компрессорной станции ГП-2 Бованенковского НГКМ

Для определения амплитуд колебаний, соответствующих горизонтальным и крутильным формам колебаний по [38], [70], используются коэффициенты упругого неравномерного сжатия  $C_\varphi$  [ $kH/m^3$ ], упругого равномерного

сдвига  $C_x$  [кН/м<sup>3</sup>] и упругого неравномерного сдвига  $C_\psi$  [кН/м<sup>3</sup>], которые принимаются равными:

$$C_\varphi = 2C_z, \quad (1.14)$$

$$C_x = 0,7C_z, \quad (1.15)$$

$$C_\psi = C_z, \quad (1.16)$$

На рисунке 1.15 изображены направления колебаний, которым соответствуют коэффициенты  $C_\varphi$ ,  $C_x$  и  $C_\psi$ .

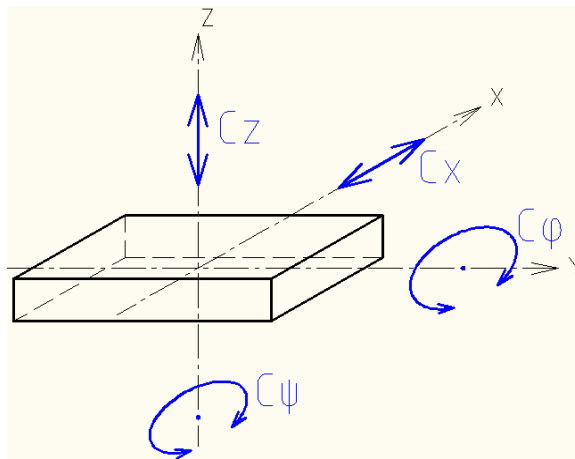


Рисунок 1.15 - Направления колебаний

Коэффициенты жесткости для естественных оснований  $K_z$ ,  $K_\varphi$ ,  $K_x$ ,  $K_\psi$  определяются по формулам:

при упругом равномерном сжатии, [кН/м]

$$K_z = C_z \cdot A, \quad (1.17)$$

при упругом неравномерном сжатии, [кН·м]

$$K_\varphi = C_\varphi \cdot I_\varphi, \quad (1.18)$$

при упругом равномерном сдвиге, [кН/м]

$$K_x = C_x \cdot A, \quad (1.19)$$

при упругом неравномерном сдвиге, [кН·м]

$$K_\psi = C_\psi \cdot I_\psi, \quad (1.20)$$

где  $I_\varphi$  и  $I_\psi$  - соответственно момент инерции площади подошвы фундамента относительно горизонтальной оси, перпендикулярной плоскости колебаний, и

относительно вертикальной оси фундамента, проходящих через центр тяжести подошвы,  $m^4$ .

В [38], [70] для расчета свайных фундаментов на талых грунтах используются те же формулы, что и для фундаментов на естественном основании, но вместо значений массы, моментов инерции массы и жесткостей  $m, \theta_\varphi, \theta_{\varphi o}, \theta_\psi, K_z, K_x, K_\varphi, K_\psi$  используются соответствующие им приведенные значения  $m_{red}, \theta_{\varphi, red}, \theta_{\varphi o, red}, \theta_{\psi, red}, K_{z, red}, K_{x, red}, K_{\varphi, red}, K_{\psi, red}$ . То есть для расчета колебаний свайных фундаментов используется та же расчетная модель, что для фундаментов мелкого заложения.

Расчет колебаний фундаментов по [70] на твердомерзлых грунтах, выполняется с учетом глубины условного защемления сваи в мерзлый грунт рисунок 1., которая определяется по формуле [70]

$$l_d = l_o + H + 3d, \quad (1.21)$$

где  $l_d$  – расчетная длина сваи до точки защемления;

$l_o$  – расстояние от нижней грани плиты фундамента до поверхности грунта;

$H$  – толщина сезонно оттаивающего слоя (СТС), рисунок 1.16;

$d$  – диаметр или сторона поперечного сечения сваи в направлении динамической нагрузки.

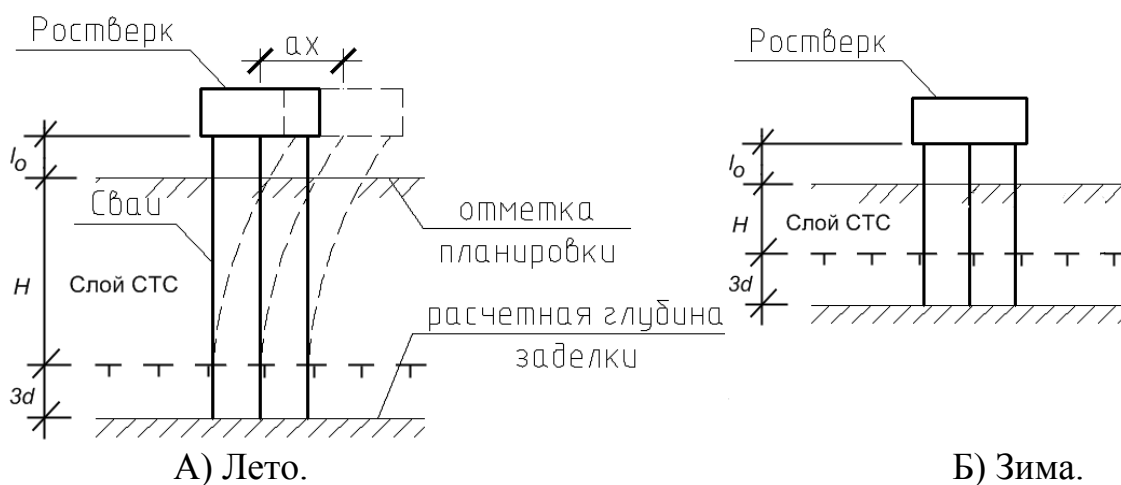


Рисунок 1.16 - Расчетная глубина условного защемления свайного фундамента в твердомерзлый грунт по [70]

По методике [70] считается, что свайный фундамент на глубине условной заделки жестко заземлен в абсолютно твердое тело. Нужно отметить, что в этом случае жесткость, демпфирование и влияние масса грунта слоя СТС не учитывается. Особенно это актуально для грунтовых условий Ямал и Восточной Сибири, так как слой СТС за один год промерзает и оттаивает на глубину до 3-х метров, соответственно в течение года меняются параметры жесткости, демпфирующие свойства и плотность сезонно талого слоя основания.

При моделировании фундамента ГПА в грунтовых условиях Ямала или Восточной Сибири необходимо учитывать перепады температур между летним и зимним периодами, и как следствие изменение жесткости верхнего слоя основания (толщина талого слоя может достигать от 1.5 до 3 метров). На Ямале сезонно талый слой грунтового основания в летнее время оттаивает, в зимнее промерзает рисунок 1.17, рисунок 1.18.

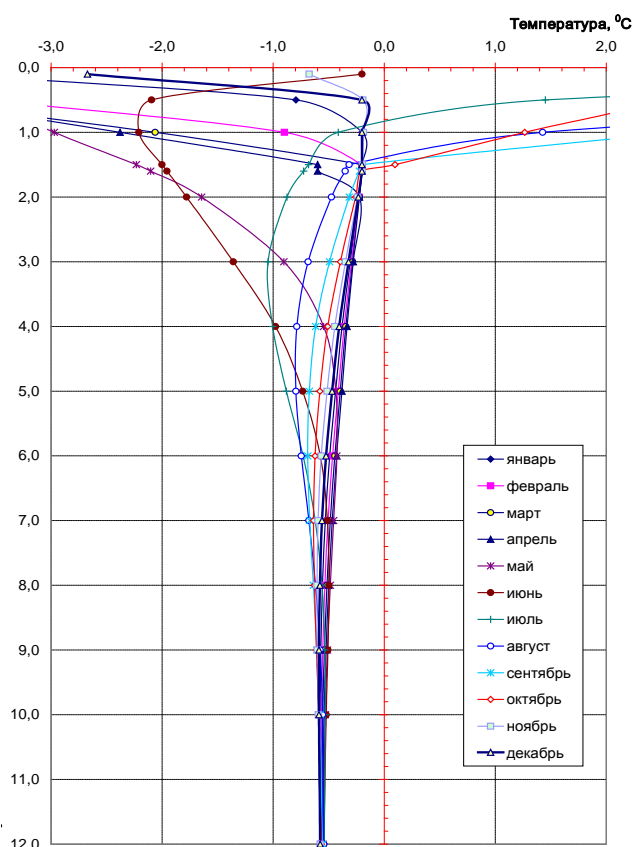


Рисунок 1.17 - График распределения температур грунта в течении года

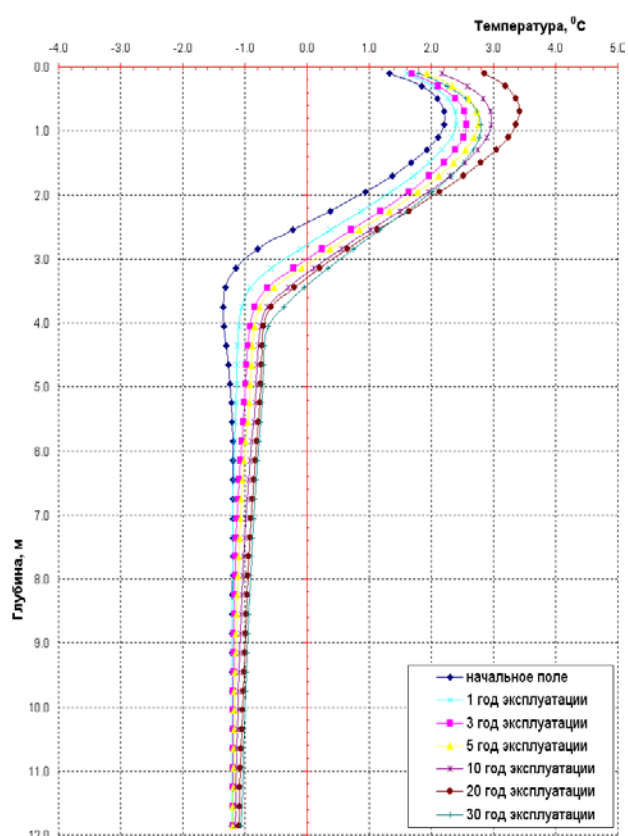


Рисунок 1.18 - Прогноз распределения среднегодовых температур грунта на 30 лет

В сезонно талом слое грунтового основания вместе с температурой  $t^{\circ}$  в течении года меняется объемный вес  $[\rho]$ , модуль упругости  $[E]$ , модуль затухания колебаний грунтов  $[\Phi]$ .

$$E_{\text{лето}} \neq E_{\text{зима}},$$

$$\Phi_{\text{лето}} \neq \Phi_{\text{зима}},$$

$$\rho_{\text{лето}} \neq \rho_{\text{зима}}.$$

В зоне вечной мерзлоты, в течение всего теплого времени года в основании находится мерзлый, практически несжимаемый слой грунта на глубине оттаивания 1,5 - 3 м. Модуль упругости мерзлых грунтов в десятки и сотни раз больше модуля упругости грунтов талых и величина его зависит от ряда факторов: состава мерзлых грунтов, величины отрицательной температуры и др.

### 1.8 Демпфирующие свойства системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание

В современной теории расчетов фундаментов ГПА [38], [70] сопротивление основания упругим колебаниям учитывается при помощи параметра относительного демпфирования  $\xi$ . По нормам этот параметр должен определяться по результатам испытаний. Но на стадии проектирования и расчета фундаментов ГПА, испытания грунтового основания (ГО) для определения динамических свойств, параметра  $\xi$ , как правило, не выполняются. Поэтому при отсутствии экспериментальных данных, в [70] рекомендуется определять относительное демпфирование  $\xi_z$  для вертикальных колебаний по формуле

$$\xi_z = \frac{2}{\sqrt{p}}, \quad (1.22)$$

где  $p$  - среднее статистическое давление под подошвой фундамента, кПа.

В формуле для определения  $\xi_z$  увеличение статического давления под подошвой фундамента уменьшает демпфирующие свойства и наоборот. Нужно



отметить, что зависимость параметра  $\xi_z$  только от статического давления под подошвой фундамента не отражает реальной картины происходящего.

Параметр  $\xi_z$  имеет безразмерное значение, не зависит от типа грунтов, упругих характеристик, плотности, пористости и других свойств грунтового основания, а зависит только от давления под подошвой фундамента – для плитных фундаментов и фундаментов мелкого заложения. В современных строительных нормах при отсутствии экспериментальных данных параметр относительного демпфирования  $\xi_z$  для свайных фундаментов допускается принимать 0,2 для установившихся колебаний,  $\xi_z$  не зависит от нагрузок на фундамент, свойств грунтового основания, глубины заложения свайного фундамента и т.д.

По [38], [62], [69] в качестве характеристики демпфирования допускалось использовать модуль затухания  $\Phi_z$  [с], определяемый для гармонических колебаний по формуле

$$\Phi_z = \frac{1,6}{\sqrt{C_z}}, \quad (1.23)$$

Демпфирование  $\xi_z$  и модуль затухания  $\Phi_z$  для горизонтальных и вращательных колебаний относительно горизонтальной и вертикальной осей по [69], [70] принимаются для:

горизонтальных колебаний

$$\xi_x = 0,6\xi_z, \quad (1.24)$$

$$\Phi_x = 0,6\Phi_z, \quad (1.25)$$

вращательных колебаний относительно горизонтальной оси Y

$$\xi_x = 0,5\xi_\varphi, \quad (1.26)$$

$$\Phi_x = 0,5\Phi_\varphi, \quad (1.27)$$

вращательных колебаний относительно вертикальной оси Z

$$\xi_x = 0,3\xi_\psi, \quad (1.28)$$

$$\Phi_x = 0,3\Phi_\psi, \quad (1.29)$$

При выполнении практических расчетов фундаментов часто бывает, что –  $\xi_z \neq \Phi_z$  так как  $\frac{2}{\sqrt{p}} \neq \frac{1,6}{\sqrt{C_z}}$  - следовательно, результаты расчета зависят от того, какой параметр  $\xi_z$  или  $\Phi_z$  учитывается в расчете.

По [70] параметр демпфирования грунтов не зависит от их упругих характеристик, плотности, пористости и других свойств. Это допущение не соответствует реальности. Исследования [62] подтверждают, что демпфирующие свойства у разных типов грунтов имеют различные значения, таблица 1.7.

Таблица 1.7

Сравнительные данные, характеризующие модуль затухания  $\Phi$  грунтов в насыпных и естественных основаниях [62]

Наименование	Характеристика грунта	Данные измерений $\Phi$ , сек	
		вертикальных колебаний	горизонтальных колебаний
Песок крупнозернистый	Условия естественного залегания	0,0013	0,0014
	Свежая насыпь	0,0022	0,0025
Супесь пылеватая	Условия естественного залегания	0,0012	0,0014
	Свежая насыпь	0,0018	0,0020
Глина	Условия естественного залегания	-	0,0014
	Свежая насыпь	0,0017	0,0016

По опытным данным Савинова О.А. [62], [63] величина модуля затухания  $\Phi$  для разных типов грунтов находится в интервале 0,001...0,0017сек, для насыпных оснований не зависимо от рода грунта рекомендуется 0,0016...0,0025сек.

В таблице 1.8 приведено сравнение формул для определения амплитуд колебаний с учетом затухания колебаний из различных источников. Для определения амплитуд колебаний используются разные параметры, описывающие неупругое сопротивление основания. В [68] параметр  $\frac{\omega^2}{64\lambda^2}$ , отвечающий за неупругое сопротивление, зависит от частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda_x$ . В [28], [69], [70] неупругое сопротивление зависит от статического

давления под подошвой плитного фундамента  $\xi_z = \frac{2}{\sqrt{P}}$  или имеет строго регламентированное значение  $\xi_z = 0,2$  для свайного фундамента, не зависимо от типа грунтов. Методы расчета, изложенные в [38], [69], [70] и [68], отличаются от решения [62].

Таблица 1.8

## Сравнение формул для определения амплитуд колебаний

Решение по [62]	Решение по [38], [69], [70]	Решение по [68]
Формулы для определения амплитуд колебаний		
$A_z = \frac{P_z^{(o)}}{K_z} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_z^2}\right)^2 + (\Phi\omega)^2}}$ <p>где <math>P_z</math> – динамическая нагрузка.  <math>K_z</math> – коэффициенты жесткости.</p>	$a_x = \frac{a_{x,st}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}\right)^2 + 4(\xi'_x)^2 (\omega/\lambda_x)^2}}$ <p>где <math>a_{x,st} = \frac{F_{h,st}}{S_x}</math> – перемещение, м, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы <math>F_h</math>,  <math>F_h</math> – расчетное значение динамической нагрузки,  <math>S_x</math> – коэффициенты жесткости системы «фундамент – основание».</p>	$A_x = \frac{A_x^{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{64\lambda_x^2}}}$ <p>где <math>A_x^{cm} = \frac{P_D^H}{S_x}</math> – перемещение, м, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы <math>P_D^H</math>,  <math>P_D^H</math> – нормативное значение динамической нагрузки,  <math>S_x</math> – коэффициенты жесткости конструкции фундамента</p>
Параметры описывающие неупругое сопротивление основания		
$\Phi^2 \omega^2$ <p>где <math>\Phi</math> – модуль затухания, с.  <math>\omega</math> – угловая частота вращения ротора.</p>	$\frac{4 \cdot \xi_x'^2}{\lambda_x^2}$ <p>где <math>\lambda_x</math> – угловая частота собственных горизонтальных колебаний фундамента,  <math>\xi'_x</math> – относительные демпфирования системы «фундамент – основание»,  <math>\omega</math> – угловая частота вращения ротора.</p>	$\frac{\omega^2}{64\lambda^2}$ <p>где <math>\lambda_x</math> – угловая частота собственных горизонтальных колебаний фундамента,  <math>\omega</math> – угловая частота вращения ротора.</p>

Сравнивая решение по [62] и [38] в таблице 1.12, параметр  $\Phi$  связан с параметром  $\xi$  следующей зависимостью  $\Phi = 2 \frac{\xi}{\lambda}$ . Об этом упоминалось в [62] и в [69], где приводится следующая зависимость

$$\xi_z = 0,5\Phi_z \lambda_z. \quad (1.30)$$

Важность определения точного значения параметра, описывающего неупругое сопротивление основания, можно подтвердить результатами вычислительного эксперимента рисунок 1.19.

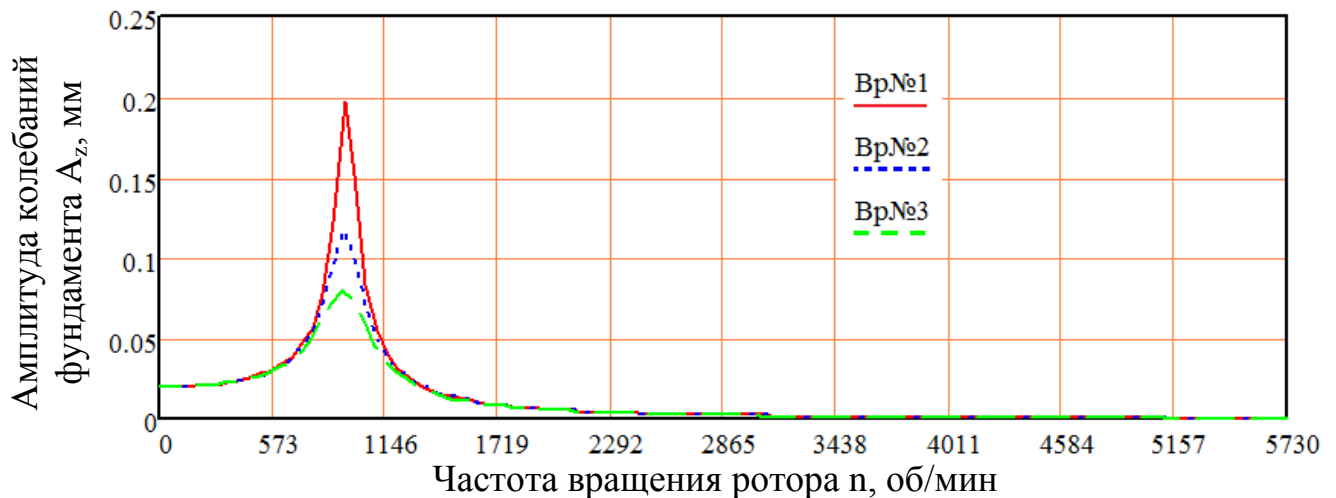


Рисунок 1.19 - Сравнение амплитуд колебаний фундаментов в зависимости от параметра неупругого сопротивления основания

В вычислительном эксперименте рассчитаны амплитуды колебаний 3-х фундаментов, на каждый фундамент действует периодическая нагрузка  $P_z$ , с частотой  $\omega$ . Амплитуды колебаний фундаментов вычислены в диапазоне частот  $0 < \omega < 600$  1/с на основе уравнения колебаний по [62], таблица 1.8.

$$A_z(\omega) = \frac{P_z}{K_z} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_z^2}\right)^2 + (\Phi_z \omega)^2}} \quad (1.31)$$

В эксперименте считается, что все фундаменты обладают одинаковой массой  $m$ , одинаковой жесткостью  $K_z$  по оси  $Z$ , одинаковой собственной частотой колебаний  $\lambda_z$  по оси  $Z$  и на все фундаменты действует одинаковая периодическая нагрузка  $P_z$ , направленная вдоль вертикальной оси  $Z$ .

Круговая частота собственных колебаний всех фундаментов одинаковая  $\lambda_z = 100$  1/сек. Соотношение  $\frac{P_z}{K_z} = 0,02$  мм одинаковое для всех фундаментов. Расчет колебаний фундаментов выполнен в диапазоне частот  $\omega = 0 \dots 600$  1/сек, что соответствует частоте вращения ротора  $n = 0 \dots 5730$  об/мин. Параметр

неупругого сопротивления основания 3-х вариантов фундаментов имеет разное значение:

Вариант грунтового основания №1 – пески средней крупности, модуль затухания колебаний грунтового основания  $\Phi_z = 0,001$  сек, максимальная амплитуда колебаний соответствует резонансной частоте  $a_{x0}=0,2$ мм.

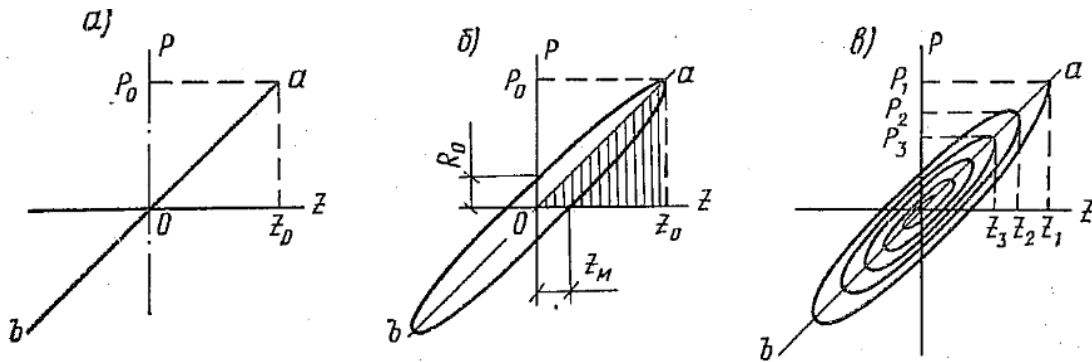
Вариант грунтового основания №2 – супесь пылеватая,  $\Phi_z=0,0017$  сек, максимальная амплитуда колебаний соответствует резонансной частоте  $a_{x1}=0,118$ мм.

Вариант грунтового основания №3 – глины рыхлые,  $\Phi_z=0,0025$  сек, максимальная амплитуда колебаний соответствует резонансной частоте  $a_{x1}=0,08$ мм.

### 1.9 Параметр демпфирования в современной теории расчетов

При циклических колебаниях системы фундамент ГПА – грунтовое основание часть энергии этих колебаний необратимо поглощается и рассеивается во внешнюю среду вследствие внутреннего трения в материале конструкции и внутреннего трения в грунтовом основании. Внутреннее трение в конструкциях фундаментов ГПА играет важную роль, являясь причиной затухания свободных колебаний конструкции и ограничения амплитуды резонансных колебаний при действии периодических нагрузок [38].

При циклических колебаниях идеально упругой линейной системы действующая на нее циклическая сила  $P$  прямо пропорциональна упругому перемещению  $z$  системы, рисунок 1.20,А [38]. Для системы, обладающей внутренним трением, эта зависимость не линейна и представляет собой при установившихся циклах нагрузки и разгрузки замкнутую кривую. При гармонических колебаниях петля представляет эллипс рисунок 1.20,Б с центром в начале координат  $P, z$ . При свободных колебаниях зависимость  $P(z)$  представляет собой эллиптическую спираль рисунок 1.20,В.



- А. Зависимость перемещения  $z$  от силы  $P$  для идеально упругой системы;  
 Б. Зависимость перемещения  $z$  от силы  $P$  для системы с внутренним трением при гармонических колебаниях;  
 В. Зависимость перемещения  $z$  от силы  $P$  для системы с внутренним трением при свободных колебаниях.

Рисунок 1.20 - Зависимость силы  $P$  от перемещения  $z$  [38]

Необходимо отметить, что для практических расчетов машин и строительных конструкций в качестве величины, характеризующей рассеивание энергии колебаний, используется  $\gamma$  - коэффициент внутреннего трения [38], [76], а для учета рассеивания энергии колебаний в грунтовом массиве в практических расчетах применяется  $\Phi$  - модуль затухания колебаний [62], [63], [69] и др.

В работе [76] приводятся значения коэффициентов поглощения  $\psi$  энергии и внутреннего трения  $\gamma$  для некоторых материалов и конструкций, таблица 1.9.

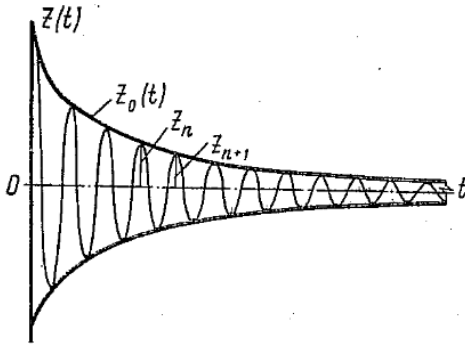
Таблица 1.9

Коэффициенты поглощения энергии и внутреннего трения

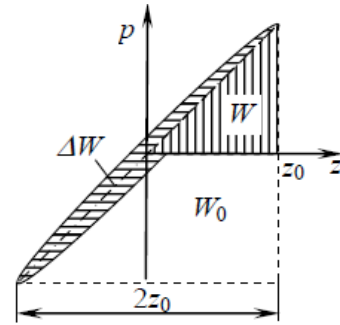
Материал, конструкция	$\psi$	$\gamma$
Бетон	0,26	0,041
Железобетон	0,25	0,040
Сталь	0,01-0,03	0,002-0,005
Алюминий	0,02-0,04	0,003-0,006
Чугун серый	0,23	0,036
Резина	0,20-1,20	0,032-0,190
Стеклопластик	0,20-0,40	0,032-0,064
Дуб	0,11	0,017
Сосна	0,07	0,011
Конструкция железобетонная	0,50	0,060-0,090
Конструкция стальная	0,16-0,18	0,025-0,028
Конструкция из стеклопластика	0,60-0,80	0,095-0,127
Конструкция деревянная	0,30-0,35	0,048-0,056

Величиной, характеризующей интенсивность затухания колебаний рисунок 1,21, служит логарифмический декремент, равный натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд [62]

$$\ln \frac{y_n}{y_{n+1}} = \frac{\pi \Phi \lambda_y^2}{2 \lambda_y^1} \approx \frac{\pi \Phi \lambda_y}{2}. \quad (1.32)$$



А. График затухающего колебательного процесса



Б. Диаграмма показывающая количество необратимо поглощенной телом энергии  $\Delta W$  за один цикл периодических колебаний.

Рисунок 1.21 - Свободные затухания колебаний  $z(t)$  и их огибающая  $z_0(t)$  [76]

В [62] интенсивность затухания колебаний по (1.32) зависит от модуля затухания  $\Phi$  и частоты собственных колебаний рассматриваемой системы.

Связь между величиной рассеиваемой энергии  $\psi$  и  $\ln \frac{z_n}{z_{n+1}}$  определяется в зависимости от гипотезы, применяемой для описания сил внутреннего трения.

В работах [38], [76] приводятся зависимости между логарифмическим декрементом затухания, коэффициентом внутреннего трения и коэффициентом поглощения

$$\psi = 2 \ln \frac{y_n}{y_{n+1}} = 2\pi\gamma \quad [76] \quad (1.33)$$

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}, \quad [76] \quad (1.34)$$

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} = 2\pi \frac{y_i}{y_0} = 2\pi\gamma \quad [38] \quad (1.35)$$

где:  $\psi$  - коэффициент поглощения энергии, величина, характеризующая рассеивание энергии за один цикл в долях энергии  $W$ ;

$\Delta W$  - необратимо поглощенная телом за один цикл часть энергии циклических деформаций;

$w$  - потенциальная энергия тела, отвечающая амплитуде деформаций за тот же цикл, рисунок 1.19,Б;

$u_0$  – амплитуда упругой деформации;

$u_n$  – амплитуда неупругой деформации.

Для практических расчетов [62] амплитуда вынужденных колебаний по оси Y системы с одной степенью свободы с учетом модуля затухания  $\Phi_y$  определяется по формуле [62]

$$A_y(\omega) = \frac{P_y}{K_y} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_y^2}\right)^2 + (\Phi_y \omega)^2}} = \frac{P_y}{K_y} \eta \quad (1.36)$$

где:  $\eta$  - коэффициент нарастания колебаний [62].

Сравнение данных экспериментального изучения затухания колебаний фундаментов и различных инженерных конструкций [62] свидетельствует о том, что рассеивание энергии в грунтах происходит более интенсивно, чем в строительных материалах. Сопоставления экспериментальных величин коэффициента нарастания колебаний при резонансе –  $\eta_{рез}$ , дано в таблице 1.10.

Таблица 1.10

Коэффициент нарастания колебаний при резонансе, по [62]

Фундаменты на естественном основании:	$\eta$
При вертикальных колебаниях	1,5 – 4,0
При горизонтальных и вращательных колебаниях	2 – 10

При прохождении через резонансную частоту возмущающая частота колебаний численно равна собственной частоте колебаний фундамента  $\omega = \lambda$ , тогда коэффициент нарастания колебаний  $\eta$  при резонансе имеет вид:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_y^2}\right)^2 + (\Phi \omega)^2}} = \frac{1}{\Phi \lambda_y} \quad (1.37)$$



Параметр  $\Phi$  связан с  $\eta$  зависимостью  $\Phi = \frac{1}{\eta\lambda}$ . По опытным данным [62], [63] у фундаментов на естественном основании параметр  $\eta$  в 5 – 20 раз меньше, чем у строительных конструкций.

В строительных нормах уравнение колебаний фундамента по оси  $Y$  имеет вид

$$\ddot{y} \frac{K_y}{\lambda^2_y} + 2\xi \frac{K_y}{\lambda_y} \dot{y} + K_y y = P_y(t) \quad (1.38)$$

где:  $\xi$  – параметр демпфирования, отвечающий за затухание колебаний [70].

В уравнении колебаний фундамента по [38], [69], [70] используется зависимость между логарифмическим декрементом затухания и параметром  $\xi$ .

$$\ln \frac{y_n}{y_{n+1}} = \frac{2\pi\xi\lambda_0}{\lambda} \quad (1.39)$$

В [76] зависимость между логарифмическим декрементом затухания и параметром  $\gamma$  имеет вид

$$\ln \frac{z_n}{z_{n+1}} = \frac{\pi\gamma\lambda_0}{\lambda} \quad (1.40)$$

(1.40) согласуются с [69], [70] при выполнении условия  $\gamma=2\xi=\Phi\lambda$ .

### 1.10 Обоснование «Усовершенствованной расчетной модели»

В соответствии с методикой расчета [38], [69], [70] все типы грунтов независимо от их упругих характеристик, плотности, пористости и других свойств обладают одинаковыми демпфирующими свойствами. Это допущение упрощает выполнение расчетов, но не соответствует реальной картине происходящего.

По [38], [69], [70] в зависимости от того, каким способом был определен параметр демпфирования ( $\xi_z = \frac{2}{\sqrt{p}}$  или  $\Phi_z = \frac{1,6}{\sqrt{C_z}}$ ), можно получить разные результаты расчета амплитуд колебаний фундаментов.

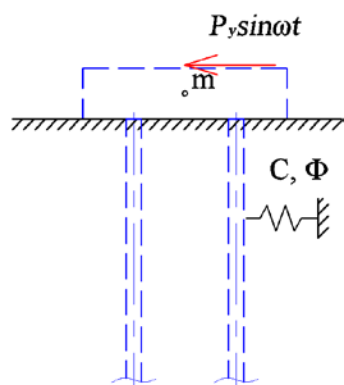
Необходимо отметить, что при определении амплитуд колебаний по [38], [62], [63], [69], [70] масса грунтового основания не учитывается.

В [38], [69], [70] не описывается, какие упругие  $C_z$  и демпфирующие  $\xi_z$  характеристики необходимо принимать для неоднородных оснований. Методика расчета, изложенная в [38], [69], [70], описывает расчет амплитуд колебаний фундаментов на грунтовых основаниях, сложенных однородными грунтами, вместе с тем неясно, каким образом нужно определять упругие и демпфирующие характеристики неоднородных оснований. Это особенно актуально для грунтовых условий Ямала и Восточной Сибири.

Моделирование свайных фундаментов на искусственных основаниях усложняется особенностями грунтовых (засоленные и льдистые грунты) и климатических (опасность растепления мерзлых грунтов) условий полуострова Ямал и Восточной Сибири, особенно с учетом требований [38], [69], [70] которые не предусматривают возможность устройства ГПА мощностью 25МВт и более на искусственных основаниях.

Для учёта неоднородности грунтов, требуется новый подход к моделированию грунтовых оснований рисунок 1.22. В усовершенствованной расчетной модели (УРМ) системы ГПА-фундамент-грунтовое основание учитывается масса грунтов, а также неоднородность грунтов по объемному весу, модулю упругости и способности сопротивляться упругим колебаниям.

Действующая модель  
по [38], [69], [70] и др.



Усовершенствованная модель системы ГПА-фундамент  
– грунтовое основание по [83], [84], [85], [86], [87], [88]

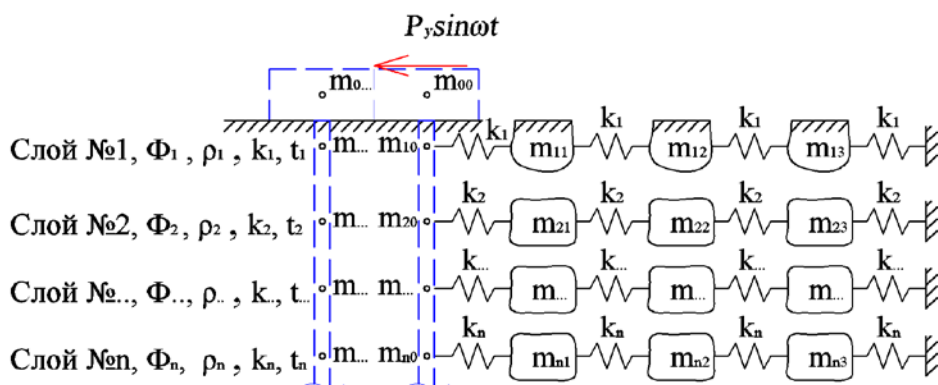


Рисунок 1.22 - Расчётные схемы действующей и усовершенствованной модели

Усовершенствованная расчетная модель позволяет оценить влияние колебательных волн в грунтовом массиве (вибрации, создаваемые работой ГПА) на соседние сооружения, технологическое оборудование и обслуживающий персонал, рисунок 1.23.

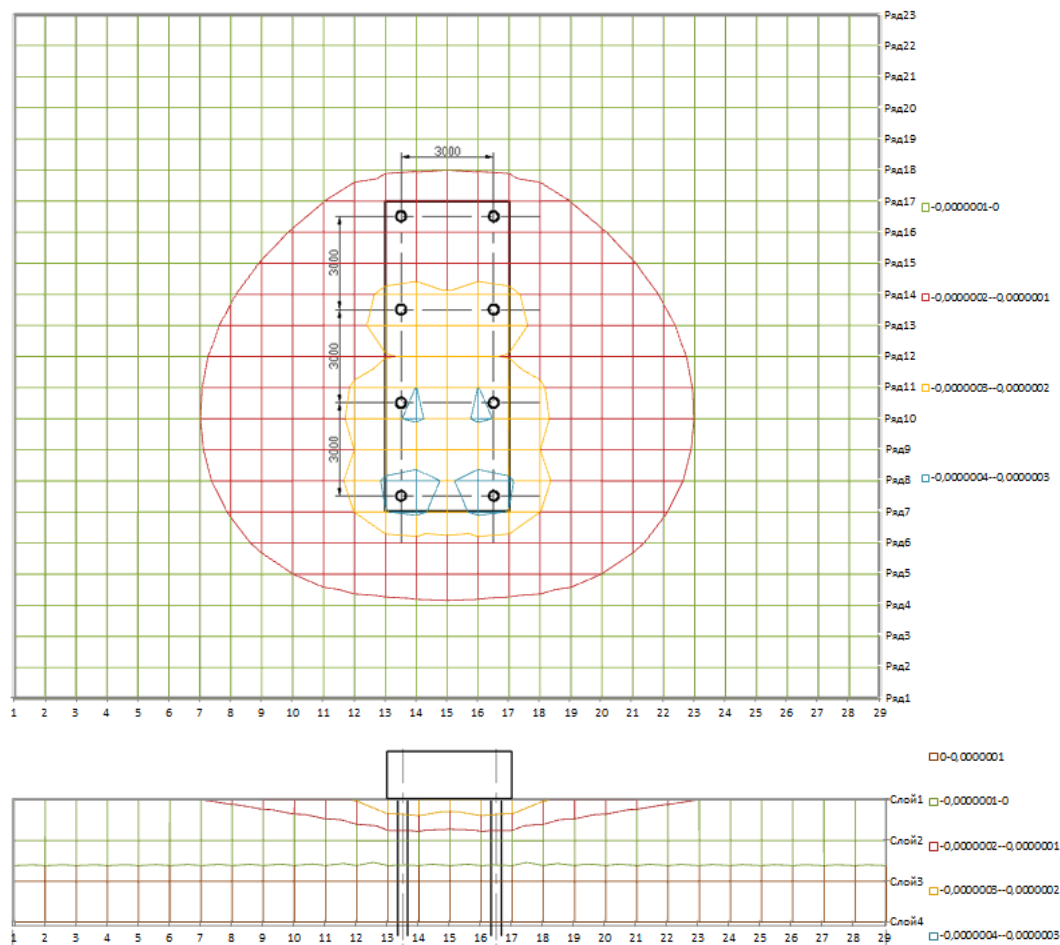


Рисунок 1.23 - Амплитуды колебаний частиц грунтового основания

В таблице 1.11 приведено сравнение действующей и усовершенствованной расчетной модели.

Таблица 1.11

## Сравнение расчетных моделей

№	Действующая модель	Усовершенствованная модель
1	<p>Основание упругое и лишенное массы.</p> <p>Амплитуды и частоты собственных колебаний легких фундаментов вычисляются без учета влияния массы грунтов.</p>	<p>Основание упругое и обладающие массой.</p> <p>Амплитуды и частоты собственных колебаний легких фундаментов вычисляются с учетом влияния объемного веса грунтов.</p>
2	<p>Основание считается однородным по плотности, жесткости и параметру сопротивления упругим колебаниям.</p>	<p>Основание не однородное, разбивается на слои в соответствии с инженерно геологическими условиями.</p>
3	<p>Демпфирующие свойства системы фундамент-основание:</p> <p>– для свайных фундаментов относительное демпфирование имеют фиксированное значение, которое не зависит от типа и свойств грунтов <math>\xi_z=0,2</math>.</p> <p>-для плитных фундаментов зависит от давления под подошвой фундамента <math>\xi_z = \frac{2}{\sqrt{P}}</math> или от коэффициента жесткости основания <math>\Phi_z = \frac{1,6}{\sqrt{C_z}}</math>.</p>	<p>Сопротивление упругим колебаниям учитывается как сумма внутреннего сопротивления конструкции фундамента и сопротивления внешней среды, окружающей фундаментную конструкцию, учитывается площадь контакта фундамента с неоднородной внешней средой. Внешняя среда может быть представлена грунтами, атмосферным воздухом, а также другими видами материи для которых имеются опытные данные параметра сопротивления упругим колебаниям.</p>
4	<p>Амплитуды колебаний фундаментов газотурбинных ГПА вычисляются от воздействия динамических нагрузок, которые не зависят от частоты вращения и точность балансировки роторов ГПА.</p>	<p>Амплитуды колебаний фундаментов газотурбинных ГПА вычисляются от воздействия динамических нагрузок с учетом влияние частоты вращения, точность балансировки роторов ГПА и полигармонического характера воздействия</p>

## 1.11 Цели и задачи исследования

**Краткая формулировка цели исследования:** определение амплитудно-частотных характеристик фундаментов ГПА с учетом влияния массы неоднородного грунтового основания в грунтовых условиях Ямала и Восточной Сибири для обеспечения надежности магистральных газопроводов.

**Краткая формулировка задач исследования:**

1. Разработка усовершенствованной расчетной модели системы ГПА-фундамент-грунтовое основание включающая методику 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.
2. Разработка рекомендаций по обеспечению нормальных условий эксплуатации и требований статьи 16 ФЗ№384 к «механической безопасности» в части расчета амплитудно-частотных характеристик фундамента ГПА с учетом аварийных ситуаций.
3. Разработка показателей в части однозначного определения массивного и немассивного типа фундамента под ГПА.

## 1.12 Выводы

Для снижения материальных затрат и сроков строительства фундаментов ГПА в грунтовых условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири более выгодным является размещение газоперекачивающего оборудования на лёгких проветриваемых опорных конструкциях.

По результатам анализа современной теории расчетов фундаментов под ГПА сформулированы основные выводы:

1. В современной теории расчетов не учитываются влияние массы и неоднородность грунтов по объемному весу, упругим характеристикам и параметру демпфирования на амплитудно-частотные характеристики фундамента ГПА. По [70] у свайных фундаментов независимо от типа грунтов, параметр относительного демпфирования имеет значение  $\xi_z=0,2$ .
2. Для фундаментов ГПА, обладающих сравнительно малой массой, масса грунтов оказывает существенное влияние на собственные частоты и амплитуды колебаний фундаментов от воздействия динамических нагрузок при работе ГПА. Поэтому для легких типов фундаментов, возводимых в климатических и геологических условиях Ямала и Восточной Сибири, необходима разработка усовершенствованной расчетной модели системы ГПА-фундамент-основание, которая позволяет учитывать влияние массы грунтов, неоднородность грунтового основания по объемному весу, упругим характеристикам и способности сопротивляться упругим колебаниям.
3. Нормативная динамическая нагрузка не зависит от частоты вращения и дисбаланса роторов ГТД, вычисляется как произведение суммарной массы всех роторов на коэффициент пропорциональности  $\mu = 0,2$ . Расчет фундамента выполняется от воздействия эквивалентной статической нагрузки. В [70] реализован расчет только для железобетонных фундаментов. Для стальных фундаментов в [70] не реализована методика определения динамических нагрузок. Необходимо создание рекомендаций по определению динамических

нагрузок от работы ГПА, для легких стальных фундаментов с учетом частоты вращения и точность балансировки роторов ГПА.

4. В действующих строительных нормах нет рекомендаций по обеспечению «требований к механической безопасности» ФЗ№384 для фундаментов ГПА. Необходима разработка рекомендаций по расчету, позволяющих учитывать появление возможных аварийных ситуаций во время эксплуатации ГПА.

5. При возведении фундаментов под ГПА на слабых и насыпных грунтах Ямала и Восточной Сибири необходимо учитывать возможную осадку фундамента от собственного веса фундамента и размещенного на нем оборудования. В действующих строительных нормах обязательных к применению в соответствии с законодательством Российской Федерации максимальная предельно допустимая осадка фундамента ГПА не нормируется. На основе анализа опытных данных [5], [16] и исходя из многолетнего опыта эксплуатации объектов газового комплекса приводятся показатели оценки деформационных явлений фундаментов ГПА.

6. В теории расчетов фундаментов ГПА нет рекомендаций по определению допустимых сотрясений грунтов, от которых могут появляться дополнительные осадки фундаментов ГПА. На основе анализа опытных данных [62], [63] приводятся показатели ускорений колебаний частиц грунта, при которых могут появляться дополнительные деформации фундамента и осадки грунтового основания от постоянного воздействия динамических нагрузок.

Для предотвращения деформаций из-за вибраций элементов фундаментной конструкции, соприкасающихся с грунтом, необходима разработка рекомендаций, ограничивающих ускорения колебаний поверхности фундаментной конструкции, контактирующей с грунтовым основанием.

7. В строительных нормах допускается не выполнять расчет вертикальных и горизонтальных амплитуд колебаний массивных фундаментов, опирающегося на твердо мерзлые грунты. В [70] нет показателей, по которым можно однозначно отнести фундамент к массивному или не массивному типу. Необходима разработка данных показателей.

## **ГЛАВА 2. Совершенствование современной расчетной модели взаимодействия ГПА с фундаментом и грунтовым основанием**

### **2.1 Усовершенствованная расчетная модель системы ГПА-Фундамент-грунтовое основание**

Динамические воздействия от работы ГПА могут вызывать деформации фундаментов и грунтовых оснований. Актуальным является прогноз уровня колебаний ГПА и грунта на стадии проектирования фундаментов.

Для оценки опасности воздействий колебаний на людей и чувствительное к вибрации оборудование при конструировании фундамента под ГПА необходимо знать уровень и характер колебаний фундамента, а для снижения вредного воздействия колебаний на людей и оборудование необходима разработка мероприятий, которые позволят снизить уровень колебаний до допустимых значений.

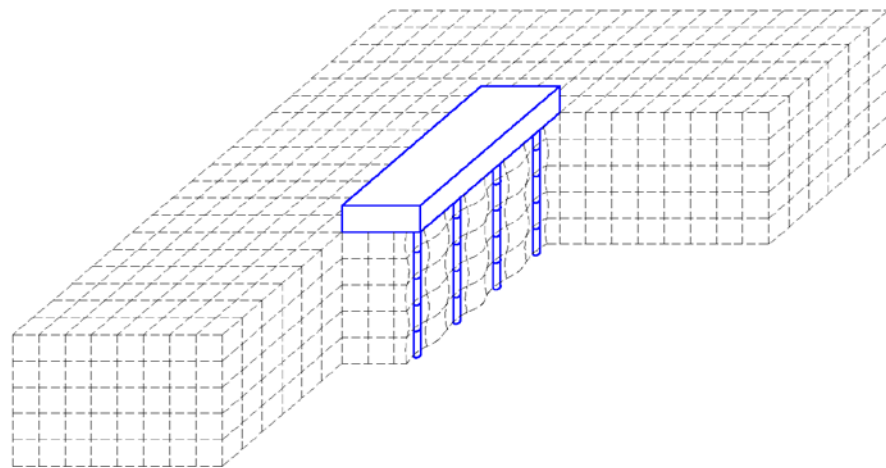
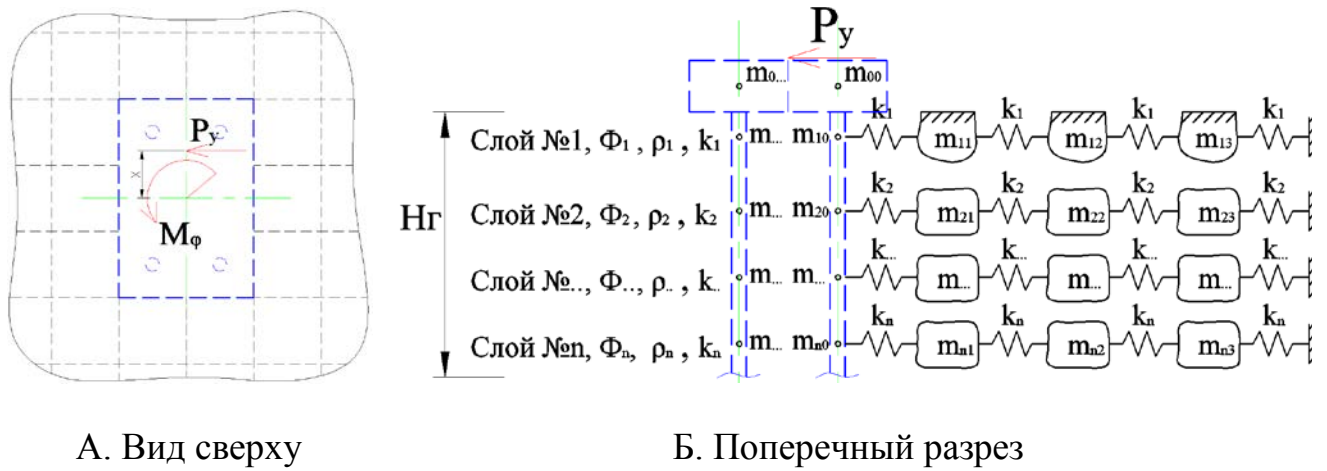
В настоящее время накоплен значительный объем натурных наблюдений за амплитудно-частотными характеристиками зданий и сооружений, различающихся по конструктивной схеме, возрасту, типу фундамента, грунтовым условиям (ГУ) и т.д. [38], [63]. Существующие теоретические решения задач динамики, не учитывают влияние массы и неоднородности грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики облегченных фундаментов под ГПА.

Для динамического расчета облегченного фундамента ГПА с учетом влияния массы и неоднородности грунтового основания рассмотрим усовершенствованную расчетную модель системы ГПА - фундамент - грунтовое основание.

В основе модели лежит разбиение неоднородного грунтового основания на однородные слои до условной глубины  $H_g$ . На глубине  $H_g$  перемещение сваи от воздействия внешней нагрузки равно нулю. В пределах одного слоя такие параметры как объемный вес, модуль затухания колебаний  $\Phi$  и коэффициент



пастели  $k$  грунтов назначаются в соответствии с инженерно-геологическими изысканиями и имеют усредненное значение, рисунок 2.1.



В. Общий вид системы ГПА-фундамент-основание

Рисунок 2.1 - Система ГПА-фундамент-основание

В усовершенствованной расчетной модели используются уравнения вынужденных колебаний, которые имеют вид:

$$\ddot{y} \cdot K_y / \lambda_y^2 + \gamma \cdot \dot{y} \cdot K_y / \lambda_y + K_y y = P_y \sin(\omega t) , \quad (2.1)$$

$$\ddot{\varphi} \cdot K_\varphi / \lambda_\varphi^2 + \gamma \cdot \dot{\varphi} \cdot K_\varphi / \lambda_\varphi + K_\varphi \varphi = M_\varphi \sin(\omega t) . \quad (2.2)$$

Частное решение уравнений (2.1) и (2.2) имеют вид:

$$y = A_y \cdot \sin(\omega t + \delta_y), \quad (2.3)$$

$$\varphi = A_\varphi \cdot \sin(\omega t + \delta_\varphi). \quad (2.4)$$

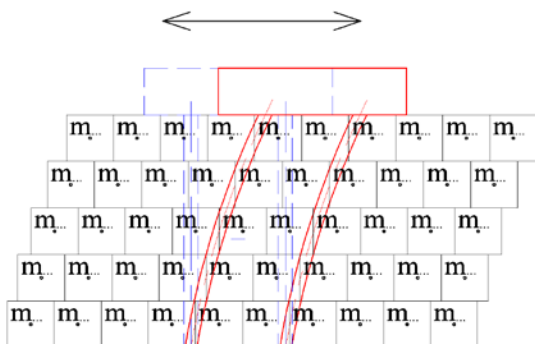
После подстановки (2.3) в (2.1) и (2.4) в (2.2) решения уравнений (2.1) и (2.2) имеют вид:

$$A_y = \frac{P_y}{K_y} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_y^2}\right)^2 + \gamma^2 \frac{\omega^2}{\lambda_y^2}}}, \quad (2.5)$$

$$A_\varphi = \frac{M_\varphi}{K_\varphi} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_\varphi^2}\right)^2 + \gamma^2 \frac{\omega^2}{\lambda_\varphi^2}}}, \quad (2.6)$$

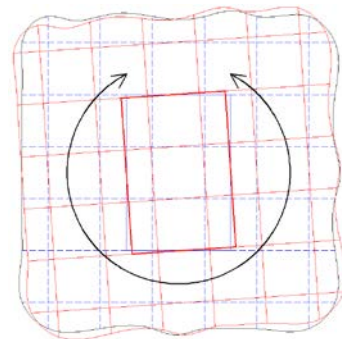
где:  $y$  – перемещение, м;  $\varphi$  – угол поворота, рад;  $K_y$  – коэффициент жесткости фундамента по направлению оси  $Y$ , Н/м;  $K_\varphi$  – коэффициент жесткости фундамента при повороте относительно оси  $Z$ , Н·м;  $\lambda_y, \lambda_\varphi$  – соответственно поступательные и крутильные круговые частоты собственных колебаний, 1/с;  $\omega$  – частота вынужденных колебаний, 1/с;  $\gamma$  – параметр сопротивления упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-грунтовое основание;  $\delta$  – угол характеризующий разность фаз между вынужденными колебаниями и возмущающей силой;  $P_y \sin \omega t$  – 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.

На рисунке 2.2 приведены поступательные и крутильные формы колебаний системы фундамент-грунтовое основание, соответствующие частотам колебаний  $\lambda_y$  и  $\lambda_\varphi$ .



А. Поступательная форма колебаний

вдоль оси  $Y$



Б. Крутильная форма колебаний

относительно оси  $Z$

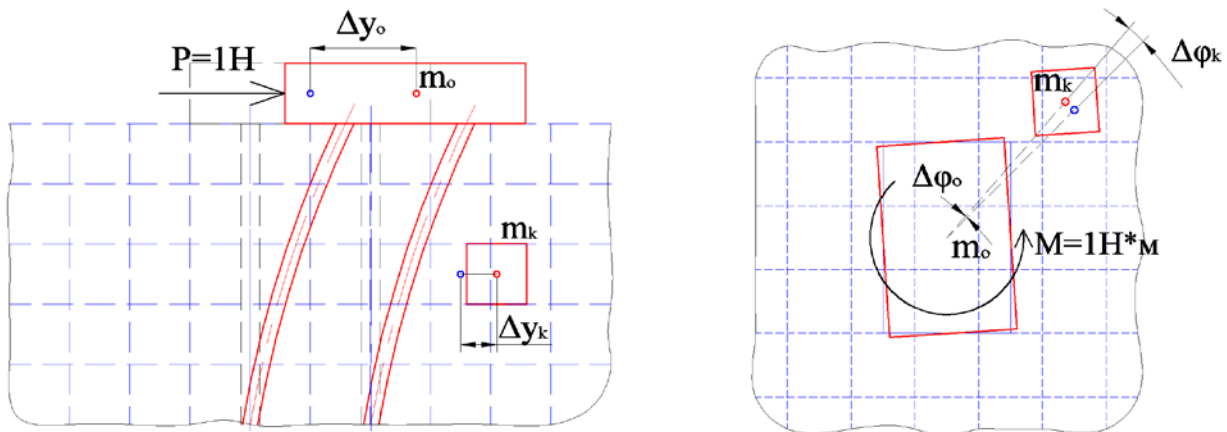
Рисунок 2.2 - Формы колебаний системы

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

$$\lambda_{y_0} = \sqrt{\frac{g \cdot \Delta y_0}{\sum P_k \cdot \Delta y_k^2}}, \quad (2.7)$$

$$\lambda_{\varphi_0} = \sqrt{\frac{g \cdot \Delta \varphi_0}{\sum P_k \cdot \Delta \varphi_k^2}}, \quad (2.8)$$

где:  $P_k = m_k \cdot g$  – вес  $k$ -й ячейки системы ГПА – фундамент – грунтовое основание;  $g$  – ускорение свободного падения  $\text{м/с}^2$ ;  $\Delta y_k$ ,  $\Delta \varphi_k$  – линейное и угловое перемещение  $k$ -го центра масс ячейки системы от действия соответственно единичной силы  $P=1\text{Н}$  и момента  $M=1\text{Н}\cdot\text{м}$  рисунок 2.3.



А. Перемещения  $k$ -й массы системы от действия единичной силы  $P=1\text{Н}$

Б. Угловые перемещения  $k$ -й массы системы от действия единичного момента пары сил  $M=1\text{Н}\cdot\text{м}$

Рисунок 2.3 - Схема для вычисления частот собственных колебаний  $\lambda_{y_0}$  и  $\lambda_{\varphi_0}$  системы ГПА – фундамент - грунтовое основание

Для вычисления перемещений ствола сваи от воздействия внешней нагрузки, рассмотрим взаимодействие сваи с упругим грунтовым основанием.

## 2.2 Взаимодействие свайного фундамента и грунтового основания

Рассмотрим сваю, контактирующую с упругим грунтовым основанием рисунок 2.4, А, Б. Свая, нагруженная внешней нагрузкой, изгибается и вдавливаются в грунтовое основание, возникает упругий отпор грунта, распределенный по длине сваи. Интенсивность упругого отпора грунта –  $r$ , отнесенную к единице длины сваи, имеет размерность Н/м.



А. Свая контактирующая с упругим  
грунтовым основанием

Б. Изгиб сваи

Рисунок 2.4 - Свая контактирующая с упругим грунтовым основанием

Для решения этой задачи в качестве основной неизвестной принимается функция прогибов сваи  $v=v(y)$ . Углы поворота и внутренние усилия возможно получить из следующих равенств:

$$\theta = \frac{dv}{dy} = v' \quad (2.9)$$

$$M = -E_c I \frac{d^2 v}{dy^2} = -E_c I \cdot v'' \quad (2.10)$$

$$Q = -E_c I \frac{d^3 v}{dy^3} = -E_c I v''' \quad (2.11)$$

где:  $\theta$  – угол поворота сечения сваи, рад;  $M$  – изгибающий момент в сечении сваи, Н/м;  $Q$  – поперечная сила, Н;  $E_c$  – модуль упругости материала сваи Па;  $I$  – момент инерции сечения сваи  $\text{м}^4$ ;  $y$  – перемещение по направлению оси  $Y$ , м.

Рассмотрим модель деформирования грунтового основания, называемую винклеровым основанием, по имени немецкого ученого Э. Винклера (1835-1888), который один из первых реализовал её в расчетной практике. Эта модель состоит в том, что грунтовое основание заменяется бесконечным числом упругих, несвязанных между собой пружин так, что реакция в каждой точке поверхности сваи будет пропорциональна прогибу  $v$  в этой точке, равному деформации основания.

На поверхности сваи шириной  $b$  выделим участок длиной  $1\text{ м}$ . Определим суммарную реакцию  $R$  с площади  $b \times 1\text{ м}$ , считая отпор распределенным по этой площади равномерно. Реакция отпора грунта на единицу длины сваи рисунок 2.5, А, Б, имеет вид:

$$R = k \cdot b \cdot v, \quad (2.12)$$

где:  $k$  – коэффициент жесткости упругого основания, Н/м.



А. Реакция упругого грунтового основания

Б. Реакция упругого грунтового основания на единицу длины сваи

Рисунок 2.5 - Реакция упругого грунтового основания

Уравнение изгиба сваи, контактирующей с упругим грунтовым основанием, имеет вид:

$$v^{IV} + 4\beta^4 \cdot v = \frac{q}{E_c I}, \quad (2.13)$$

где:  $\beta = \sqrt{\frac{k \cdot b}{4E_c I}}$  – коэффициент, который зависит от величины жесткости основания

$k \cdot b$  и изгибной жесткости сваи  $E_c I$ ;  $q$  – реакции отпора грунта на единицу длины сваи, Н/м<sup>3</sup>.

По результатам сравнительных расчетов при выполнении условия  $L_{\text{св}} > \pi/\beta$ , где  $L_{\text{св}}$  – глубина погружения сваи, разница в вычислениях перемещений сваи конечной длины и полубесконечной составляет менее 0,5%. При допущении разницы в вычислениях менее 0,5% возможно использование решения для полу бесконечной балки на упругом основании. Достоинством такого решения является его краткость и лаконичность. При воздействии на сваю горизонтальной силы  $F$  или изгибающего момента  $M$  перемещения и усилия для сваи в виде полу бесконечного стержня, контактирующего с упругим грунтовым основанием [4], [15], [29], [43], [44] и другие имеют вид:

$$v = F \cdot A_1, \quad (2.14)$$

$$M = F \cdot B_1, \quad (2.15)$$

$$Q = F \cdot C_1, \quad (2.16)$$

$$v = M \cdot D_1, \quad (2.17)$$

$$M = M \cdot H_1, \quad (2.18)$$

$$Q = M \cdot S_1, \quad (2.19)$$

$$\text{где: } A_1 = \frac{e^{-\beta z} \cdot \cos \beta z}{2\beta^3 \cdot E \cdot I}, \quad B_1 = \frac{e^{-\beta z} \cdot \sin \beta z}{\beta}, \quad C_1 = -e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z),$$

$$D_1 = \frac{e^{-\beta z} (\cos \beta z - \sin \beta z)}{2\beta^2 \cdot E \cdot I}, \quad H_1 = e^{-\beta z} (\cos \beta z + \sin \beta z), \quad S_1 = 2\beta \cdot e^{-\beta z} \sin \beta z.$$

В случаях когда условие  $L_{\text{св}} > \pi/\beta$  не выполняется и основание является неоднородным по слоям, используется решение для балки конечной длины на упругом основании методом конечных разностей или другими методами позволяющими решить эту задачу.

Влияние массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундамента учитывается до глубины  $H_g$  на которой прогиб сваи от воздействия внешних нагрузок равен нулю, рисунок 2.6.

$$v = v(y) = 0 \quad (2.20)$$

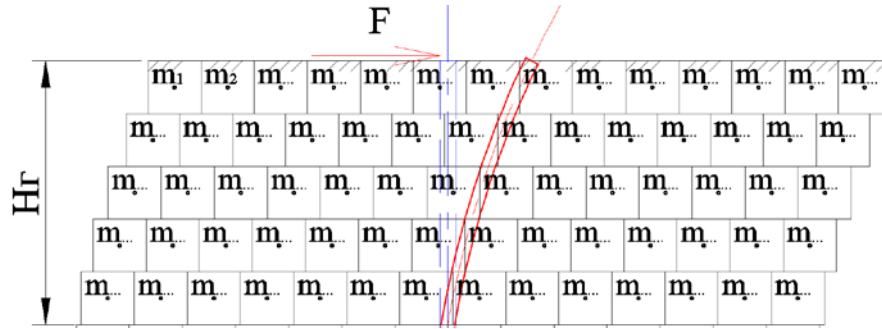


Рисунок 2.6 - Схема для определения глубины  $H_g$  в УРМ

В частном случае при воздействии на сваю силы  $F$  функция прогибов сваи контактирующей с упругим грунтовым основанием имеет вид:

$$v(y) = F \frac{e^{-\beta z} \cdot \cos \beta z}{2\beta^3 \cdot E \cdot I} \quad (2.21)$$

Глубина  $z$  до которой учитываются массы грунтов определяется из условия равенства нулю функции прогибов сваи  $v(y) = 0$ . В рассматриваемом частном случае функция прогибов равна нулю, когда  $\cos \beta z = 0$ , то есть  $\beta z = \pi/2$ .

$$\tilde{z} = z = \frac{\pi}{2\beta} \quad (2.22)$$

Реакция отпора грунта  $R_n$ , распределенная по длине сваи в пределах одного слоя, численно равна силе  $F_n$ , передаваемых от сваи на грунт:

$$R_n = F_n, \quad (2.23)$$

где:  $F_n$  – сила, передаваемая от поверхности сваи на грунт, действующая в пределах  $n$ -го участка сваи.

Учитывая особенности геологических условий Ямала и Восточной Сибири, а также современные требования к фундаментам ГПА [70] для обеспечения нормальных условий эксплуатации ГПА необходимо исключить вероятность пластических деформаций грунтов в основании фундаментов. С целью исключения пластических деформаций грунтов в усовершенствованной расчетной модели рассматривается линейно упругая работа грунтов, ограниченная их расчетным сопротивлением.

Для связи между нормальными напряжениями и линейными деформациями грунтового основания используется закон Гука:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\sigma_y}{E} \nu - \frac{\sigma_z}{E} \nu, \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\sigma_x}{E} \nu - \frac{\sigma_z}{E} \nu, \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\sigma_y}{E} \nu - \frac{\sigma_x}{E} \nu, \quad (2.26)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (2.27)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad (2.28)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}, \quad (2.29)$$

где:  $E$  – модуль упругости грунта;  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта,

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  - модуль сдвига грунта.

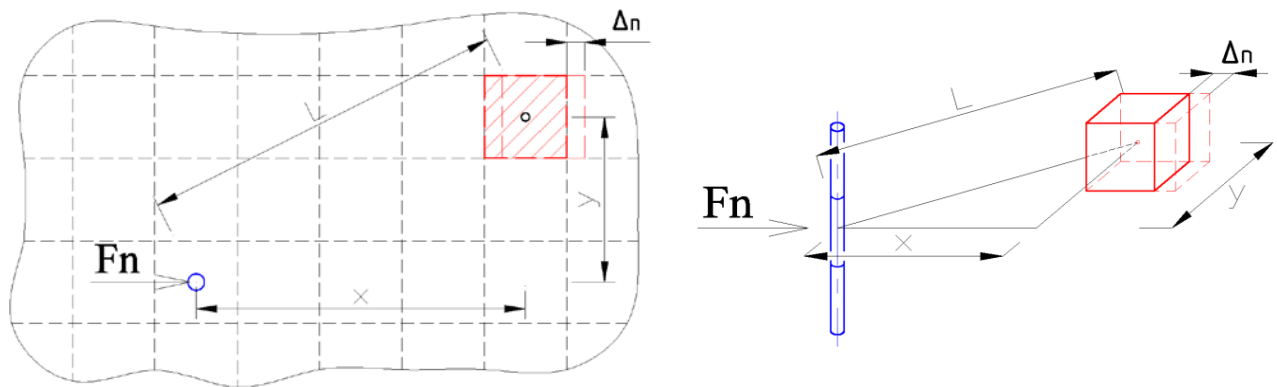
Вопросами вычисления напряжений и деформаций в грунтовом основании занимались Ж. В. Буссинеск, А. Ляв, В. Г. Короткин, М. Фламан, У.Т. Кельвин, М.И. Горбунов-Посадов, Е. Мелан, Р. Миндлин и др. Задача по определению напряжений и перемещений в линейно деформируемом полупространстве от воздействия сосредоточенной силы в первые была решена французским ученым Ж. В. Буссинеском в 1885 г, решение этой же задачи для случая загрузки прямоугольной площадки поверхности основания равномерно распределенной нагрузкой было получено А. Лявом и В.Г. Короткиным. В 1892 г. М. Фламан получил решение для вертикальной сосредоточенной силы в условиях плоской задачи. Решения для определения напряжений и перемещений от воздействия сосредоточенных сил приложенных внутри грунтового основания на некоторой глубине от поверхности для плоской задачи получены М.И. Горбуновым-



Посадовым и Е. Меланом, для пространственной задачи решение получено Р. Миндлином.

Вычисление перемещений  $\Delta_n$  частиц грунта от действия сосредоточенной силы  $F_n$  в усовершенствованной расчетной модели выполняется по формуле Р. Миндлина приведенная в работах Флорина В. А. и других ученых [90], [91].

На основании данных инженерно-геологических изысканий грунтовое основание по глубине разбивается на однородные слои, в пределах каждого слоя такие параметры грунтов как объемный вес, модуль упругости и сопротивления упругим колебаниям имеют одинаковые значения. Однородные слои разбивается на ячейки, вычисляются перемещения каждой ячейки в пределах одного слоя по направлению силы  $F_n$ , рисунок 2.7.



А. Вид сверху

Б. Общий вид

Рисунок 2.7 - Горизонтальное перемещение ячейки грунта от действия сосредоточенной силы

Вес каждой ячейки определяется как произведение объемного веса грунта на объем ячейки. После того, как вычислены перемещения  $\Delta_1, \Delta_2 \dots \Delta_n$  ячеек грунтового основания системы ГПА – фундамент - грунтовое основание, обладающих массами  $m_1, m_2 \dots m_n$ , вычисляются собственные частоты поступательных и крутильных колебаний системы ГПА – фундамента – грунтовое основание.

## 2.3 Влияние массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики фундамента

В расчетной модели системы ГПА – фундамент - основание, неоднородное грунтовое основание рассматривается как полу бесконечная среда ограниченная дневной поверхностью основания. Для выполнения практических расчетов амплитудно-частотных характеристик фундамента в усовершенствованной расчетной модели назначаются границы области грунтового основания по глубине и в горизонтальной плоскости, до которых достаточно учитывать влияние массы грунтов с приемлемой для практических расчетов точностью [87].

Алгоритм назначения границ области грунтового основания в горизонтальной плоскости, влияние массы которого достаточно учитывать для вычисления с приемлемой точностью амплитудно-частотных характеристик выглядит следующим образом. В первом приближении выполняется расчет по определению 1-й собственной частоты колебаний (СЧК) фундамента, расстояние от грани фундамента до границы грунтового основания принимается  $0.5 \cdot B$ , где  $B$  – ширина фундамента, рисунок 2.8. Во втором приближении границы системы расширяются на  $0.5B$ , вычисляется 1-я СЧК фундамента ГПА  $\lambda_{12}$ . Собственные частоты колебаний фундамента в первом  $\lambda_{11}$  и втором приближении  $\lambda_{12}$  сравниваются по формуле,

$$\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n+1}. \quad (2.30)$$

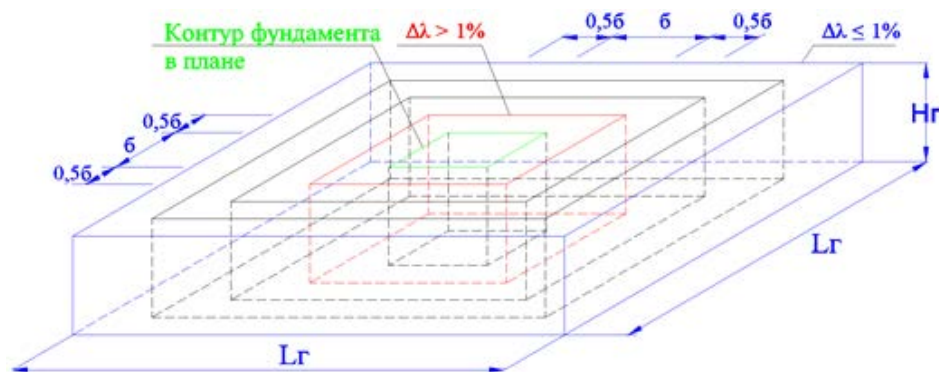


Рисунок 2.8 - Размеры грунтового основания для учета влияния массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики фундамента.

Последовательное увеличение границ грунтового основания  $L_g$  и вычисление соответствующих этим границ собственных частот колебаний фундамента выполняется пока не выполнится условие, рисунок 2.9, [87]

$$\Delta\lambda \leq \lambda_n \cdot k_{пт}, \quad (2.31)$$

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

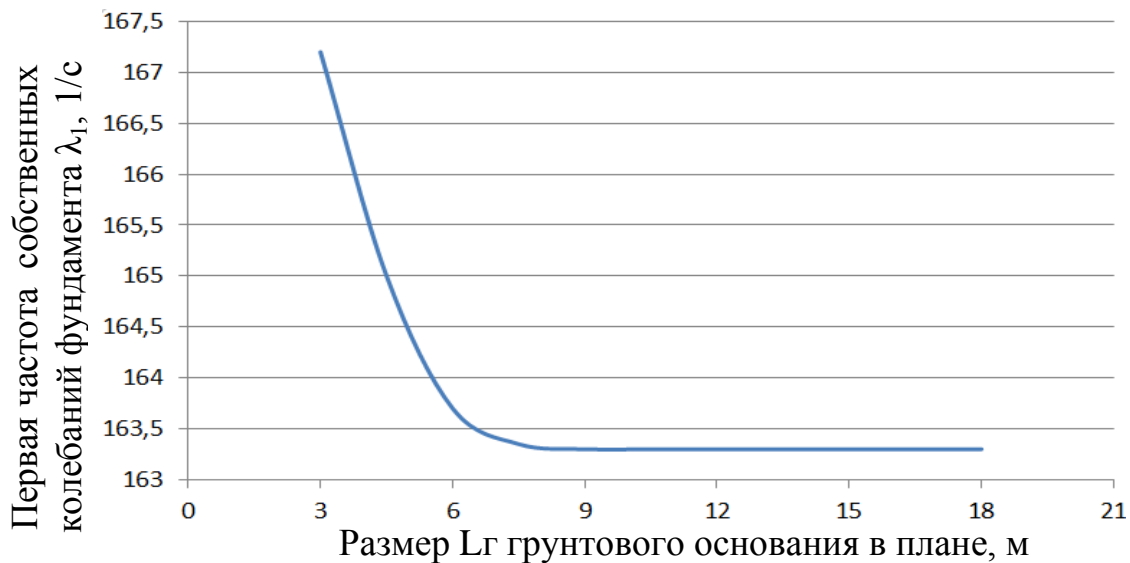


Рисунок 2.9 - Зависимость расчетной частоты собственных колебаний фундамента от размеров грунтового основания  $L_g$  масса которого учитывается при вычислении амплитудно-частотные характеристики

## 2.4 Сопротивление упругим колебаниям в системе ГПА – фундамент -грунтовое основание

В усовершенствованной расчетной модели затухание колебаний учитывается в элементах строительной конструкции и в грунтах, зависит от материала фундамента и грунтовых условий. В работах [62], [63] и др. приводятся экспериментальные данные модуля затухания колебаний грунтов.

Общее сопротивление упругим колебаниям в системе ГПА – фундамент - грунтовое основание определяется как сумма  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  внутреннего  $\gamma_1$  – сопротивления конструкции фундамента и внешнего  $\gamma_2$  – сопротивления среды.

На рисунке 2.10 приводится общая схема системы ГПА – фундамент – грунтовое основание.

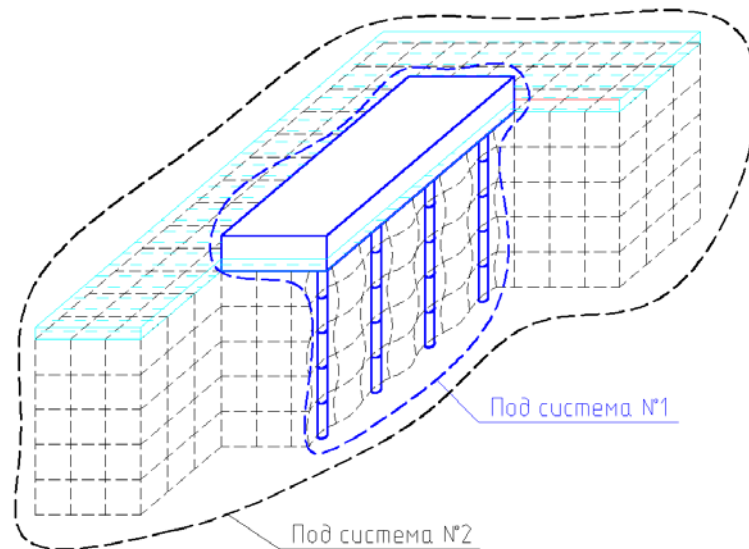


Рисунок 2.10 - Система ГПА – Фундамент – грунтовое основание

Система ГПА – фундамент – грунтовое основание состоит из 2-х подсистем:

**Подсистема №1** – Конструкция фундамента, рама ГТД, рама компрессора, ГТД и компрессор, сопротивление упругим колебаниям подсистемы №1 обусловлено параметром  $\gamma_1$ . По опытным данным [11], [18], [30], [38], [62], [63], [76] и др. сопротивление упругим колебаниям  $\gamma_1 = 0,02$  – для стальных конструкций.

**Подсистема №2** – Внешняя среда, окружающая фундаментную конструкцию в состав которой входит: атмосферный воздух; область естественного или искусственного грунтового основания с границами по глубине  $H_g$  и в плане  $L_g$ . Для определения параметра  $\gamma_2$ , в усовершенствованной расчетной модели вычисляются площади поверхностей фундамента, контактирующих с внешней средой. В таблице 2.1 приведен пример определения площади поверхности конструкции фундамента, контактирующей с различными видами материалов, неоднородной внешней среды, где:  $A_{11}, A_{12} \dots A_{15}$  – площади поверхностей элементов конструкции фундамента, контактирующих с воздушной средой;  $A_{31}, A_{32} \dots A_{35}$  – то же с грунтом;  $A_{n1}, A_{n2} \dots A_{n5}$  – то же с другими материалами которыми может быть представлена внешняя среда.

Пример определения расчетных площадей элементов конструкции фундамента

Среда	Площадь поверхностей ростверка				Площадь поверхно стей свай	Общая площадь элементов
	Стойки	Балки	Раскосы	Прочие эл-ты		
Воздух	A11	A12	A13	A14	A15	A1=Σ
Грунт	A31	A32	A33	A34	A35	A3=Σ
n-среда	An1	An2	An3	An4	An5	An=Σ

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

$$\gamma_2 = \gamma_a \cdot k_a + \gamma_r \cdot k_r + \gamma_n \cdot k_n, \quad (2.32)$$

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  $H_r$ ;  $A_a$  – площадь поверхности конструкции фундамента, контактирующая с атмосферным воздухом;  $A_r$  – то же с грунтовым основанием до глубины  $H_r$ ;  $A_n$  – то же с другими материалами которыми может быть представлена внешняя среда.

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

$$\gamma_r = \Phi_{г0} \cdot \lambda, \quad (2.33)$$

где:  $\Phi_{г0}$  – модуль затухания колебаний неоднородного грунтового основания до глубины  $H_r$ , с;  $\lambda$  – частота собственных колебаний фундамента, 1/с.

В таблице 2.2 приведены результаты экспериментального определения параметра внешнего сопротивления упругим колебаниям в водной и в воздушной среде [76]. Усовершенствованная расчетная модель позволяет выполнять расчеты амплитудно-частотных характеристик фундамента с учетом влияния сопротивления упругим колебаниям внешней среды представленной различными материалами, для которых имеются экспериментально измеренные значения

коэффициента сопротивления упругим колебаниям в том числе воздух и вода, таблица 2.2.

Таблица 2.2

Экспериментальные коэффициенты сопротивления упругим колебаниям [76]

Среда	Тип	Коэффициент сопротивления, $\gamma$ .
Воздух	Суммарное	0,004
	Внутреннее	0,004
	Внешнее	$\sim 0$
Вода	Суммарное	0,031
	Внутреннее	0,004
	Внешнее	0,027

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

$$\Phi_{ГО} = \frac{\Phi_1 \cdot \int_0^{z_1} v(y) dz + \Phi_2 \cdot \int_{z_1}^{z_2} v(y) dz + \dots + \Phi_n \cdot \int_{z_{i-1}}^{z_i} v(y) dz}{\int_0^{z_i} v(y) dz}, \quad (2.34)$$

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

На рисунке 2.11 приводится схема для определения площади проекции функции прогибов сваи.

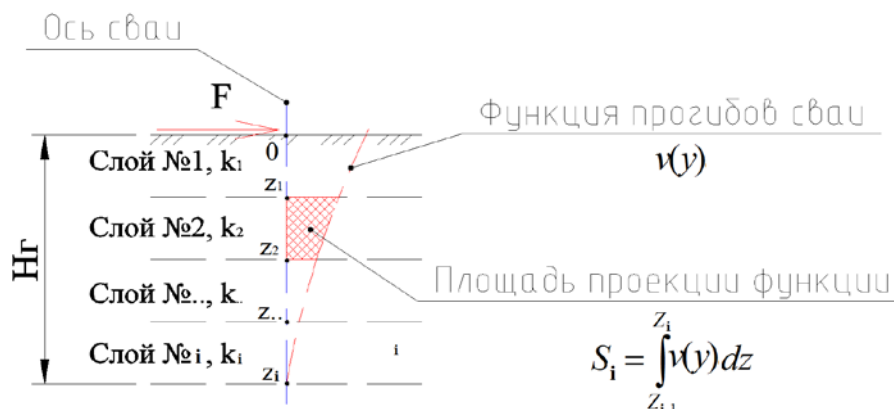


Рисунок 2.11 - Площадь проекции функции прогибов сваи

В таблице 2.3 приводятся пример исходных данных для определения параметров сопротивления упругим колебаниям неоднородного грунтового основания  $\gamma_r$ .

Таблица 2.3

Исходные данные для определения параметра  $\gamma_r$ 

№ Слоя	Наименование грунтов	Высота слоя	Тип грунта	t, °С	E, Па	Φ, сек	$\gamma_r = \Phi_{r0} \cdot \lambda_y$
1	Грунт №1	$h_1$	III	$t_1$	$E_1$	$\Phi_1$	
2	Грунт №2	$h_2$	II	$t_2$	$E_2$	$\Phi_2$	
...	...	...	...	...	...	...	
i	Грунт №i	$h_i$	I	$t_i$	$E_i$	$\Phi_i$	

По результатам обработки инженерно-геологических изысканий проектов магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта», «Сила Сибири» и экспериментальных исследований демпфирующих свойств грунтов, приведенных в работах [38], [49], [50], [51], [52], [62], [63], [74] сведены в таблицу экспериментальные данные измерения модуля затухания колебаний  $\Phi$  и соответствующие упругие характеристики грунтов E, k, таблица 2.4.

Таблица 2.4

## Обобщение опытных данных для талых и мерзлых грунтов

Наименование грунтов	Φ, 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

На рисунке 2.12 представлены графики зависимости  $\gamma_r(\lambda) = \Phi_{г0} \cdot \lambda$  для мерзлых, талых и насыпных грунтов построенные по данным таблица 2.4.

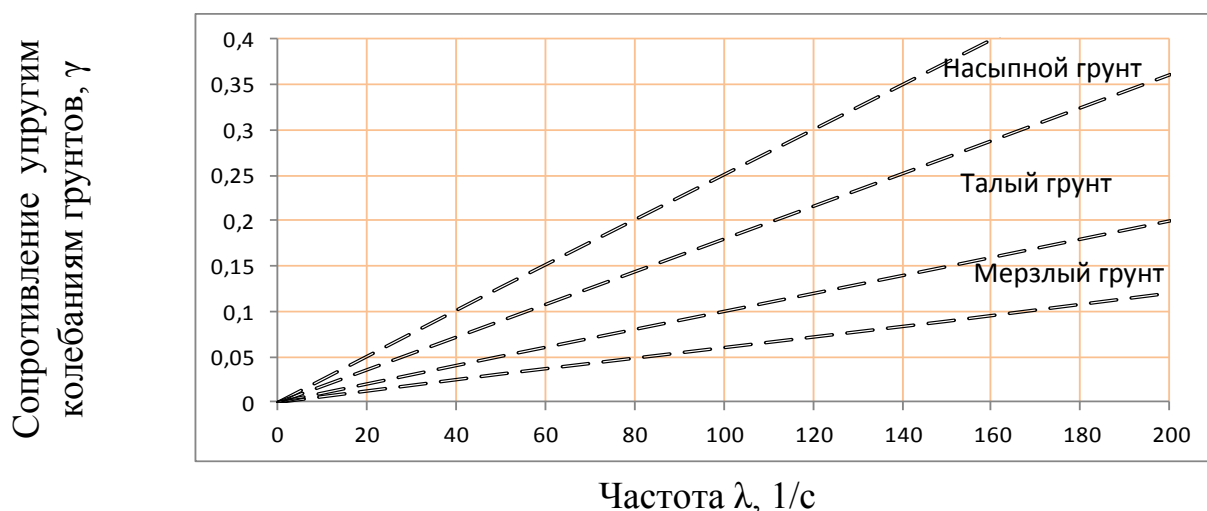


Рисунок 2.12 - Зависимость параметра  $\gamma$  от  $\lambda$  для грунтов

По результатам обработки экспериментальных данных получена кривая в виде зависимости модуля затухания колебаний  $\Phi$  от модуля упругости грунта  $E$  [Па] и построена двух параметрическая функция  $\gamma_r(\omega, E)$  параметра сопротивления упрягим колебаниям в грунтовом основании, рисунки 2.13 и 2.14.

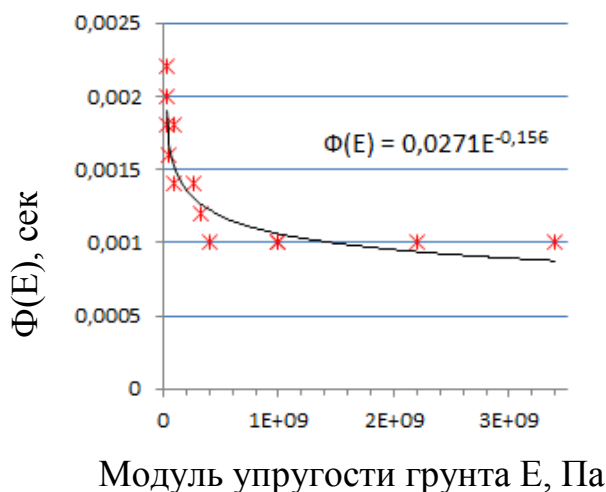


Рисунок 2.13 - График функции  $\Phi(E)$

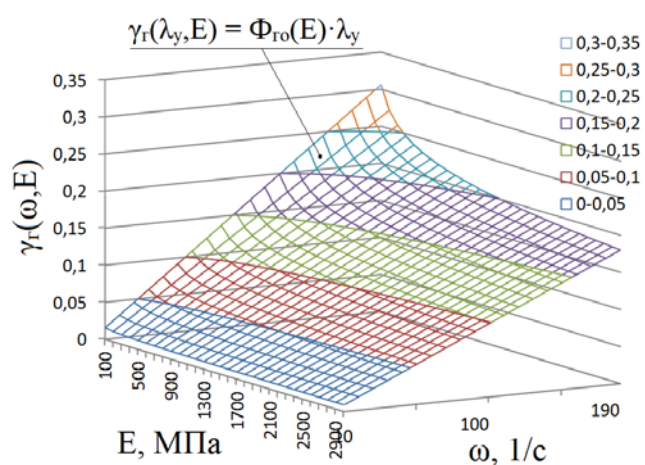


Рисунок 2.14 - График функции  $\gamma_r(\lambda_\gamma, E)$

Зависимость модуля затухания колебаний  $\Phi(E)$  и двух параметрическая функция параметра сопротивления упрягим колебаниям  $\gamma_r(\omega, E)$  имеют вид

$$\Phi_n(E) = 0.0271 \cdot E^{-0.156}, [c] \quad (2.35)$$

$$\gamma_r(\lambda_\gamma, E) = \Phi_{г0}(E) \cdot \lambda. \quad (2.36)$$



## 2.5 Периодические нагрузки от вращения роторов ГПА

В ГПА вибрации преимущественно возникают из-за дефектов конструкции или её износа в основном ротора агрегата. Вращающийся ротор – один из наиболее виброактивных узлов ГПА. Смещение центра масс ротора от его оси вращения – эксцентриситет ротора  $e$  [38] носит случайный характер и вызван неточностью сборки, монтажа оборудования и т.п. При наличии минимальной неуравновешенности ротора (смещение центра масс ротора от его оси вращения) появляется центробежная сила [38] которая связана со скоростью вращения ротора квадратичной зависимостью.

В машинах с номинально уравновешенными движущимися частями, к которым относится двигатель ГПА, динамические нагрузки определяются как центробежная сила, по формуле

$$P = m \cdot e \cdot \omega^2 = U \cdot \omega^2, \quad (2.37)$$

где:  $m$  – масса движущихся частей машины (масса роторов), кг;  $\omega$  – круговая частота вращения, 1/сек.;  $e$  – амплитуда перемещения центра масс ротора от оси его вращения (эксцентриситет ротора), м,  $U$  – дисбаланс ротора, кг·м.

В некоторый момент времени  $t$  центробежная сила действует под углом  $\alpha = \omega \cdot t$ , таким образом на опоры ротора действует две силы направленные в вертикальном  $P_z$  и горизонтальном направлении  $P_y$ .

$$P_z = m \cdot e \cdot \omega^2 \sin(\omega t) = U \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t), \quad (2.38)$$

$$P_y = m \cdot e \cdot \omega^2 \cos(\omega t) = U \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t), \quad (2.39)$$

где:  $P_z$  – амплитуда динамической силы, изменяющаяся по закону  $\sin \omega t$ , Н;  
 $P_y$  – амплитуда динамической силы, изменяющаяся по закону  $\cos \omega t$ , Н.

Центробежная сила от вращения роторов ГПА передается от корпуса двигателя на раму в виде вертикальных и горизонтальных периодических нагрузок  $P_z(\omega)$  и  $P_y(\omega)$  в точках крепления опор двигателя к раме ГТД, рисунок 2.15. Далее нагрузки передаются на фундаментную конструкцию через точки крепления рамы к фундаменту.

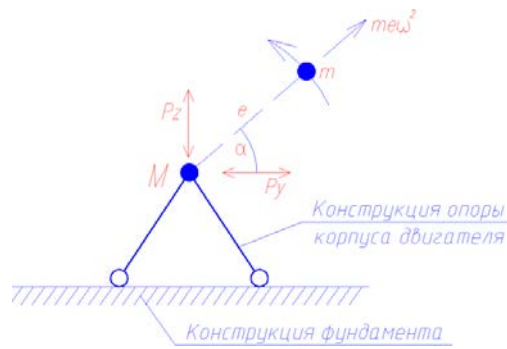


Рисунок 2.15 - Схема передачи центробежной силы на опоры ротора ГПА

На примере ГПА-25 выполнен вычислительный эксперимент по определению периодических нагрузок  $P_z(\omega)$  и  $P_y(\omega)$ , действующих на раму газотурбинного двигателя и раму компрессора в точках крепления опор к раме. В вычислительном эксперименте центробежные силы от вращения роторов силовой турбины (СТ), турбины низкого давления (ТНД), компрессора высокого давления (КВД), трансмиссии и ротора нагнетателя приложены в точках расположения центров масс этих деталей  $m_1, m_2, m_3, m_4$  и  $m_5$  рисунок 2.15, А, где:  $m_3$  – масса ротора СТ,  $m_1$  - масса ротора ТНД,  $m_2$  – масса ротора КВД,  $m_4$  - масса трансмиссии,  $m_5$  – масса ротора нагнетателя.

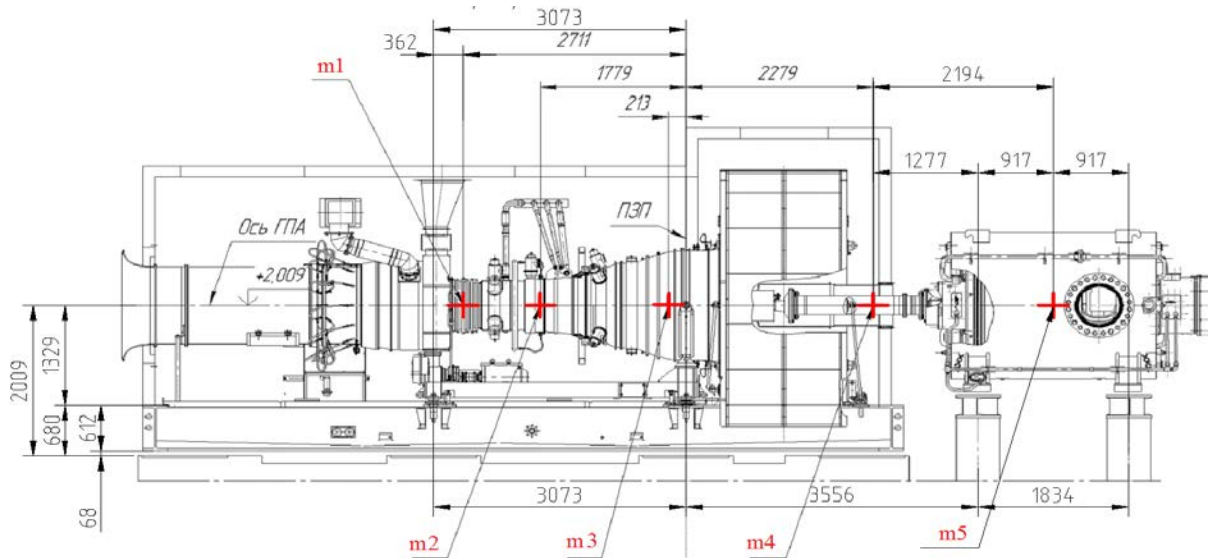
Данные для определения динамической нагрузки от вращения роторов ГПА-25 «Урал» - частоты вращения  $\omega$  и массы  $m$  роторов приведены в таблице 2.5, расчетный эксцентриситет всех роторов  $e = 1,5\text{мкм} = 0,0015\text{мм}$ .

Таблица 2.5

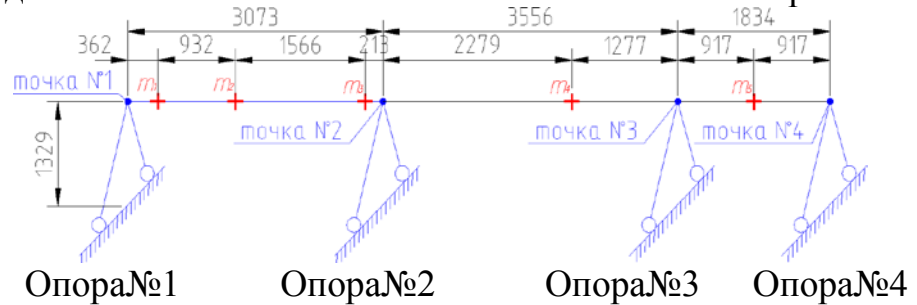
Данные для определения динамической нагрузки от ГПА-25 «Урал»

Наименование движущихся деталей	Масса, кг.	Частота вращения		Центробежная сила, Н.
		п, об./мин.	$\omega$ , рад./сек.	
Ротор силовой турбины (СТ), $m_3$	670	5250	550	314
		5000	523	284
		3500	366	139
Ротор турбины низкого давления (ТНД), $m_1$	753	4600	481	270
		4300	450	236
		3200	335	131
Ротор компрессора высокого давления (КВД), $m_2$	410	12000	1256	1002.5
		11670	1221	947
		10150	1062	717
Трансмиссия ГТУ, $m_4$	160	5250	550	75
		5000	523	68
		3500	366	33
Ротор нагнетатель, $m_5$	1350	5250	550	633
		5000	523	572
		3500	366	280

Схема расположения центров масс роторов двигателя ПС-90ГП-25 и нагнетателя ГПА-25 «Урал» на рисунке 2.16.



А. Общий вид двигателя ПС-90ГП-25 и нагнетателя ГПА-25 «Урал».



Б. Общий вид распределения центров масс между опорами

Рисунок 2.16 - Схема расположения центров масс роторов

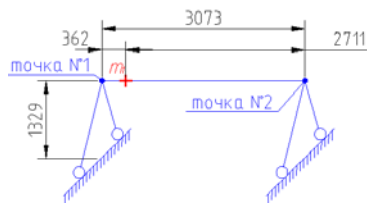
В усовершенствованной расчетной модели расчетная динамическая нагрузка от газотурбинных ГПА вычисляется как центробежная сила по формуле

$$P = U_{per} \cdot \omega^2 \cdot k_i, \quad (2.40)$$

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;  $k_n = U_{res}/U_{per}$  - поправочный коэффициент равный отношению остаточного дисбаланса ротора  $U_{res}$  к допустимому  $U_{per}$  значению для данного типа машины по данным производителей ГПА.

Периодическая нагрузка от роторов с массами  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$  распределяется между опорами двигателя №1, №2 и нагнетателя №3, №4. В

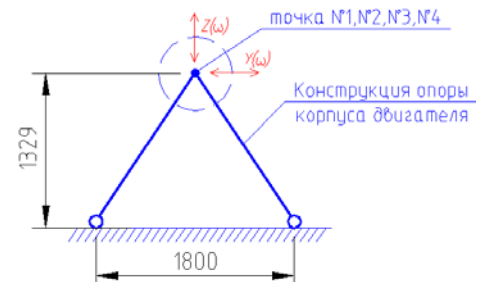
расчетной модели, центробежная сила от роторов распределяется между опорами обратно пропорционально расстоянию центра тяжести ротора до опоры. Приведена схема передачи вертикальных и горизонтальных центробежных сил  $P_{z1}(t) = U_{per1} \cdot \omega_1^2 \cdot k_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t)$ ,  $P_{y1}(t) = U_{per1} \cdot \omega_1^2 \cdot k_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t)$ , от ротора массой  $m_1$ , аналогично  $P_{z2}$ ,  $P_{y2}$ ,  $P_{z3}$ ,  $P_{y3}$ ,  $P_{z4}$ ,  $P_{y4}$ ,  $P_{z5}$ ,  $P_{y5}$  от ротора массой  $m_2 \dots m_5$  на опоры двигателя №1...№4. Здесь  $\omega_1 \dots \omega_5$  – соответственно частоты вращения роторов с массами  $m_1 \dots m_5$ ,  $k_{1m}$  – коэффициент пропорциональный расстоянию ротора массой  $m_1$  до опоры № $n$ , на рисунке 2.17.



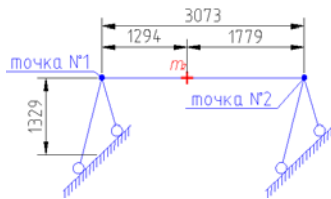
Доля центробежной силы на:

Опору №1	Опору №2
$k_{11} = \frac{2.711}{3.073}$	$k_{12} = \frac{0.362}{3.073}$

А. Центр масс ротора  $m_1$



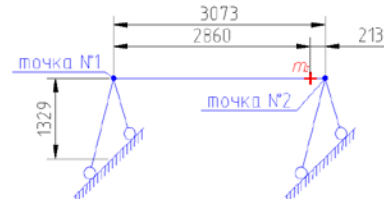
Б. Схема передачи динамической нагрузки  $P(z)$  и  $P(y)$  через опоры двигателя №1... №4 на раму..



Доля центробежной силы на:

Опору №1	Опору №2
$k_{21} = \frac{1.779}{3.073}$	$k_{22} = \frac{1.294}{3.073}$

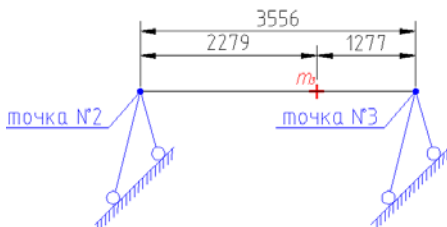
В. Центр масс ротора  $m_2$



Доля центробежной силы на:

Опору №1	Опору №2
$k_{31} = \frac{0.213}{3.073}$	$k_{32} = \frac{2.860}{3.073}$

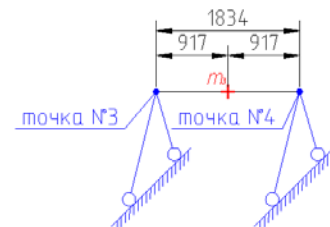
Г. Центр масс ротора  $m_3$



Доля центробежной силы на:

Опору №2	Опору №3
$k_{42} = \frac{1.277}{3.556}$	$k_{43} = \frac{2.279}{3.556}$

Д. Центр масс трансмиссии  $m_4$



Доля центробежной силы на:

Опору №3	Опору №4
$k_{53} = \frac{0.917}{1.834}$	$k_{54} = \frac{0.917}{1.834}$

Е. Центр масс ротора нагнетателя  $m_5$

Рисунок 2.17 - Схема передачи центробежных сил на опоры №1 ... №4

На рисунке 2.17 приведена схема передачи центробежной силы от вращения роторов с массой  $m_1, m_2, m_3, m_4$  и  $m_5$  на опоры двигателя №1...№4. Суммарная центробежная сила, действующая на опоры №1...№4 от роторов с массами  $m_1...m_5$  в момент времени  $t$ , определяется по формулам:

- в вертикальном направлении, на опоры №1,2,3 и 4 соответственно

$$Z_1(t) = P_{z1}(t) \cdot k_{11} + P_{z2}(t) \cdot k_{21} + P_{z3}(t) \cdot k_{31}, \quad (2.41)$$

$$Z_2(t) = P_{z1}(t) \cdot k_{12} + P_{z2}(t) \cdot k_{22} + P_{z3}(t) \cdot k_{32} + P_{z4}(t) \cdot k_{42}, \quad (2.42)$$

$$Z_3(t) = P_{z4}(t) \cdot k_{43} + P_{z5}(t) \cdot k_{53}, \quad (2.43)$$

$$Z_4(t) = P_{z5}(t) \cdot k_{54}; \quad (2.44)$$

- в горизонтальном направлении, на опоры №1,2,3 и 4 соответственно  $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), Y_4(t)$  – такие же, как в (2.41) ... (2.44) отличаются только направлением по оси  $Y$ .

В таблице 2.6 приведены значения центробежной силы на опоры №1, 2, 3, 4.

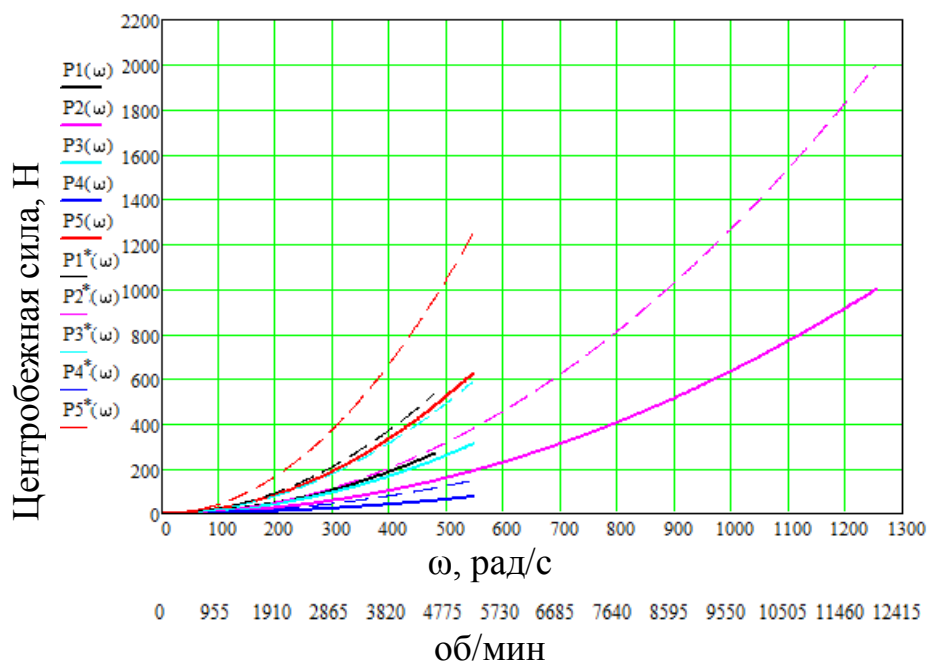
Таблица 2.6

Вертикальные и горизонтальные центробежные силы, действующие на опоры газотурбинного двигателя №1, 2 и нагнетателя №3, 4

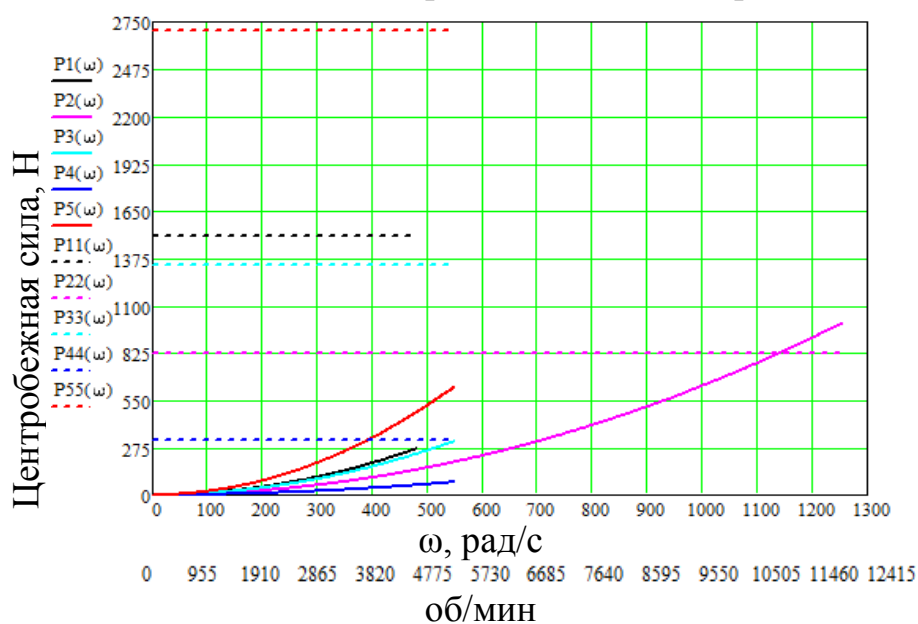
Скорость вращения, об/мин		Вертикальные центробежные силы действующие на опоры				Горизонтальные центробежные силы действующие на опоры			
		Z <sub>1</sub> , Н	Z <sub>2</sub> , Н	Z <sub>3</sub> , Н	Z <sub>4</sub> , Н	Y <sub>1</sub> , Н	Y <sub>2</sub> , Н	Y <sub>3</sub> , Н	Y <sub>4</sub> , Н
Максимальная:									
Ротор СТ	5250								
Ротор ТНД	4600	±505	±1111	±365	±316	±505	±1111	±365	±316
Ротор КВД	12000								
Трансмиссия	5250								
Нагнетатель	5250								
Номинальная:									
Ротор СТ	5000								
Ротор ТНД	4300	±453	±1039	±330	±286	±453	±1039	±330	±286
Ротор КВД	11670								
Трансмиссия	5000								
Нагнетатель	5000								
Минимальная:									
Ротор СТ	3500								
Ротор ТНД	3200	±248	±750	±161	±140	±248	±750	±161	±140
Ротор КВД	10150								
Трансмиссия	3500								
Нагнетатель	3500								

На рисунке 2.18 представлены графики зависимости центробежных сил от скорости вращения и остаточного эксцентриситета роторов на примере ГПА

«Урал» мощностью 25,0 МВт. На рисунке 2.18,А дано сравнение центробежных сил, вычисленных для численного значения эксцентриситета  $e=0,0015\text{мм}$  и  $e^* = 0,003\text{мм}$ . На рисунке 2.18,Б дано сравнение центробежных сил, вычисленных в усовершенствованной расчетной модели и динамических нагрузок по [70] для разных частот вращения роторов.



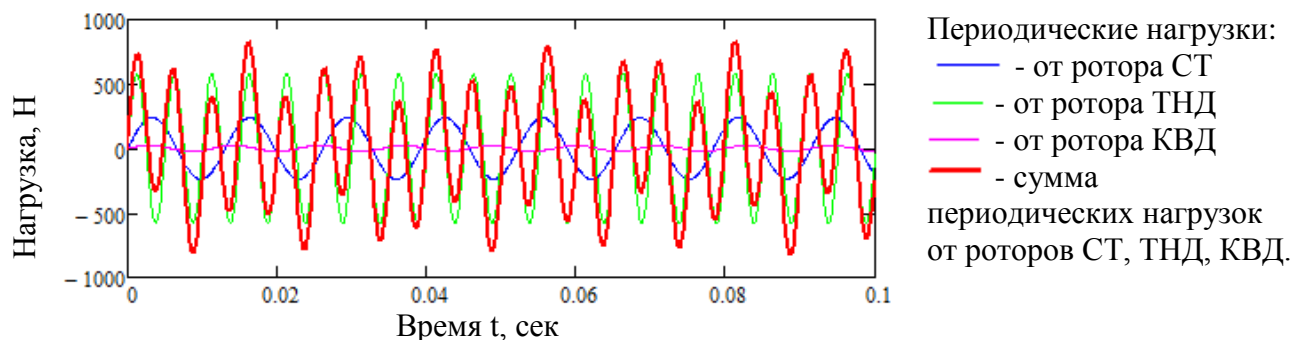
А. Графики зависимости центробежных сил от скорости вращения роторов и расчетного эксцентриситета



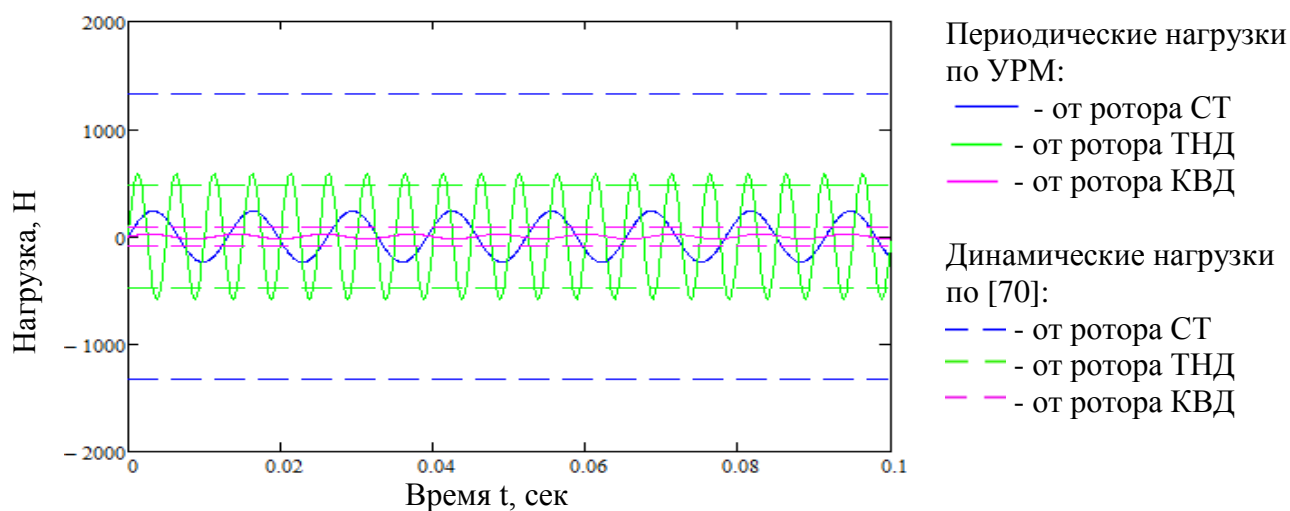
Б. Сравнение центробежных сил и динамических нагрузок по [70]

Рисунок 2.18 - Графики зависимости центробежной силы от скорости вращения и эксцентриситета ротора

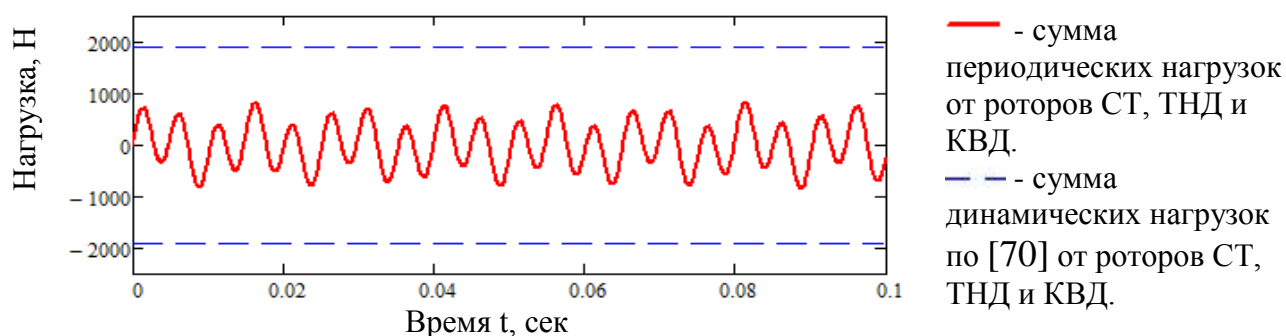
На рисунке 2.19 и в таблице 2.7 приведены результаты сравнения динамических нагрузок вычисленных по методике усовершенствованной расчетной модели и по [70] от работы 3-х роторов, действующих на опору двигателя №1 при максимальной частоте вращения.



А. Графики периодических нагрузок действующих на опору №1 за 0,1 сек



Б. Сравнение периодических нагрузок по УРМ и динамических нагрузок по [70]



В. Сравнение суммарных нагрузок по УРМ и [70] действующих на опору №1

Рисунок 2.19 - Результаты сравнения динамических нагрузок вычисленных по методике усовершенствованной расчетной модели и по [70]

Результаты сравнения динамических нагрузок вычисленных по методике усовершенствованной расчетной модели и по [70]

Источник нагрузки	Частота вращ-я, об./мин.	Динамическая нагрузка по		Сравнение $\frac{СП - УРМ}{УРМ} * 100\%$
		УРМ, Н	[70], 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 действующих строительных норм в части определения динамических нагрузок на фундамент при эксплуатации ГПА. С одной стороны более точный учёт динамических нагрузок позволит обоснованно снизить показатели металлоёмкости конструкции фундамента, а с другой необходимо исключить возможность того, что динамические нагрузки, определённая по строительным нормам окажется ниже фактической. Так динамическая нагрузка по [70] от ротора компрессора высокого давления при частоте вращения 12000 об/мин меньше центробежной силы по УРМ на 18,2%.

В перечне параметров для проектирования фундаментов под ГПА, производители ГПА не представляют численное значение допустимого остаточного дисбаланса  $U_{\text{per}}$  роторов, а так же значения  $U_{\text{res}}$  остаточного дисбаланса и или  $e$  эксцентриситета роторов по результатам испытаний на стенде. Для более точного вычисления центробежных сил, необходимо включить в перечень параметров, получаемых от производителей: максимально допустимый остаточный дисбаланс  $U_{\text{per}}$  и численное значение остаточного дисбаланса  $U_{\text{res}}$  роторов по результатам испытаний на стенде.



## 2.6 Амплитуды колебаний фундамента ГПА от воздействия нескольких источников периодических нагрузок

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 периодических нагрузок 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, то есть сложением колебаний [33].

На примере условного фундамента под ГПА25«Урал» выполнено сложение амплитуд колебаний от одновременного воздействия нескольких источников периодической нагрузки. Источниками периодической нагрузки являются роторы ГПА, в таблице 2.6 приведены данные для определения нагрузок.

$$\sum_{i=1}^n y_i = A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2) + A_3 \sin(\omega_3 t + \delta_3) + A_4 \sin(\omega_4 t + \delta_4) + A_5 \sin(\omega_5 t + \delta_5) \quad (2.45)$$

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

В процессе пуска или остановки ГПА соответственно при ускорении или замедлении частоты вращения роторов появляется момент времени, в который угловая частота вращения роторов  $\omega$  совпадает с собственной частотой колебаний фундамента  $\lambda$ . Этот момент времени является моментом прохождения через резонансную частоту колебаний фундамента.

На примере ГПА-25«Урал», выполнен вычислительный эксперимент, который показывает явление неодновременного прохождения через резонансную частоту роторами с различающимися частотами вращения. Рассчитаны амплитуды колебаний условного фундамента от одновременного воздействия пяти источников периодических нагрузок. Условный фундамент имеет расчетные характеристики: коэффициент жесткости  $K_y=37500$  кН/м; частота собственных колебаний  $\lambda=330$  1/с; параметр сопротивления упругим колебаниям системы ГПА - фундамент - грунтовое основание  $\gamma=0.1$ .

В 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  $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_5$ . Частоты вращения роторов изменяются в соответствии с графиками, приведенными на рисунке 2.20.

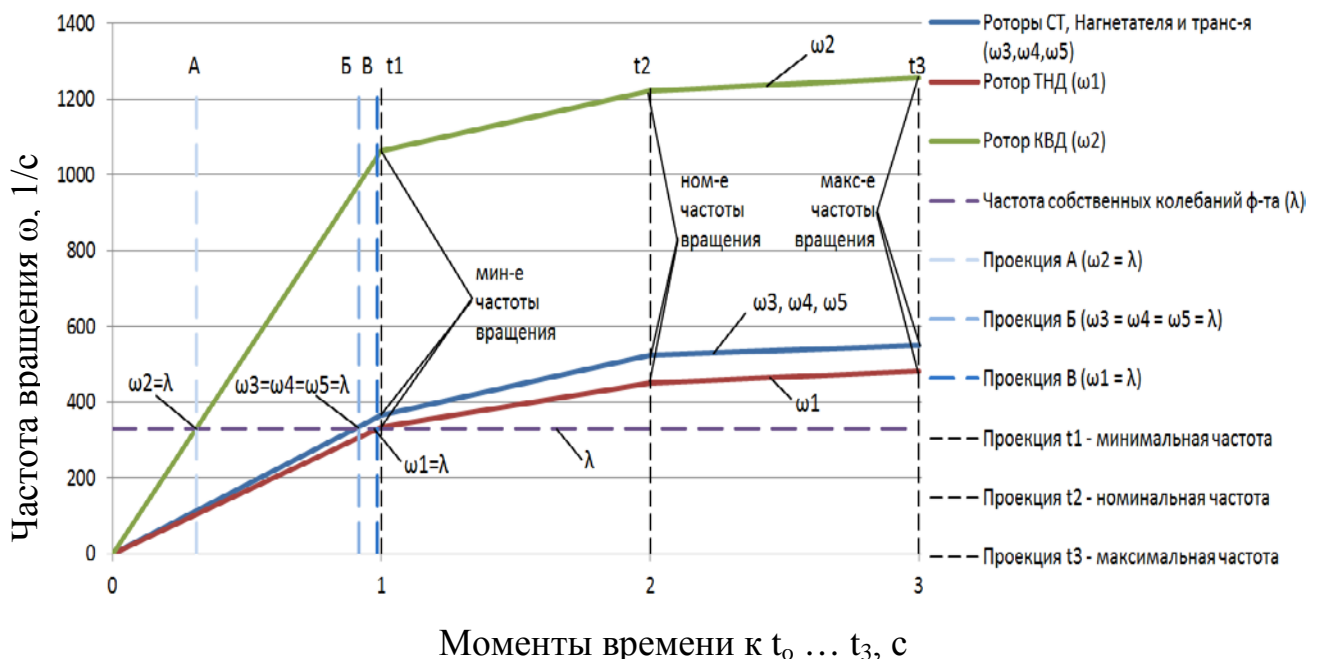


Рисунок 2.20 - Графики частот воздействия источников периодических нагрузок

В процессе разгона роторы проходят через резонансную частоту не одновременно. Первым через резонансную частоту проходит ротор компрессора высокого давления, потом роторы силовой турбины, нагнетателя и трансмиссия, последний проходит ротор турбины низкого давления. Проекция А, Б, В на рисунке 2.20 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. Проекция t1, t2, t3 на рисунке 2.20 соответствуют моментам времени, когда частоты вращения роторов  $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_5$  имеют соответственно минимальное, номинальное и максимальное значение.

На рисунке 2.21 построен график суммарной амплитуды колебаний условного фундамента.

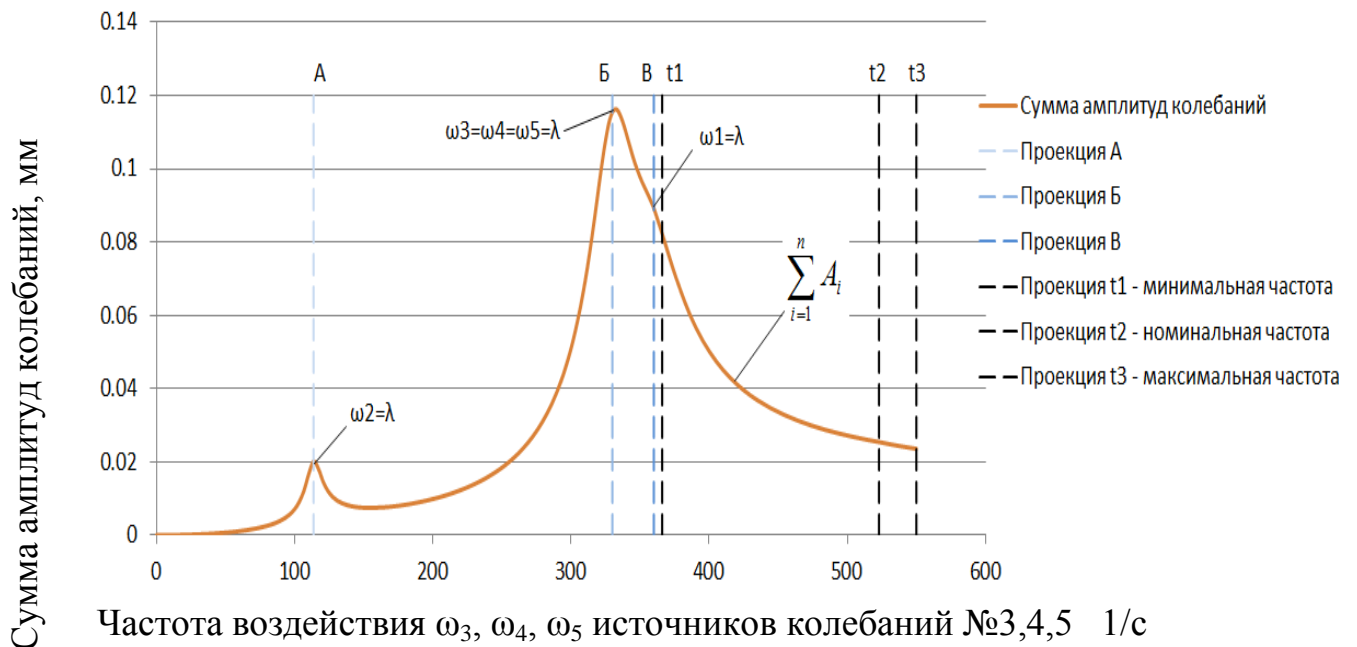


Рисунок 2.21 - График изменения суммарной амплитуды колебаний фундамента

В фундаментах ГПА необходимо учитывать полигармонические силовые воздействия от вращения роторов. 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  $t_1$  на рисунке 2.20.

## 2.7 Выводы

Разработана усовершенствованная расчетная модель для определения амплитудно-частотных характеристик легких фундаментов ГПА с учетом влияния массы и неоднородности грунтового основания по объемному весу, параметру сопротивления упругим колебаниям и модулю упругости грунтов.

Разработана методика, позволяющая учитывать неоднородность грунтового основания по параметру сопротивления упругим колебаниям. Сопротивление упругим колебаниям учитывается как сумма внутреннего сопротивления конструкции фундамента и сопротивления неоднородной внешней среды с учетом площади контакта фундамента с внешней средой.

По результатам обработки инженерно-геологических изысканий проектов магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта», «Сила Сибири» и экспериментальных исследований в работах [38], [49], [50], [51], [52], [62], [63], [74] сведены в таблицу экспериментальные данные измерения модуля затухания грунтов  $\Phi$  и соответствующие упругие характеристики грунтов  $E$ ,  $k$ . На основе опытных данных построена кривая зависимости модуля затухания колебаний грунтов, от модуля упругости для мерзлых и талых типов грунтов. Построен график зависимости параметра сопротивления упругим колебаниям от собственной частоты колебаний фундамента и модуля упругости грунтов.

Разработаны рекомендации по определению динамических нагрузок в виде полигармонических силовых воздействий с учетом частот вращения и остаточных дисбалансов роторов ГПА.

## ГЛАВА 3. Экспериментальная проверка математической модели системы ГПА – фундамент - грунтовое основание

### 3.1 Аппаратура для решения виброметрической задачи

Экспериментальное изучение вибраций фундамента ГПА производится с целью:

- определения допустимости вибраций в соответствии с технологическими требованиями производителей ГПА и действующих строительных норм;
- определения динамических характеристик фундамента ГПА для прогнозирования его поведения при возможном изменении динамических нагрузок во времени;
- исследование и уточнение истинного характера физико-механических процессов в фундаменте для разработки и улучшения методов расчета фундаментов ГПА с учетом динамических явлений.

Термином «измерение вибраций» обозначается регистрация и последующий анализ:

- амплитуд и частот гармонических составляющих вибраций;
- пиковые значения перемещения и т.п.;
- изменения линейного или углового перемещения (скорость, ускорение).

При исследовании фундаментов ГПА необходимо измерять амплитуды перемещений от нескольких микронов до нескольких миллиметров.

Основными показателями при выборе аппаратуры для решения виброметрической задачи являются:

- соответствие рабочего диапазона частот виброметра спектру измеряемых вибраций создаваемых работой ГПА;
- соответствие амплитудного диапазона виброметра наибольшим ожидаемым амплитудам виброперемещения (виброскорости, виброускорения) исследуемого фундамента под ГПА;

- надлежащая чувствительность виброметра, которая должна обеспечивать определение ординат осциллографической кривой с точностью не менее 5%.

Для измерения вибраций фундамента ГПА используется виброметр марки TV300 (сер. №2223000005 изготовлен в 2010 году).

### **Основные принципы работы виброметра.**

В виброметре модели TV300 используется пьезоэлектрический датчик ускорений для преобразований вибраций в электрический сигнал, который затем анализируется для индикации и вывода на печать среднеквадратичных значений вибрационной скорости, размах смещений, максимальных ускорений или спектральных диаграмм (рассчитываемых в реальном масштабе времени).

### **Область применения виброметра.**

Данный виброметр предназначен для тестирования вибраций возникающих при работе машин с вращающимися (ГТД) и возвратно-поступательными механизмами. Виброметр можно использовать не только для измерения вибрационных ускорений, скоростей или смещений, но также для определения собственных частот колебаний механизмов. Технические характеристики виброметра TV300 соответствуют требованиям стандарта ПИ 13823.3.

### **Технические характеристики.**

Диапазоны измерений:

Ускорений ( $\text{м/с}^2$ )	0,1 – 392 (амплитудные значения)
Скоростей ( $\text{см/с}^2$ )	0,01-80 (среднеквадратичные значения)
Смещение (мм)	0,001-10 (размах)

Частотные диапазоны при измерениях:

Ускорений	10-200Гц, 10-500Гц, 10Гц-1кГц
Скоростей	10Гц – 1 кГц
Смещение	10-500 Гц

Точность измерений:  $\leq \pm 5\%$ .

Диапазон рабочих температур: 0 – 40°C.

Влажность:  $\leq 80\%$ .

**Функциональные возможности.**

- Три режима индикации: режим Common (Стандартный), режим Special (Специальный) и режим Spectral (Спектральный).
- Измерение вибрационных ускорений, скоростей и смещений, а также числа оборотов двигателя (или собственные частоты вибраций).
- Индикация результатов измерений в столбце состояний в соответствии с предельными значениями для сигналов предупреждения и тревоги.
- Диагностика простейших неисправностей: автоматическая выдача сигнала тревоги и запроса на переход в спектральный режим измерений в случае, если измеряемые величины выходят за установленные пределы.
- Вывод на печать результатов измерений и спектральных диаграмм (при наличии принтера).
- Анализ результатов измерений и спектральных диаграмм с помощью персонального компьютера с программным обеспечением.
- Запоминание 25×62 – измеренных значений и 25 спектральных диаграмм.

В таблице 3.1 приведена расшифровка терминов используемых при описании виброизмерительного прибора TV300.

Таблица 3.1

**Принятая терминология**

	Термин	Пояснение
1.	Вибрации.	Быстрое линейное смещение объекта относительно положения его равновесия.
2.	Вибрационное смещение.	Длина вектора, соединяющего исходную точку с соответствующей точкой на исследуемом объекте.
3.	Вибрационная скорость.	Скорость изменения вибрационного смещения.
4.	Вибрационное ускорение.	Скорость изменения вибрационной скорости по времени.
5.	Частота вибраций.	Число полных циклов вибраций в единицу времени.
6.	Средне квадратичные и амплитудные характеристики вибрации, её размах.	Смотреть рисунок 3.1.
7.	Спектральная диаграмма	Диаграмма, показывающая амплитудное распределение спектральных компонент вибраций.

На рисунке 3.1 приведена схема среднеквадратичных и амплитудных характеристик вибраций. На рисунке 3.2 представлен общий вид виброметра TV300.

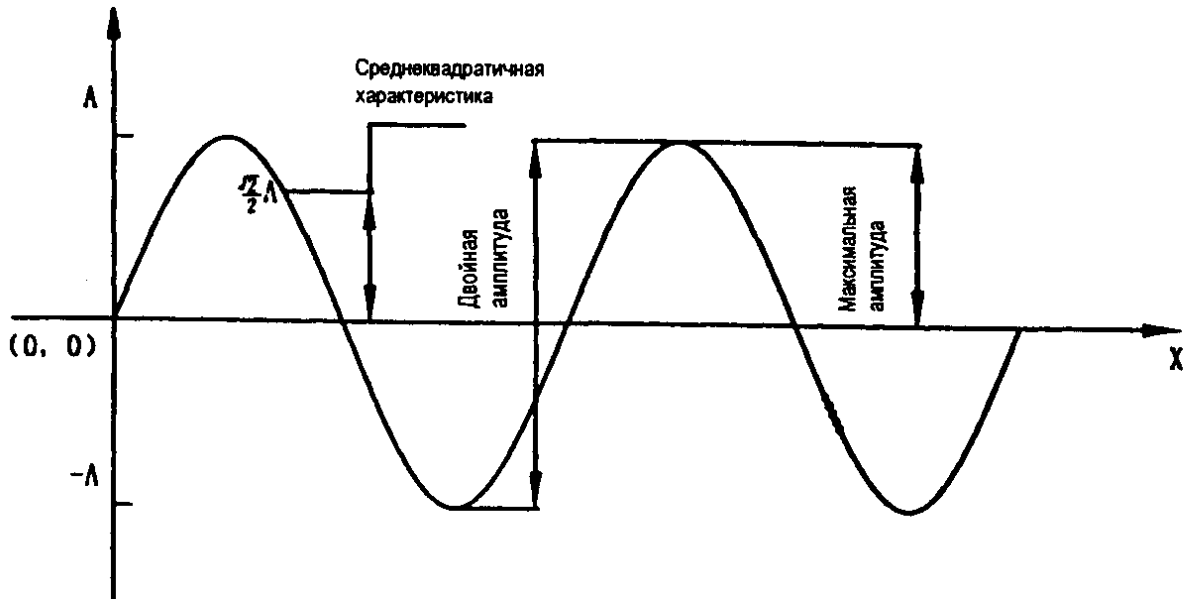


Рисунок 3.1 - Среднеквадратичные и амплитудные характеристики вибраций



Рисунок 3.2 - Общий вид виброметра TV300



### 3.2 Описание объекта исследования

Объект исследования состоит из фундамента под ГПА мощностью 25 МВт «Урал» и грунтового основания на компрессорной станции КС-4 «Воркутинская», входящей в «Систему магистральных газопроводов Бованенково-Ухта», ниже приведены:

- схема стального ростверка под ГПА25, рисунок 3.3, А;
- геологический разрез рисунок 3.3,Б;
- схема расположения центров масс и частоты вращения движущихся частей газотурбинного двигателя указанные в технической документации производителей ГПА.

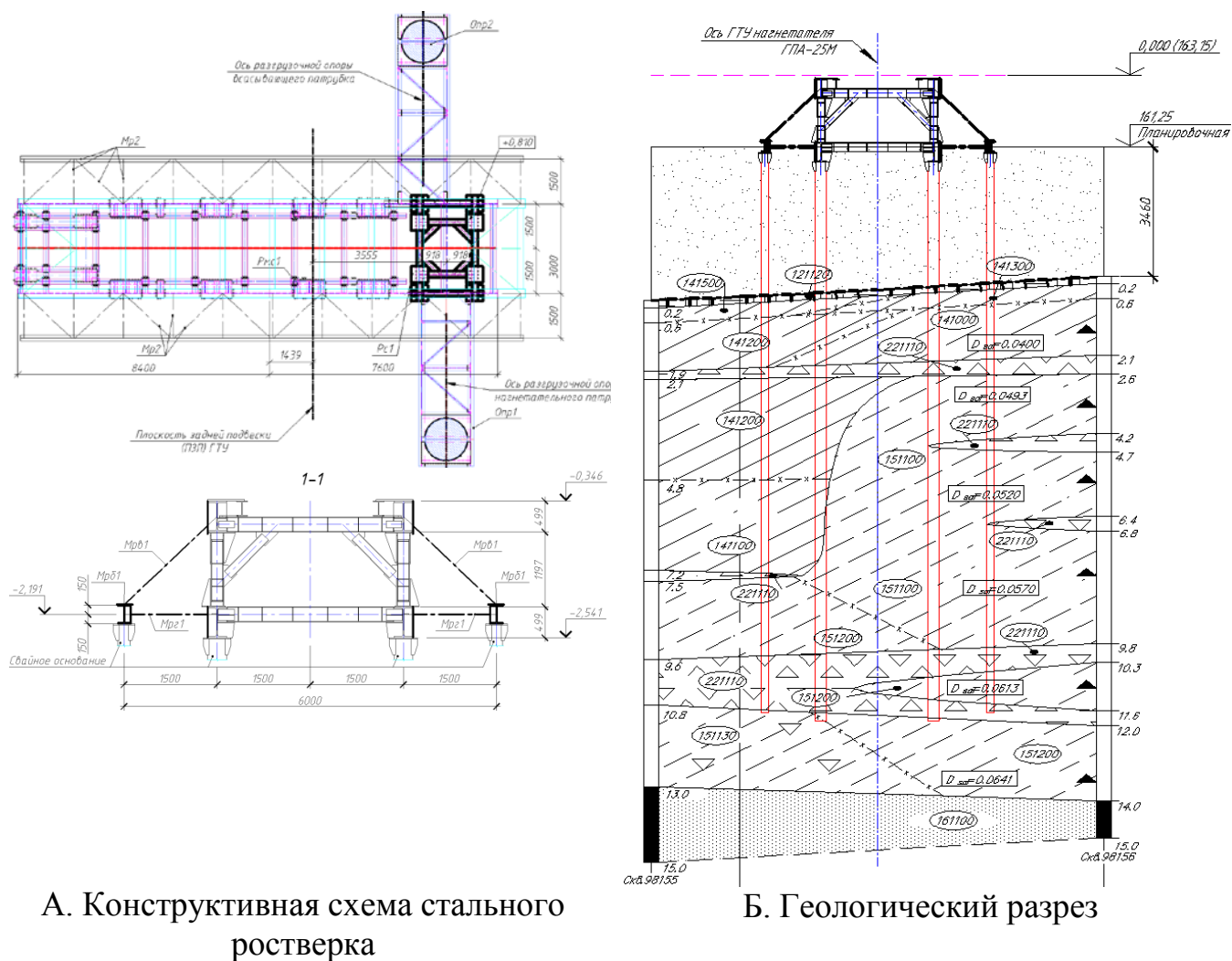


Рисунок 3.3 - Конструктивная схема стального ростверка, геологический разрез с описанием инженерно-геологических элементов

На рисунке 3.4 и в таблице 3.2 приведены исходные данные для определения динамических нагрузок от работы газотурбинного двигателя, указанные в технической документации завода производителя ГПА.

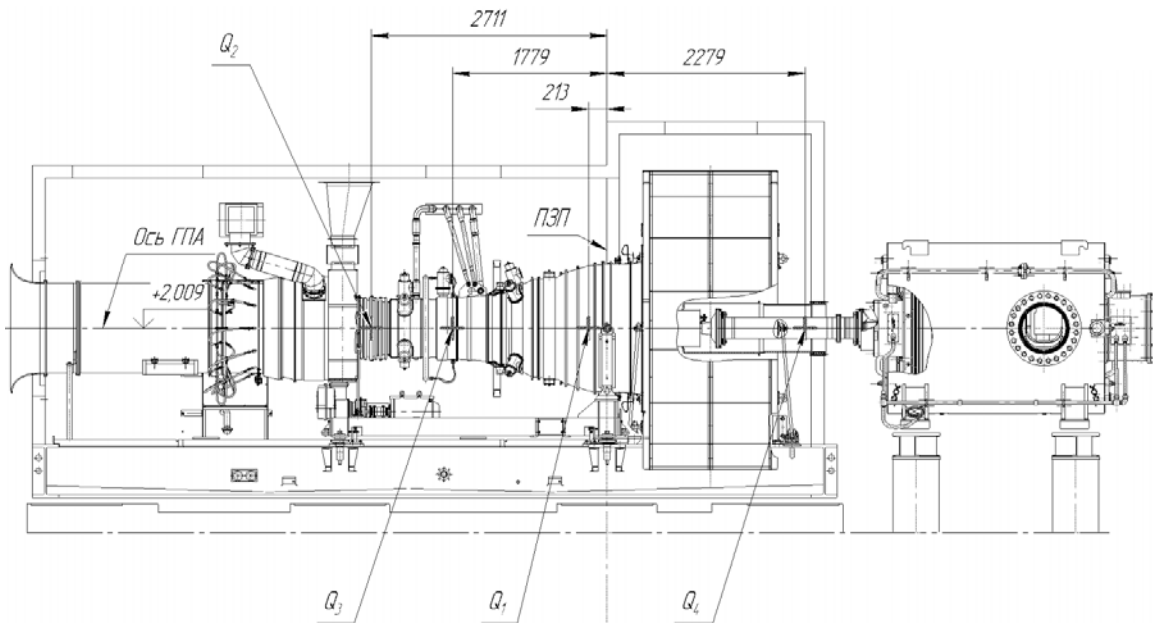


Рисунок 3.4 - Схема расположения центров вращающихся частей двигателя  
ПС-90ГП-25

Таблица 3.2

Наименования, массы и частоты вращения вращающихся частей газотурбинного двигателя мощностью 25МВт

Наименование движущихся деталей	Вес роторов, кН	Частота вращения роторов ГПА	
		об./мин.	рад./сек.
Ротор силовой турбины (СТ), $Q_1$	6,70	5250	550
		5000	523
		3500	366
Ротор турбины низкого давления (ТНД), $Q_2$	7,53	4600	481
		4300	450
		3200	335
Ротор компрессора высокого давления (КВД), $Q_3$	4,10	12000	1256
		11670	1221
		10150	1062
Трансмиссия ГТУ, $Q_4$	1,60	5250	550
		5000	523
		3500	366
Ротор нагнетатель, $Q_5$	13,50	5250	550
		5000	523
		3500	366

### 3.3 Расчет вибраций фундамента ГПА-25 «Урал» по строительным нормам

На примере ГПА-25 «Урал» выполнен динамический расчет фундамента под ГПА по действующим строительным нормам [70].

В таблице 3.3 приведены нормативные и расчетные статические нагрузки от оборудования ГПА-25 «Урал» в соответствии с строительными нормами.

Таблица 3.3

Статические нагрузки от оборудования ГПА-25 «Урал»

Вид нагрузки	Нормативная нагрузка, кН.	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка, кН.
Нагрузка от рамы ГТУ с установленным оборудованием	65	1	65
Нагрузка от рамы компрессора с установленным оборудованием	50	1	50

Вертикальные  $F_{n,v}$  и горизонтальные  $F_{n,h}$  нормативные динамические нагрузки [70], кН, от машин с вращающимися частями определяются по формуле

$$F_{n,v} = F_{n,h} = \mu \sum_{i=1}^s G_i, \quad (3.1)$$

$\mu = 0,2$  коэффициент пропорциональности по [70],

$G_i$  – вес каждого ротора машины.

Расчетные динамические нагрузки  $F_d$  от динамического воздействия движущихся частей машины определяются при расчете колебаний по формуле

$$F_d = \gamma_f F_n, \quad (3.2)$$

где  $\gamma_f$  - коэффициенты надежности по нагрузке, принимаемые по [70];

$F_n$  - нормативное значение динамической нагрузки, соответствующее нормальному эксплуатационному режиму работы машины [70].

В таблице 3.4 приведены исходные данные для определения динамических нагрузок от работы ГПА-25 «Урал» при расчете колебаний элементов конструкции фундамента по строительным нормам [70].

Динамические нагрузки для расчета амплитуд колебаний фундамента по [70]

Нагрузка от движущихся частей ГПА при расчете колебаний	Вес $G_i$ , кН	Коэффициент, $\gamma_f$	Коэффициент, $\mu$	Нагрузка, $F_n$ , кН
Ротор силовой турбины, $G_1$	6,70	1	0,2	1,34
Ротор турбины низкого давления, $G_2$	7,53	1	0,2	1,5
Ротор компрессора высокого давления, $G_3$	4,10	1	0,2	0,82
Трансмиссия, $G_4$	1,60	1	0,2	0,32
Ротор нагнетатель, $G_5$	13,50	1	0,2	2,7

Расчет колебаний фундаментов по [70] сводится к определению амплитуды горизонтальных колебаний верхней части фундамента.

Амплитуда горизонтально-крутильных колебаний относительно вертикальной оси верхней части рамных фундаментов  $a_{h,\psi}$ м, определяется по формуле

$$a_{h,\psi} = a_x + a_\psi l_b, \quad (3.3)$$

где  $a_x$  – амплитуда горизонтальных колебаний центра тяжести верхней плиты, м, рисунок 3.5,б, определяется по формуле

$$a_x = \frac{a_{x,st}}{\sqrt{[1 + (\omega / \lambda_x)^2]^2 + 4(\xi'_x)^2 (\omega / \lambda_x)^2}} \quad (3.4)$$

$a_\psi$  – амплитуда (угол поворота), рад, крутильных колебаний верхней плиты относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, рисунок 3.5, в.

$$a_\psi = \frac{a_{\psi,st}}{\sqrt{[1 + (\omega / \lambda_\psi)^2]^2 + 4(\xi'_\psi)^2 (\omega / \lambda_\psi)^2}} \quad (3.5)$$

где  $\omega$  – частота вращения машины,  $c^{-1}$ ,  $\omega = 0,105 \cdot n_r$ ,

$n_r$  – частота вращения машины, об/мин,

$a_{x,st}$ ,  $a_{\psi,st}$  – соответственно перемещение, м, и угол поворота, рад, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы  $F_h$  и момента  $M_z$

где  $F_h$  – горизонтальная составляющей динамической нагрузки по [70].

Схема приложения нагрузок  $F_h$ ,  $M_z$  и форм колебаний приведена на рисунке 3.5.

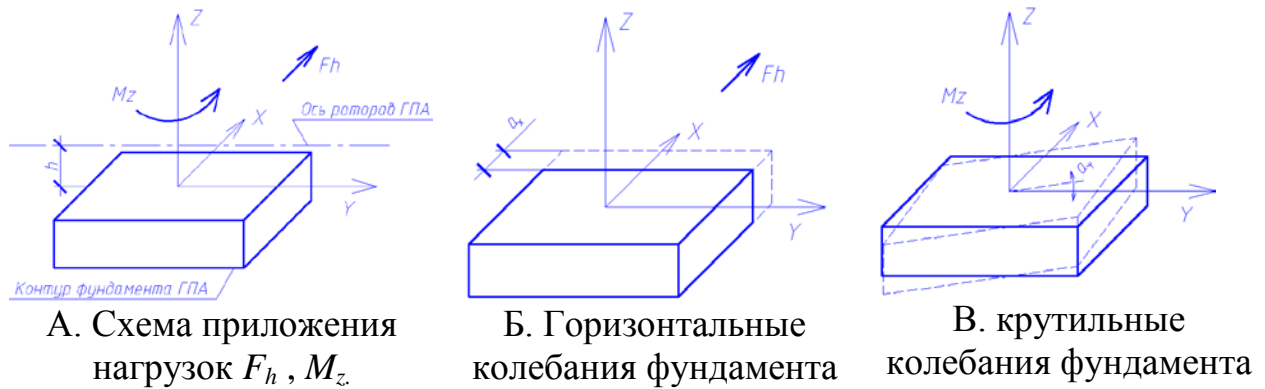


Рисунок 3.5 - Схема приложения нагрузок  $F_h$ ,  $M_z$ , направление горизонтальных и крутильных форм колебаний фундамента

Для расчета амплитуд колебаний фундамента по [70] определяется нормативная динамическая нагрузка по формуле (3.1)

$$F_{n,v} = F_{n,h} = \mu \sum_{i=1}^s G_i = 0,2 \cdot (6,7 + 7,53 + 4,1 + 1,6 + 13,5) = 6,686 \text{ кН},$$

Перемещение, м, и угол поворота, рад, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы  $F_h$  и момента  $M_z$ , определяются по формулам

$$a_{x,st} = \frac{F_h}{S_x}, \quad (3.6)$$

$$a_{\psi,st} = \frac{M_z}{S_{\psi}}, \quad (3.7)$$

где  $M_z$  – расчетное значение возмущающего момента относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести верхней плиты, для машин с вращающимися частями, Н·м,

$$M_z = F_h l_b / 2 = 6,686 \cdot 6,5 / 2 = 21,729 \text{ кН·м},$$

$S_x$ ,  $S_{\psi}$  – коэффициенты жесткости системы фундамент – основание соответственно в горизонтальном направлении, перпендикулярном оси вала машины, Н/м, и при повороте в горизонтальной плоскости, Н·м,

$\lambda_x$ ,  $\lambda_{\psi}$  – угловые частоты горизонтальных и крутильных колебаний фундамента относительно вертикальной оси,  $\text{с}^{-1}$ ,

$l_b = 6,5$  м – расстояние от центра тяжести верхней плиты до оси наиболее удаленного подшипника машины, м.

**Частота собственных колебаний фундамента:**

- Угловая частота собственных колебаний фундамента в горизонтальном направлении, перпендикулярном оси вала машины

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{S_x}{m}} = 177.3 \text{ 1/с}$$

- Угловая частота крутильных собственных колебаний фундамента в горизонтальной плоскости

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{S_{\psi}}{\Theta_{\psi}}} = 368.6 \text{ 1/с}$$

где:  $\bar{m} = 49000$  кг - масса системы фундамент-ГПА;

$\bar{\Theta}_{\psi} = 1,342 \cdot 10^6$  кг·м<sup>2</sup> - момент инерции массы  $\bar{m}$  относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести верхней плиты горизонтальной рамы.

Необходимо отметить, что по [70] расчет амплитуд колебаний выполняется из условия, что угловые частоты вращения роторов машины  $\omega$  в один момент времени имеют одинаковые значения, то есть все роторы вращаются с одинаковой частотой. Вместе с тем в соответствии с технической документацией для ГТД, в один момент времени роторы ГПА вращаются с тремя разными частотами. Методика расчета в [70] не позволяет учитывать динамическую нагрузку от роторов ГПА одновременно вращающихся с разными частотами.

В соответствии с методикой [70] при нулевой частоте вращения роторов ГПА расчетная амплитуда колебаний отлична от нуля, что не соответствует реальной картине происходящего.

При определении амплитуд колебаний целесообразно рассматривать расчетную модель фундамента под ГПА в которой учитывается взаимодействие конструкции фундамента с грунтовым основанием, учитываются демпфирующие свойства материала фундамента и грунтового основания, а так же влияние массы грунтового основания.

### 3.4 Экспериментальная проверка математической модели фундамента

В усовершенствованной расчетной модели динамическая нагрузка от вращения роторов определяется как центробежная сила. Центробежная сила квадратично возрастает с увеличением угловой скорости  $\omega$  вращения роторов ГПА. Необходимо отметить, что в рассматриваемом случае скорости вращения роторов ГПА различаются, в момент разгона роторы ГПА проходят через «резонансную частоту» не одновременно. В момент прохождения через резонансную частоту роторами с массами  $m_1, m_4, m_5$  выполняется условие

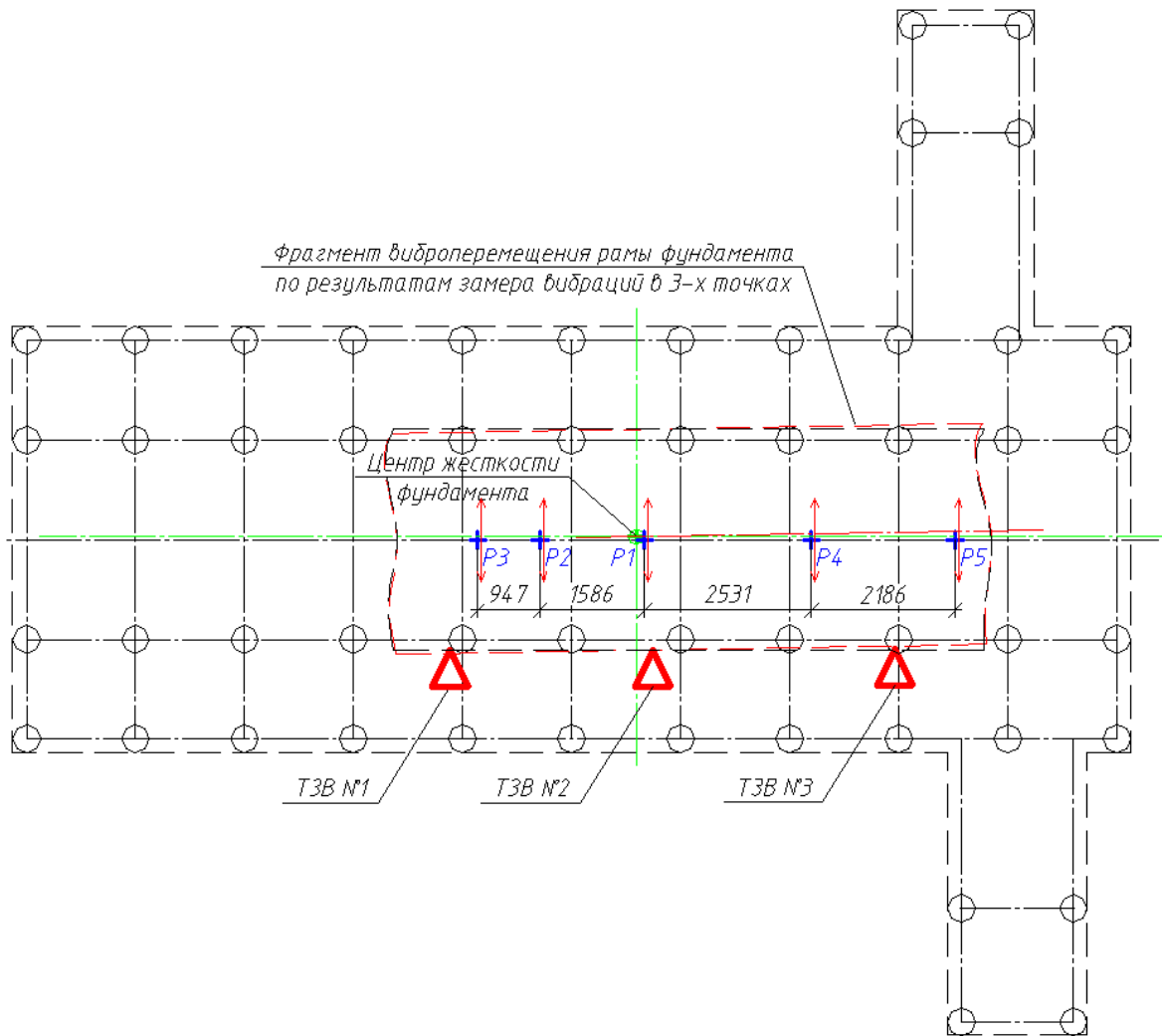
$$\omega_1 = \omega_4 = \omega_5 = \lambda, \omega_2 < \lambda, \omega_3 > \lambda,$$

где:  $\lambda$  – частота собственных колебаний фундамента.

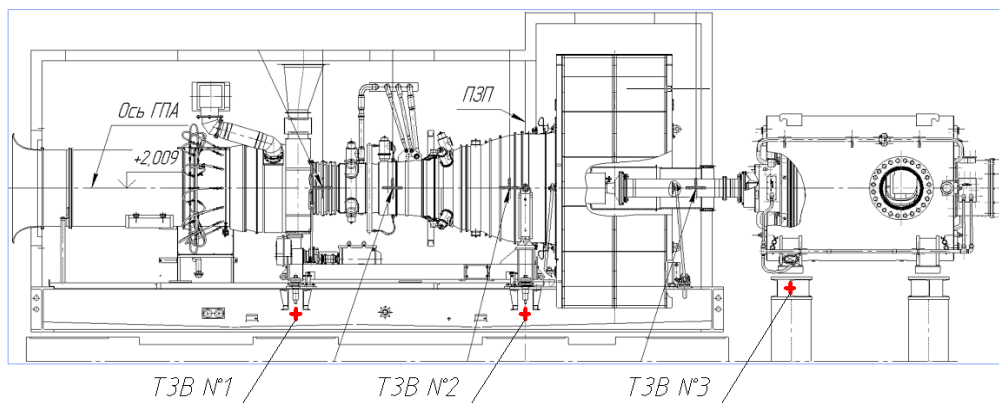
То есть ротор силовой турбины, трансмиссия и ротор нагнетателя вращаются с частотой равной собственной частоте колебаний фундамента  $\omega_1 = \omega_4 = \omega_5 = \lambda$ , частота вращения ротора турбины низкого давления – меньше  $\omega_2 < \lambda$ , а частота вращения компрессора высокого давления – больше частоты собственных колебаний фундамента  $\omega_3 > \lambda$ .

Выполнен эксперимент, цель которого сравнение расчетных амплитуд колебаний фундамента ГПА вычисленных в усовершенствованной расчетной модели и по [70] с результатами измерений.

Измерения динамических характеристик фундамента ГПА выполнялись по записям его колебаний под действием эксплуатационной нагрузки соответствующей номинальной скорости вращения роторов ГПА. На рисунке 3.6 представлена схема расположения точек замера вибраций (ТЗВ), а так же расположение центров масс роторов ГПА в плане являющихся источниками динамических нагрузок - P1, P2 ... P5.



#### А. Форма колебаний рамы ГТУ и компрессора по результатам измерений



#### Б. Схема расположения точек измерения вибраций

Рисунок 3.6 - Расположение точек измерения вибраций

По результатам измерений в точках №1, №2 под рамой ГТД и №3 под рамой компрессора получены амплитуды колебаний, рисунок 3.7.



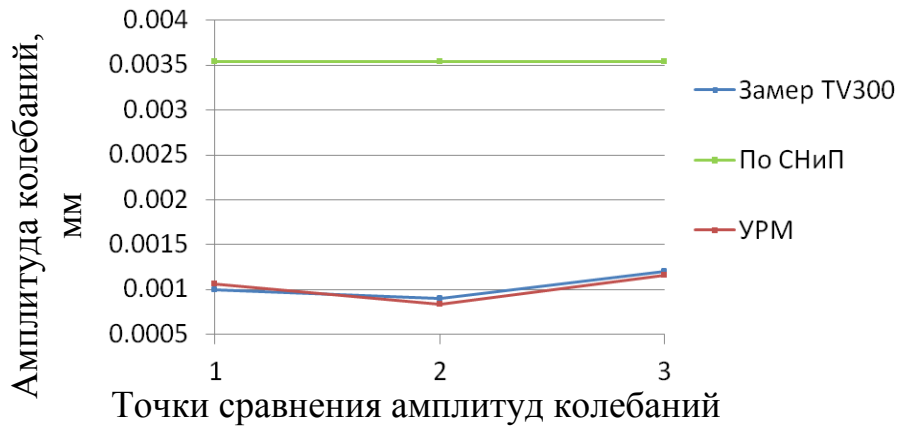
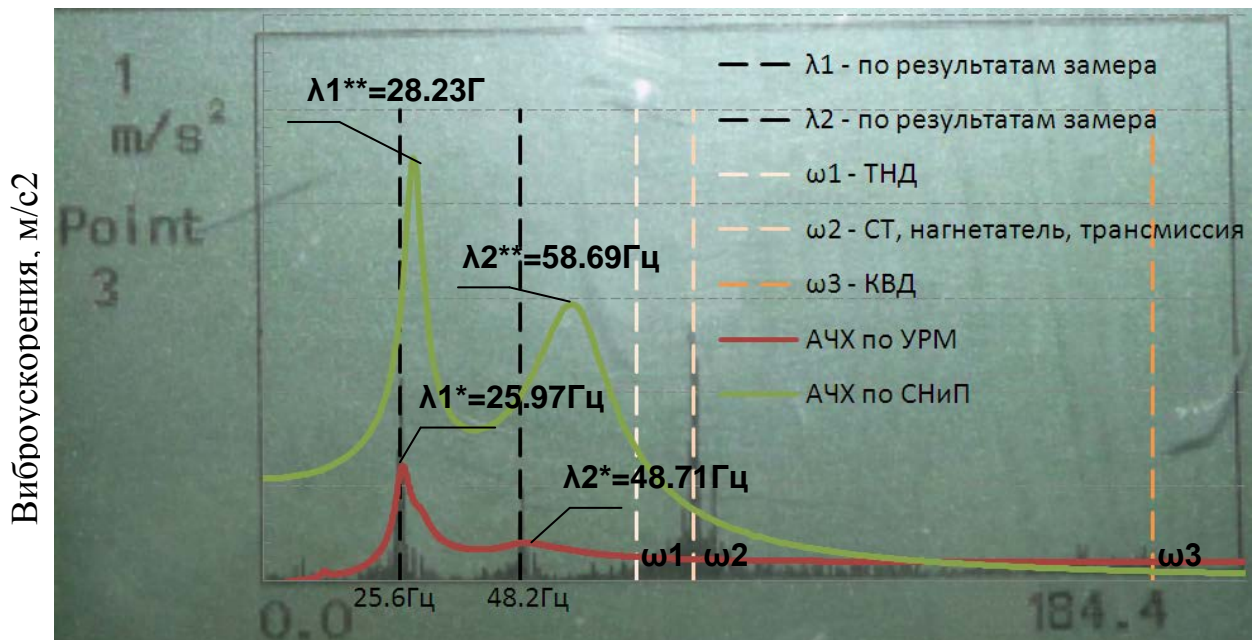


Рисунок 3.7 - Сравнение вычисленных и измеренных амплитуд колебаний

На рисунке 3.8 представлены результаты измерения колебаний в точке №3 в виде спектрального распределения интенсивности ускорений.



Спектр частот по результатам замера, Гц

Рисунок 3.8 - Наложение спектральной диаграммы и графиков амплитуд колебаний, вычисленных по [70] и по УРМ

На графике спектральной диаграммы отмечены значения измеренных ускорений, соответствующие частотам собственных колебаний  $\lambda_1=28.23\text{Гц}$ ,  $\lambda_2=48,2\text{Гц}$ , и частоты, соответствующие номинальной скорости 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 [70].

### 3.5 Выводы

В Главе 3 выполнен эксперимент по сравнению измеренных амплитуд колебаний в трех точках под рамой газотурбинного двигателя и компрессора с результатами расчетов, выполненных по методике усовершенствованной расчетной модели и по [70].

Результаты эксперимента показывают, что допущения строительных норм о том, что не учитывается влияние массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики фундамента, параметр демпфирования не зависит от грунтовых условий, не учитывается частота вращения, остаточный дисбаланс роторов и полипериодический характер воздействия динамических нагрузок, могут приводить к следующим последствиям:

- несовпадение «первой и второй собственной частоты колебаний» фундамента вычисленных по [70] с результатами измерений составляет 10,23% и 21,76% соответственно, одна из причин несовпадения из-за того, что при вычислении амплитудно-частотных характеристик системы фундамент-ГПА не учитывается влияние массы грунтов;

- амплитуды колебаний, вычисленные по [70], превышают измеренные значения в 3,54, 3,93 и 2,95 раз соответственно в точках замера вибраций №1, 2, 3.

Вычисленная по строительным нормам амплитуда колебаний фундамента при минимальных частотах вращения роторов ГПА - больше, а при максимальных - меньше амплитуд колебаний вычисленных в усовершенствованной расчетной модели, так как нормативная динамическая нагрузка по методике [70] не зависит от частоты вращения роторов.

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.

## **ГЛАВА 4. Практическое применение усовершенствованной расчетной модели на примере ГПА мощностью 25МВт на ГП-2 Бованенковского НГКМ**

### **4.1 Рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА**

Введенный в действие с 01.06.2010 г. Федеральный закон (ФЗ) №384 устанавливает в обязательной форме требования к сооружениям, реализация и соблюдение которых должны обеспечивать безопасность сооружений. Одним из основных требований ФЗ №384, предъявляемых к инженерным сооружениям является обеспечение механической безопасности, статья 3 часть 6. Механическая безопасность определена ФЗ №384 как «состояние грунтовых оснований зданий и сооружений, строительных конструкций при котором отсутствует риск, связанный с причинением вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, окружающей среде вследствие разрушения или потери устойчивости строительного сооружения или его части» статья 2 часть 8.

Статья 16 ФЗ №384 регламентирует, что выполнение требований механической безопасности должно быть обеспечено расчетами, подтверждающими, что в процессе строительства и эксплуатации сооружения его строительная конструкция не достигнет предельного состояния по прочности и устойчивости. Часть 6 статьи 16 регламентирует учет аварийной расчетной ситуации, имеющую малую вероятность возникновения, но большую важность с точки зрения последствий достижения предельных состояний.

Разработаны рекомендации по обеспечению нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА и требований статьи 16 ФЗ №384 к «механической безопасности» в части расчета амплитудно-частотных характеристик фундамента, включающие:

- сценарии расчетных аварийных ситуаций;
- нагрузки соответствующие сценариям расчетных аварийных ситуаций;

- предельные допустимые деформации фундамента в точках крепления технологического оборудования;
- предельные допустимые 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 вибрационных динамических нагрузок.

Предельное состояние строительных конструкций, расчетная ситуация, авария и нормальные условия эксплуатации определяются ФЗ №384 как:

Предельное состояние строительных конструкций - состояние строительных конструкций здания или сооружения, за пределами которого дальнейшая эксплуатация здания или сооружения опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния здания или сооружения невозможно или нецелесообразно;

Расчетная ситуация - учитываемый в расчете комплекс возможных условий, определяющих расчетные требования к строительным конструкциям, системам инженерно-технического обеспечения и частям указанных конструкций и систем;

Авария - опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей и приводящее к разрушению или повреждению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, нанесению ущерба окружающей среде;

Нормальные условия эксплуатации - учтенное при проектировании состояние здания или сооружения, при котором отсутствуют какие-либо факторы, препятствующие осуществлению функциональных или технологических процессов.

Для выполнения требований ФЗ №384 необходимо подтвердить расчетом, что конструкция фундамента ГПА удовлетворяет требованиям к механической безопасности. Для выполнения подобного расчета необходимо разобрать расчетные сценарии возможных аварийных ситуаций.

По опыту эксплуатации фундаментов ГПА [16] на ДКС-6 Медвежьего месторождения в середине 80-х годов прошлого века неоднократно останавливались ГПА для ремонта турбин и выравнивания опор газовых обвязок. Причины появления аварийных ситуаций приводящих к остановке оборудования можно разделить на две основные группы:

- деформации фундамента ГПА из-за изменения температур мерзлых грунтов, снижения или потери несущей способности части свай в составе ростверка;
- вибрации роторов ГПА из-за разбалансировки роторов которая в свою очередь вызвана разцентровкой привода компрессора.

Для учета требований части 6 статьи 16 ФЗ №384 которая регламентирует учет расчетных аварийных ситуаций, и на основании опыта эксплуатации ГПА [16], автором научной работы разработаны основные группы расчетных сценариев:

1. Снижение несущей способности грунтов.
2. Потеря несущей способности части свай.
3. Вибрации роторов ГПА.
4. Прочие аварийные ситуации, непредусмотренные в группах расчетных сценариев №1,2,3.

На сегодняшний день действующие строительные нормы не регламентируют предельно допустимые деформации фундаментов ГПА. Из опыта эксплуатации объектов газового комплекса на ДКС-6 Медвежьего месторождения в [16] приводятся показатели оценки деформационных явлений фундаментов ГПА где деформация от 0 до 5 мм считается допустимой, а деформация фундамента от 5 до 10 мм требует мер по выравниванию опор наружных газовых обвязок, деформация выше 10мм недопустима для нормальной эксплуатации ГПА. Вместе с тем нужно отметить, что в СТО Газпром 2-2.1-435-2010 даются рекомендации о предельных деформациях оснований фундаментов ГПА которые не должны превышать 10мм. На основании опыта эксплуатации фундаментов ГПА [16] и положений СТО Газпром 2-2.1-435-2010, для выполнения подтверждающих расчетов о выполнении требований «механической безопасности» (статья 16

ФЗ№384) и обеспечения нормальных условий эксплуатации фундаментов под ГПА предельная деформация фундамента ГПА – 10 мм рекомендуется в качестве допустимого предельного значения и рекомендуется для внесения в строительные нормы и правила.

Разработаны рекомендации для обеспечения нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА и выполнения требований «механической безопасности» ФЗ№ 384, таблица 4.1.

Таблица 4.1

Рекомендации для обеспечения нормальных условий эксплуатации фундаментов ГПА 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. 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 амплитуда 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	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

контактирующей с грунтовым основанием	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 (АС) №3 учитывается дополнительная аварийная нагрузка, которая представляет собой центробежную силу от дисбаланса ротора вылетевшей лопатки  $U_d$ . Суммарная динамическая нагрузка определяется по формуле

$$F = U_{per} \omega^2 k_{п} + U_{per} \omega^2 k_{ac}, \quad (4.1)$$

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. В виду постоянного воздействия динамических 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 динамических нагрузок, рекомендуется ограничение

ускорений  $a_{\phi}$  колебаний поверхности фундамента ГПА, контактирующей с грунтовым основанием

$$a_{\phi} \leq a_{кр}. \quad (4.2)$$

#### 4.2 Показатели массивных фундаментов ГПА

По рекомендациям [70] расчет вертикальных и горизонтальных колебаний массивных фундаментов ГПА в твердомерзлых грунтах, производить не следует, весте с тем нет показателей, по которым фундамент ГПА возможно однозначно отнести к массивному или не массивному типу. Для решения этой задачи предложен условный показатель массивного типа фундамента.

Показателем по которому фундамент возможно условно отнести к массивному или не массивному типу зависит от соотношения минимальной частоты воздействия периодической нагрузки на фундамент ГПА  $\omega_{\min}$  и частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda$ . Так в одном случае, фундамент с частотой собственных колебаний например  $\lambda = 367$  1/с при установке на него ГПА10 «Урал» с минимальной рабочей частотой вращения роторов  $\omega_{\min} = 660$  1/с относится к условному массивному типу, а в другом случае для ГПА32 «Ладога» где минимальная рабочая частота вращения роторов 367 1/с фундамент не относится к условному массивному типу, так как в этом случае частота вынужденных колебаний меньше  $\omega^*$  - «верхней границы диапозона частот условно повышенных амплитуд колебаний».

Верхней границе диапозона частот условно повышенных амплитуд колебаний соответствует частота  $\omega^*$ . График функции амплитуд колебаний  $A(\omega)$  при  $\omega > \omega^*$  условно имеет пологую форму при значении тангенса угла наклона касательной составляющем 10% и менее от максимального значения в диапозоне частот  $\lambda_2 \dots \omega_{\min}$ . У условно массивного типа фундамента минимальная эксплуатационная частота вращения роторов находится выше верхней границы  $\omega^*$  диапозона частот повышенных амплитуд колебаний. Рекомендуется считать фундамент условно массивным при выполнении условия

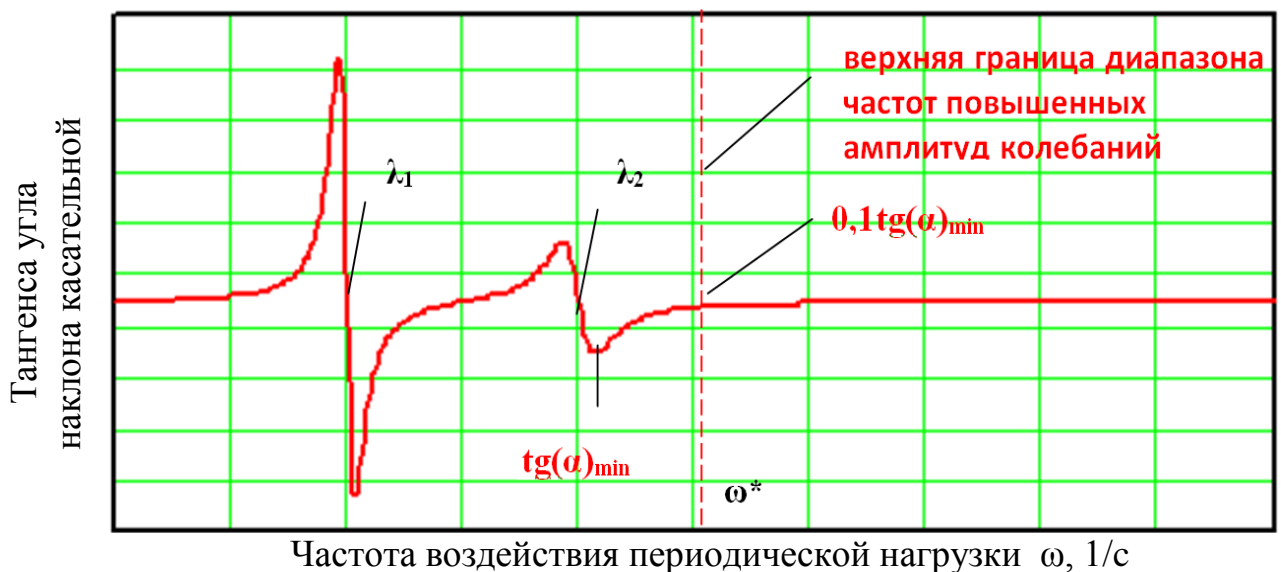


$$\omega^*/\omega_{\min} \leq 1, \quad (4.3)$$

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  $0,1 \operatorname{tg}(\alpha)_{\min}$  в диапазоне частот  $\lambda_2 < \omega < \omega_{\min}$ ;  
 $\operatorname{tg}(\alpha)_{\min} = \left( \frac{\partial}{\partial \omega} A(\omega) \right)_{\min}$  – минимальное значение тангенса угла  $\alpha$  касательной (рисунок 4.1) 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.



А. График зависимости амплитуд колебаний фундамента от частоты воздействия периодической нагрузки



Б. Тангенс угла наклона касательной к графику функции амплитуд колебаний

Рисунок 4.1 - Схема для определения массивного типа фундамента

На примере условного свайного фундамента под ГПА в состав которого входят 52 сваи из труб диаметром 426мм с толщиной стенки 9мм из стали 09Г2С, для трех вариантов грунтового основания с модулем упругости грунтов 4000МПа, 400МПа и 40МПа которым соответствует коэффициент жесткости фундамента в горизонтальной плоскости  $9,14 \cdot 10^9$ ,  $3,94 \cdot 10^9$ ,  $1,45 \cdot 10^9$  Н/м выполнен расчет показателя  $\omega^*$  условного массивного типа фундамента, которому соответствует значение  $0,1tg(\alpha)_{min}$  рисунок 4,1. В таблице 4.2 приведены результаты расчета показателя  $\omega^*$  в зависимости от жесткости и массы фундамента.

Таблица 4.2

Показатели массивного фундамента

Вариант грунтового основания	Коэффициент жесткости фундамента, Н/м	Показатель условного массивного типа фундамента $\omega^*$ , 1/с								
		Масса надземной части фундамента, т								
		50	100	200	400	600	800	1000	1500	2000
1	$9,14 \cdot 10^9$	1390	984	696	486	402	348	311	254	220
2	$3,94 \cdot 10^9$	860	640	450	320	260	226	202	165	143
3	$1,45 \cdot 10^9$	492	348	246	174	142	123	110	90	78

На рисунке 4.2 приведены графики зависимости показателя  $\omega^*$  от массы надземной части фундамента для трех вариантов фундаментов с коэффициентами жесткости  $9,14 \cdot 10^9$ ,  $3,94 \cdot 10^9$  и  $1,45 \cdot 10^9$  Н/м.

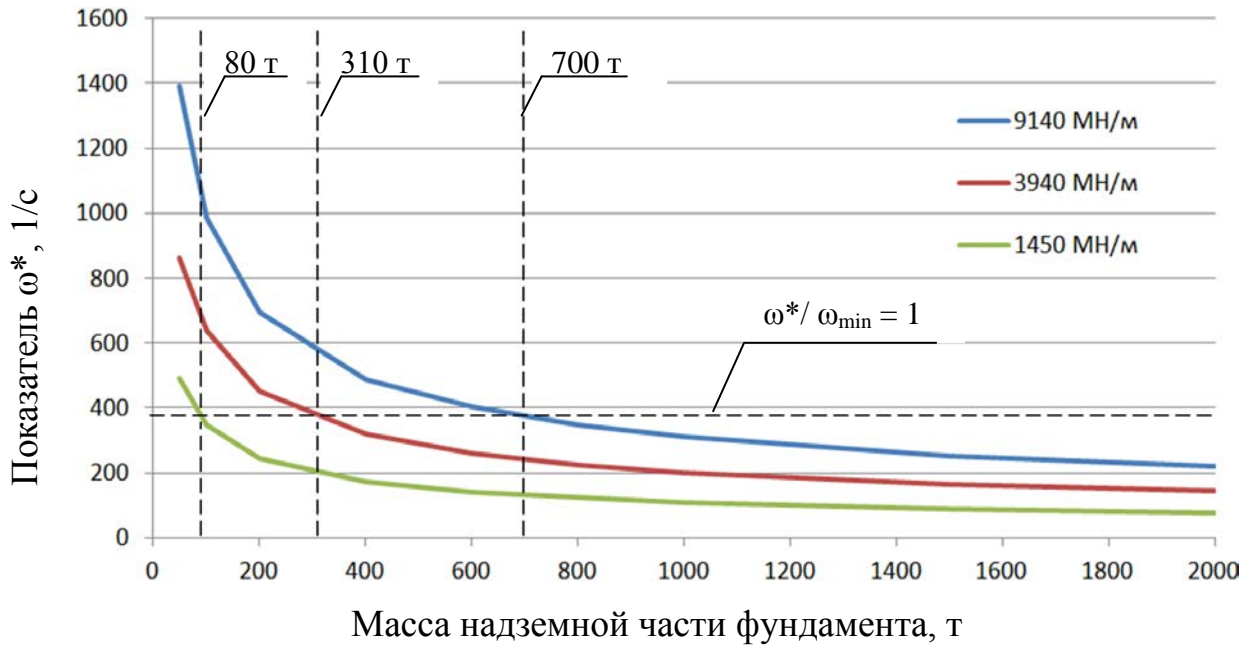


Рисунок 4.2 - Графики зависимость показателя  $\omega^*$  от жесткости и массы фундамента

На рисунке 4.3 приведена двух параметрическая функция зависимости показателя  $\omega^*$  от жесткости и массы надземной части фундамента ГПА. По результатам выполненных расчетов приведенных в таблице 4.3 и на рисунках 4.2, 4.3 видно, что показатель  $\omega^*$  зависит от численного значения параметров жесткости и массы фундамента.

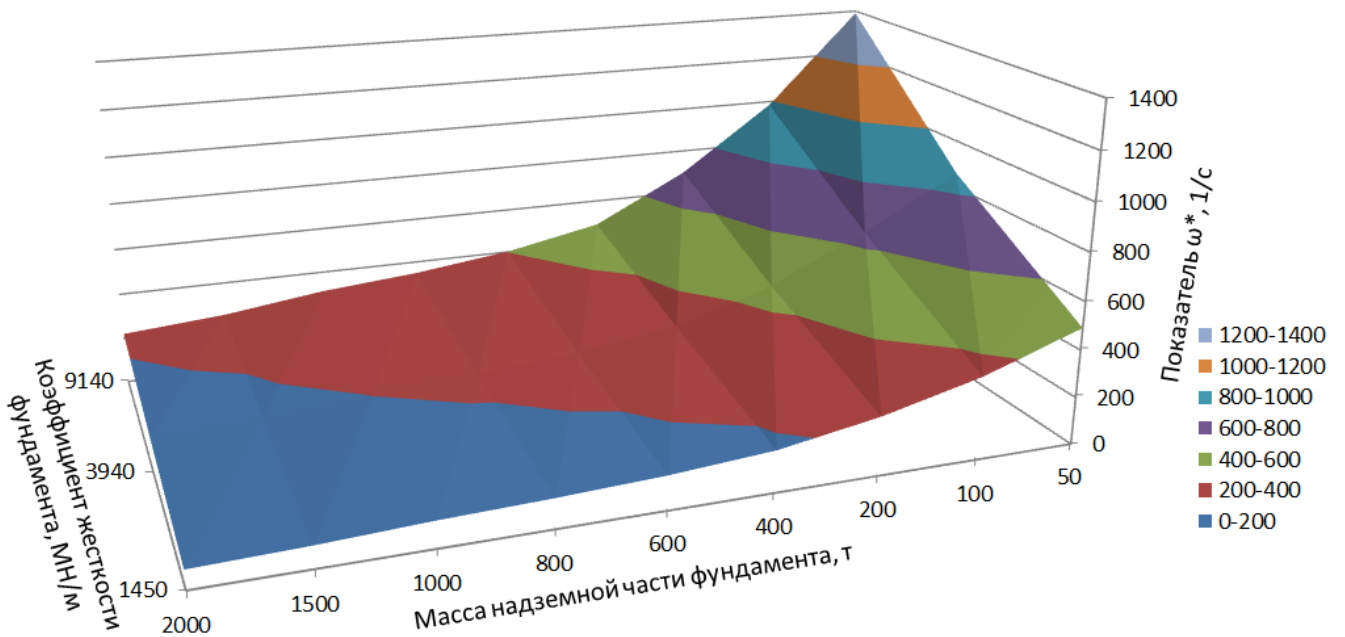


Рисунок 4.3 - Двух параметрическая функция зависимость показателя  $\omega^*$  от жесткости и массы надземной части фундамента

Так при размещении ГПА32 «Ладога» на фундаменте с коэффициентом жесткости  $9,14 \cdot 10^9 \text{Н/м}$  условие  $\omega^* / \omega_{\min} \geq 1$  выполняется и фундамент относится к массивному типу когда его масса больше или равна 700 т. При размещении агрегата на фундаменте с коэффициентом жесткости  $1,45 \cdot 10^9 \text{Н/м}$  условие  $\omega^* / \omega_{\min} \geq 1$  выполняется при массе фундамента составляющей 80 т и более. На этом примере видно, что показатель массивного фундамент зависит от жесткости и массы фундаментной конструкции, а параметр жесткости в свою очередь зависит от фактических грунтовых условий, конструкции и нагрузок воздействующих на фундамент.

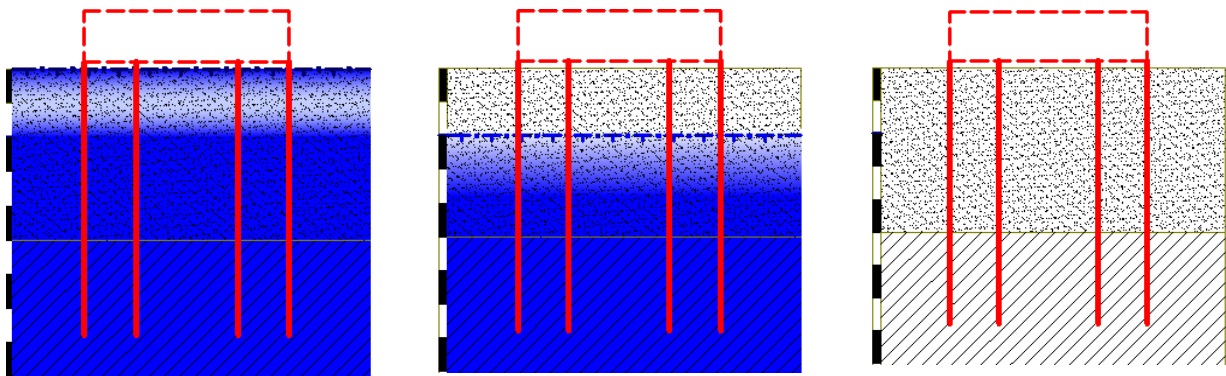
Так как мерзлые грунты в сравнении с талыми обладают сравнительно более высоким модулем упругости, то показатель  $\omega^* / \omega_{\min}$  в зимнее время при промерзании сезонно мерзлых грунтов выше показателя  $\omega^* / \omega_{\min}$  в летнее время года при оттаивании верхнего слоя грунтов. По этому, по результатам проделанного вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что для определения типа фундамента целесообразно вычислять показатель  $\omega^* / \omega_{\min}$  соответствующий максимальной прогнозируемой жесткости фундамента в течении всего срока эксплуатации.

#### **4.3 Практическое применение усовершенствованной расчетной модели**

Усовершенствованная расчетная модель позволяет снизить затраты на строительство фундаментов ГПА с обеспечением нормальных условий эксплуатации в грунтовых условиях Ямала и Восточной Сибири.

Выполнено моделирование амплитудно-частотных характеристик на примере фундамента ГПА мощностью 25 МВт на ГП2 Бованенковского НГКМ. Получены результаты расчета амплитуд колебаний фундамента от воздействия динамических нагрузок, соответствующих нормальным условиям эксплуатации и

с учетом сценариев расчетных аварийных ситуаций, на примере трех вариантов грунтовых условий, рисунок 4.4.



А. Вариант №1

Б. Вариант №2

В. Вариант №3

Рисунок 4.4 - Варианты грунтовых условий

Ниже приведено описание вариантов грунтовых условий:

**Вариант №1.** Время года – зима. Площадка сложена мерзлыми насыпными песками толщиной 5м и коренными вечномерзлыми суглинками, грунты находятся в твердомерзлом состоянии. Коэффициент жесткости фундамента в горизонтальной плоскости  $K=9,14 \cdot 10^9 \text{Н/м}$ .

**Вариант №2.** Время года – лето. До глубины 2м грунты находятся в талом состоянии, температуры грунтов приведены на рисунке 4.5. Коэффициент жесткости фундамента в горизонтальной плоскости  $K=1,45 \cdot 10^9 \text{Н/м}$ .

**Вариант №3.** Площадка сложена талыми насыпными уплотненными песками мощностью 5м, ниже талыми суглинками текучими, с показателем текучести  $IL=0.75$ . Коэффициент жесткости фундамента в горизонтальной плоскости  $K=1,41 \cdot 10^9 \text{Н/м}$ .

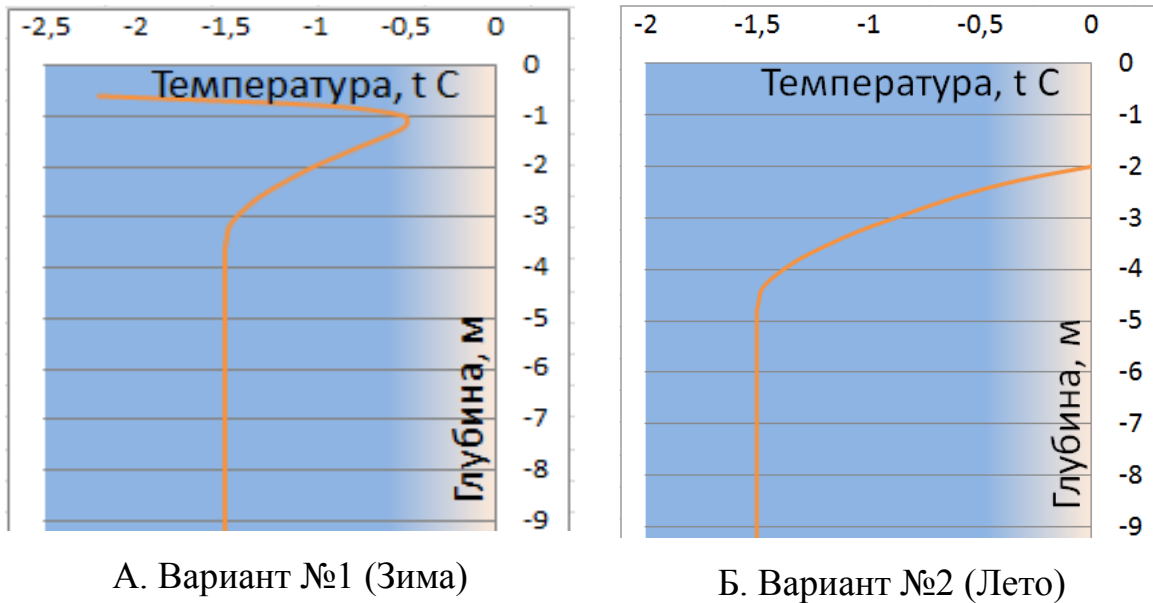


Рисунок 4.5 - Температуры грунтов

Нормальному условию эксплуатации фундамента соответствуют два варианта грунтовых условий №1 и №2 соответствующие холодному и теплomu времени года. Холодному времени года соответствуют грунты слоя СТС в твердомерзлом состоянии, обладающие максимальной жесткостью в течении года. Теплomu времени года соответствуют грунты слоя СТС в талом состоянии обладающие минимальной жесткостью в течении года.

Для учета аварийных условий эксплуатации ГПА в соответствии с рекомендациями по таблице 4.1 и требованиями ФЗ №384 к «механической безопасности» рассмотрено три расчетных сценария аварийных ситуаций:

- №1 – переход грунтов из твердомерзлого состояния в пластично мерзлое состояние, этой аварийной ситуации соответствуют грунтовые условия №3;
- №2 – потеря несущей способности 10% свай, грунтовые условия №2;
- №3 – аварийные динамические нагрузки из-за разбалансировки роторов, грунтовые условия №2.

Характеристики грунтов для грунтовых условий №1...3 представлены в таблицах 4.3, 4.4.

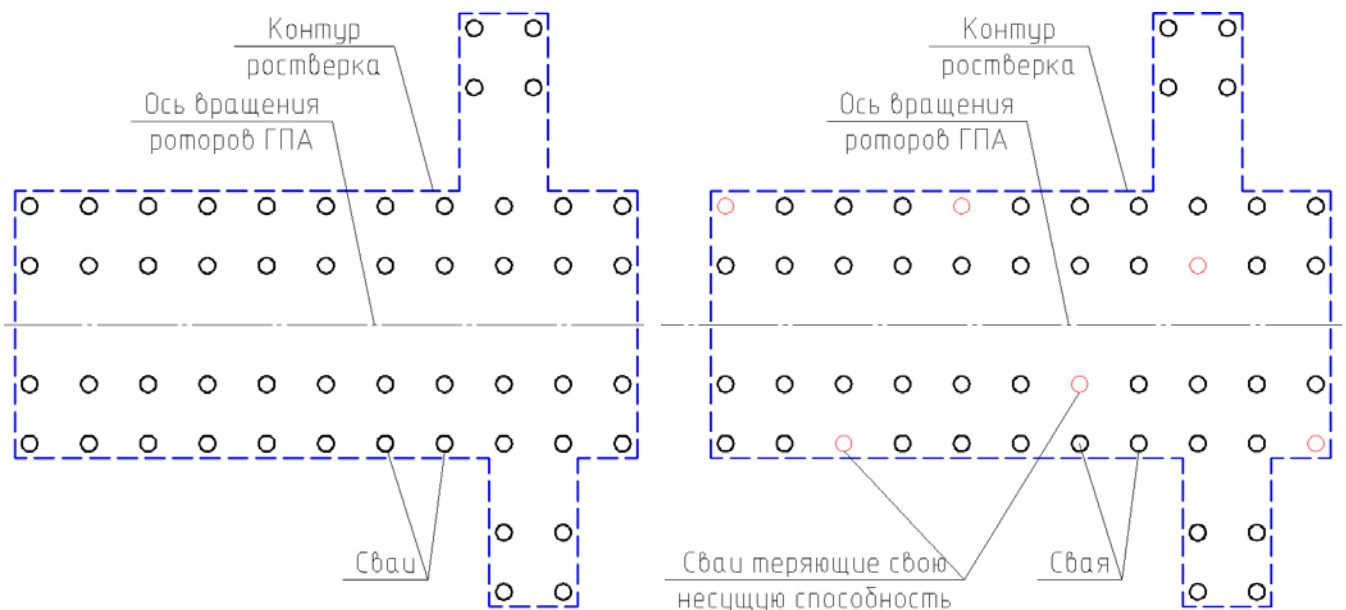
Характеристики грунтовых условий № 1...4

№ Слоя	Глубина, м	Вариант грунтовых условий		
		Вариант ГУ№1	Вариант ГУ№2	Вариант ГУ№3
1	0...2	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, в твердомерзлом состоянии. E=4080...1125МПа, Ф=0.0004...0.0008 с, P=17,8 кН/м <sup>3</sup> , φ=12	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, талые E=50МПа, Ф=0.0016 с, P=17,8 кН/м <sup>3</sup> φ=12	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, талые E=50МПа Ф=0.0016 с, P=17,5 кН/м <sup>3</sup> φ=12
2	2...5	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, в твердомерзлом состоянии E=1125...2250МПа, Ф=0.0008...0,0006 с, P=18,8 кН/м <sup>3</sup> φ=14	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, в пластично мерзлом состоянии E=375...2160МПа, Ф=0.0010...0,0006 с, P=18,8 кН/м <sup>3</sup> φ=14	Пески средней крупности, насыпные уплотненные, талые E=50МПа, Ф=0.0016 с, P=18,2 кН/м <sup>3</sup> φ=14
3	5...7	Суглинки в твердомерзлом состоянии E=2250МПа, Ф=0.0006 с, P=17,8кН/м <sup>3</sup> φ=14	Суглинки в твердомерзлом состоянии E=2160...2250МПа, Ф=0.0006 с, P=17,8кН/м <sup>3</sup> φ=14	Суглинки текучие, талые IL=0.75. E=50МПа, Ф=0.0016 с, P=19,6кН/м <sup>3</sup> φ=10
4	7...14	Суглинки в твердомерзлом состоянии E=2250МПа, Ф=0.0006 с, P=17,8 кН/м <sup>3</sup> φ=14	Суглинки в твердомерзлом состоянии E=2250МПа, Ф=0.0006 с, P=17,8 кН/м <sup>3</sup> φ=14	Суглинки текучие, талые IL=0.75. E=50МПа, Ф=0.0016 с, P=19,6 кН/м <sup>3</sup> φ=10

## Характеристики грунтов по глубине

Глубина	Модули упругости грунтов в зависимости от варианта грунтовых условий, МПа					
	Вариант №1		Вариант №2		Вариант №3	
	Е, МПа	Ф, с	Е, МПа	Ф, с	Е, МПа	Ф, с
-0,5	4 080	0,0004	50 (талые)	0,0016	50 (талые)	0,0016
-1,5	1 125	0,0008				
-2,5	1 941	0,0007	375	0,001		
-3,5	2 241	0,0006	1 515	0,0007		
-4,5	2 250	0,0006	2 160	0,0006	50 (талые)	0,0016
-5,5...-14,5			2 250	0,0006		

На рисунке 4.6 приведена схема расположения свай в составе ростверка, схема расположения свай теряющие свою несущую способность по сценарию расчетной аварийной ситуации № 2.



А. Схема расположения свай в составе ростверка

Б. Схема расположения свай теряющие свою несущую способность по сценарию расчетной аварийной ситуации №2

Рисунок 4.6 - Схема расположения свай расчетной модели для нормальных условий эксплуатации и расчетной аварийной ситуации №2



Масса стального ростверка составляет 48т, масса свайного фундамента 48,1т. На фундамент установлен газотурбинный двигатель и компрессор, их массы составляют 10,5т и 15т соответственно, рисунок 4.7.

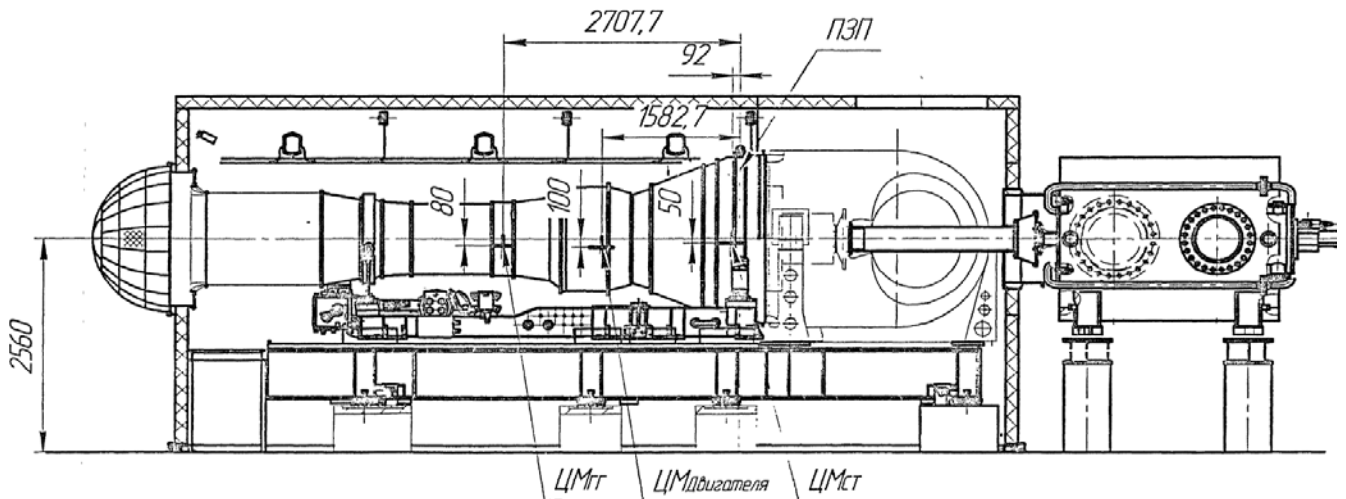


Рисунок 4.7 - Общая схема ГТУ и компрессора ГПА мощностью 25 МВт

По действующим строительным нормам предельно допустимая амплитуда колебаний фундамента ГПА от воздействия динамической нагрузки при частоте вращения роторов более 2000 об/мин - составляет 0,05мм. Необходимо отметить, что производители ГПА могут выдвигать более жесткие требования, например, в соответствии с технологическим заданием ОАО НПО «Искра», предельно допустимая амплитуда колебаний фундамента в зоне между газотурбинным двигателем и центробежным компрессором ( $L=3273\text{мм}$ ) не должна превышать 0,03мм.

#### 4.4 Влияние массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундамента

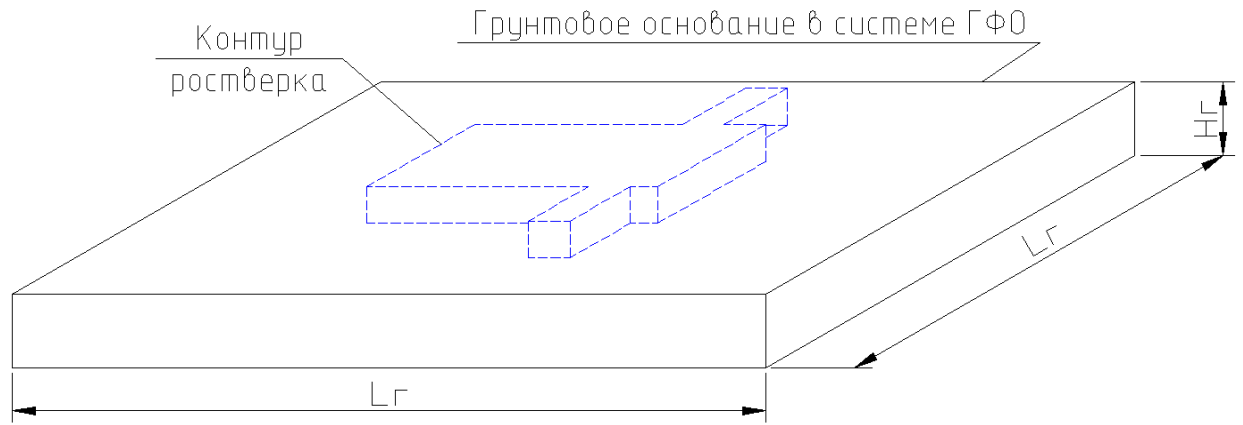
Теоретическое обоснование влияния массы грунтового основания на амплитудно-частотные характеристики фундаментов ГПА выполнено на примере трех вариантов грунтовых условий (ГУ). Получены расчетные значения первой частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda$ , без учета и с учетом влияния

массы грунтов. Область грунтового основания, в пределах которой учитывается влияние массы грунтов, ограничена размерами по глубине  $H_g$  и в плане  $L_g$ , рисунок 4.8 А, частоты собственных колебаний фундамента вычислены для различных размеров области грунтового основания в плане  $L_g \times L_g$  кратных ширине фундамента. В таблице 4.5 приведены результаты расчета первой частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda_n$  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. На рисунке 4.8, Б приведены графики зависимости первой частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda_1$  от размеров области грунтового основания  $L_g \times L_g$ , масса которой учитывается при вычислении собственных частот колебаний фундамента.

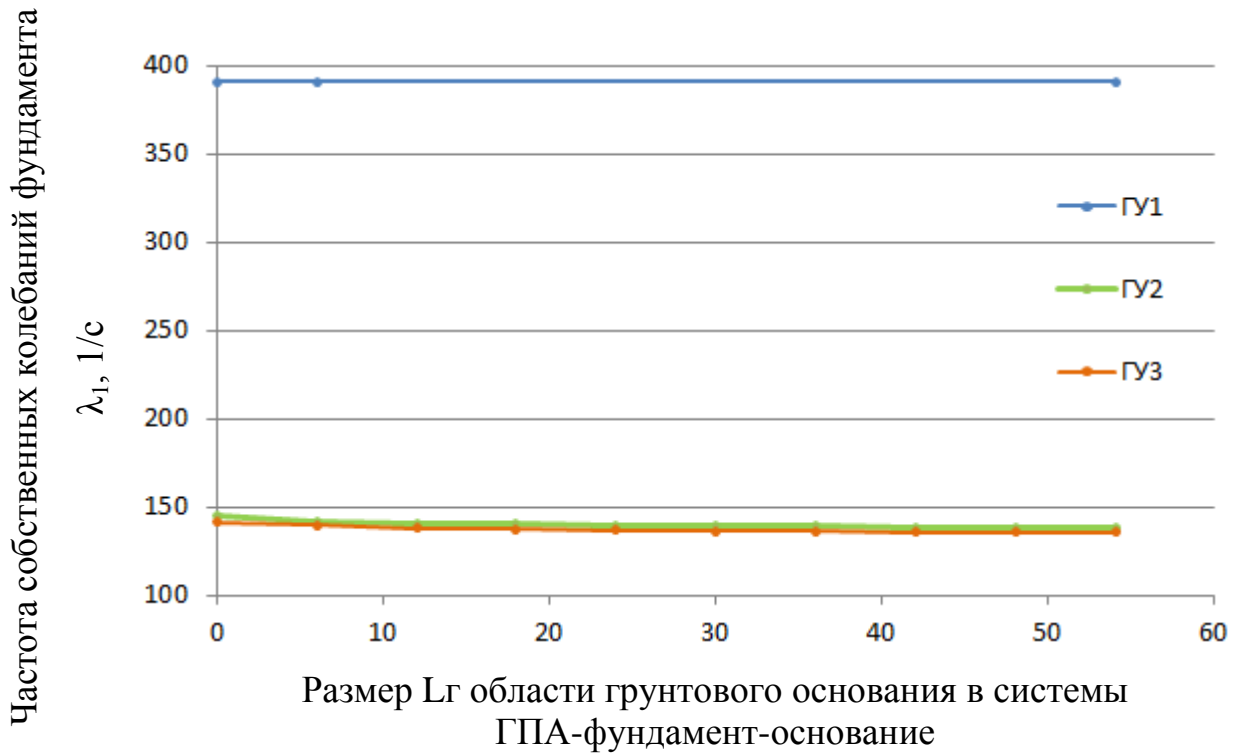
Таблица 4.5

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

Грунтовые условия		№1		№2		№3	
Жесткости фундамента		$9,14 \cdot 10^9 \text{Н/м}$		$1,45 \cdot 10^9 \text{Н/м}$		$1,41 \cdot 10^9 \text{Н/м}$	
$L_g \times L_g$ , м	Площадь, м <sup>2</sup>	$\lambda_n$ , 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
36x36	1296	-	-	139,93	0,68	137,17	0,69
48x48	2304	-	-	139,48	0,45	136,71	0,46
60x60	3600	-	-	139,13	0,35	136,35	0,36
72x72	5184	-	-	138,85	0,28	136,08	0,27
84x84	7056	-	-	138,62	0,23	135,82	0,26
96x96	9216	-	-	138,43	0,19	135,63	0,19
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%	



А. Область грунтового основания  $L_Г \times L_Г \times H_Г$ , в пределах которой учитывается влияние массы грунтов на частоту собственных колебаний фундамента



Б. Графики зависимости частоты собственных колебаний фундамента от размеров области  $L_Г \times L_Г$  грунтового основания масса которой учитывается при вычислении собственных частот колебаний фундамента

Рисунок 4.8 - Схема расчетной модели и графики зависимости частоты собственных колебаний от размеров учитываемой области грунтового основания

Для трех вариантов грунтовых условий определены размеры области грунтового основания влияние массы которого на амплитудно-частотные характеристики фундамента учитывается при выполнении условия  $\Delta\lambda \leq \lambda_n \cdot k_{пт}$ , где

$k_{пт} = 0,001$  - коэффициент характеризующий приемлемую точность вычислений собственной частоты колебаний фундамента с учетом влияния массы грунтового основания. По результатам выполненных расчетов минимальное влияние массы грунтов на амплитудно-частотные характеристики фундамента оказывается в варианте грунтовых условий №1 где грунты находятся в твердомерзлом состоянии, максимальное влияние массы грунтов в вариантах грунтовых условий №2,3. В таблице 4.6 приведены размеры области грунтового основания, влияние массы которого достаточно учитывать при выполнении условия  $\Delta\lambda \leq \lambda_n \cdot k_{пт}$ .

Таблица 4.6

Размеры области грунтового основания, влияние массы которого учитывается при вычислении амплитудно-частотных характеристик фундамента

Параметр	Варианты грунтовых условий		
	1	2	3
Границы грунтового основания по глубине Нг, м	2.696	3.37	3.57
Расчетное значение параметра Lг, м	12×12	108×108	108×108
Площадь грунтового основания, м <sup>2</sup>	144	11664	11664
Объем грунтового основания, м <sup>3</sup>	97,06	39307	41640,5

Общее сопротивление упругим колебаниям в системе ГПА-фундамент-основание определяется как сумма  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  внутреннего сопротивления материала конструкции фундамента  $\gamma_1$  и сопротивления внешней среды  $\gamma_2$ . Параметр внутреннего сопротивления упругим колебаниям стальной конструкции фундамента  $\gamma_1 = 0,02$ . В таблице 4.7 приводятся значения модуля затухания колебаний грунтов до глубины Нг для трех вариантов грунтовых условий.

Таблица 4.7

Модуль затухания колебаний грунтового основания до глубины Нг

Номер слоя	Вариант ГУ №1		Вариант ГУ №2		Вариант ГУ №3	
	Ф, с	h, м	Ф, с	h, м	Ф, с	h, м
Слой №1	0,0006	2	0,0016	2	0,0016	2
Слой №2	0,0008	0,696	0,0008	1,37	0,0016	1,57
Ф <sub>го</sub>	0,00065		0,00125		0,0016	

Первая частота собственных колебаний  $\lambda_1$  фундаментов ГПА и сопротивление упругим колебаниям грунтового основания  $\gamma_r$  для трех вариантов грунтовых условий приведено в таблице 4.8.

Таблица 4.8 Сопротивление упругим колебаниям грунтового основания

Параметр	Варианты грунтовых условий		
	№1	№2	№3
Частота собственных колебаний фундамента $\lambda_1$ , 1/с	390,79	138,31	135,51
Сопротивление упругим колебаниям грунтового основания $\gamma_r$	0,254	0,173	0,217

Для определения параметра сопротивления упругим колебаниям внешней среды  $\gamma_2$  вычислены площади поверхностей конструкции фундамента, контактирующие с внешней средой. В таблице 4.9 приведены площади поверхностей элементов конструкции фундамента до глубины Нг.

Таблица 4.9

Площади поверхностей элементов конструкции фундамента до глубины Нг

Параметр	Площади поверхностей надземной части фундамента, ростверка							Площадь поверхности сваи до глубины Нг		
	Стойки	Подкосы			Балки			ГУ №1	ГУ №2	ГУ №3
Профиль	20Ш1	2x16У	2x16У	2x16У	50Ш4	30Ш2	25Ш1	Ф426	Ф426	Ф426
Кол-во, шт	20	18	21	2	4	2	20	40	40	40
Длина, м	1	1,23	1,94	2	14,9	14,9	3	2,696	3,37	3,57
Периметр, м	0,8	0,6	0,6	0,6	2	1,2	1,1	1,34	1,34	1,34
Площадь, м <sup>2</sup>	16,0	13,3	24,4	2,4	119,2	35,8	66,0	144,5	180,6	191,4
Общая площадь, м <sup>2</sup>	277,1							144,5	180,6	191,4

В таблице 4.10 приведены площади контакта поверхностей конструкции фундамента с воздушной средой и грунтом для трех вариантов грунтовых условий, а так же коэффициенты  $k_a = A_a/A$ ,  $k_r = A_r/A$ , характеризующие

отношение общей площади поверхности конструкции фундамента  $A$  к площади контакта с воздушной средой  $A_a$  и грунтом  $A_r$ .

Таблица 4.10

Площади контакта  $A_a$ ,  $A_r$ , и коэффициенты  $k_a$ ,  $k_r$

Вариант ГУ	Наименование среды	Площадь поверхностей контакта для ГУ №1, 2, 3, м <sup>2</sup>			Коэффициенты $k_a$ , $k_r$
		Ростверк	Сваи	Площадь контакта, м	
1	Воздух	277,1	-	$A_a = 277,1$	$k_a=0,66$
	Грунт	-	144,5	$A_r = 144,5$	$k_r=0,34$
2	Воздух	277,1	-	$A_a = 277,1$	$k_a=0,61$
	Грунт	-	180,6	$A_r = 180,6$	$k_r=0,39$
3	Воздух	277,1	-	$A_a = 277,1$	$k_a=0,59$
	Грунт	-	191,4	$A_r = 191,4$	$k_r=0,41$

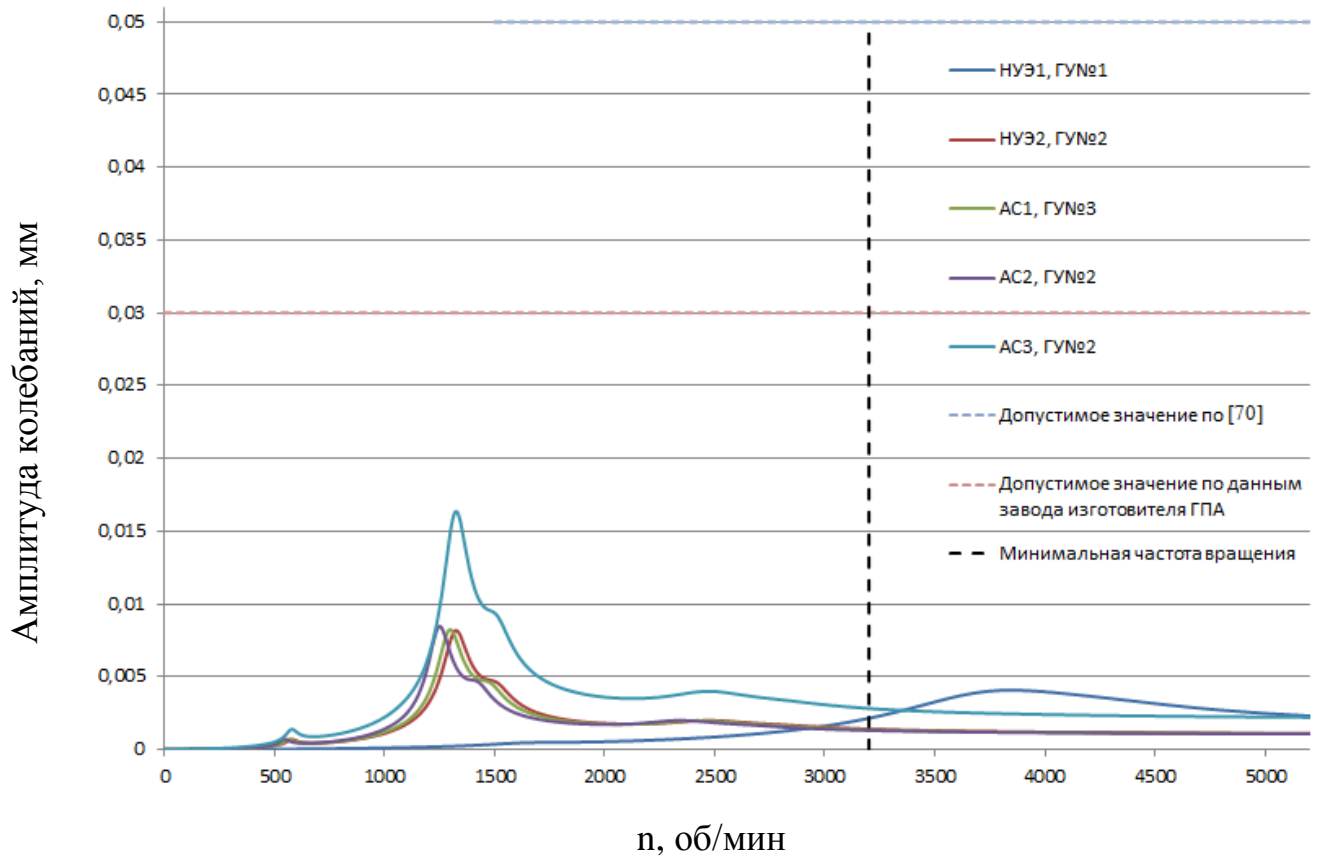
В таблице 4.11 приведены расчетные значения параметров внутреннего сопротивления упругим колебаниям  $\gamma_1$  фундамента, сопротивления колебаниям внешней среды  $\gamma_2$  и общее сопротивление системы ГПА-фундамент-основание  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  для трех вариантов грунтовых условий.

Таблица 4.11

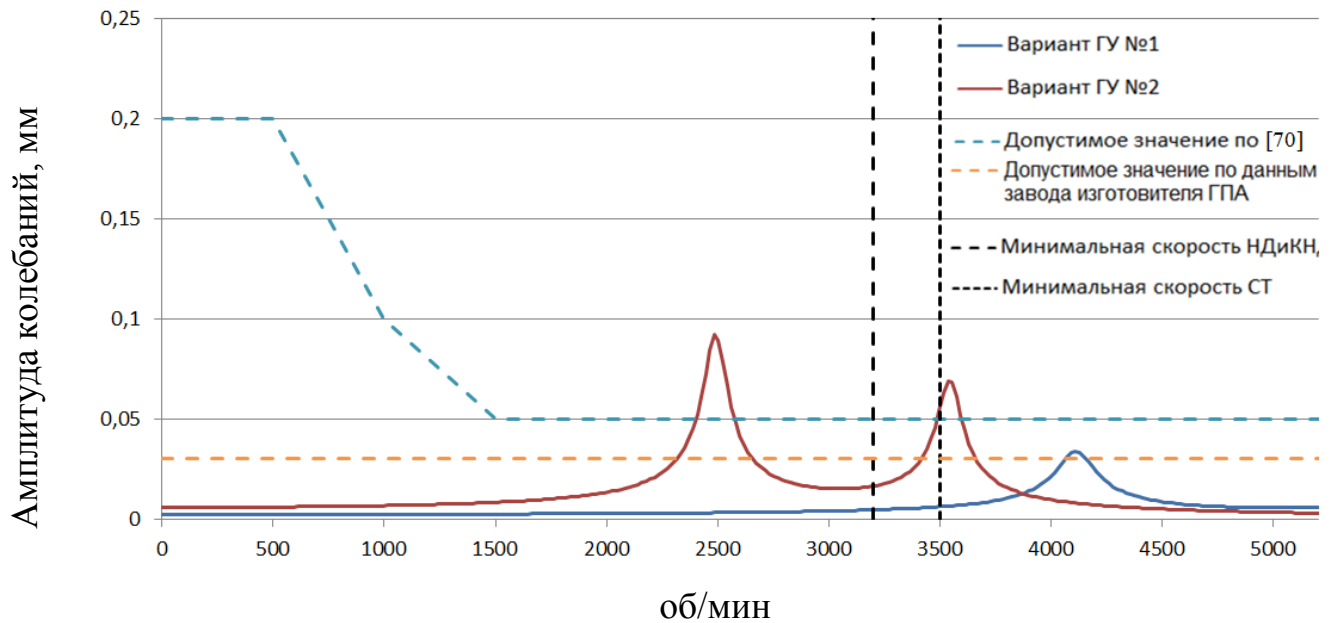
Сопротивление упругим колебаниям системы ГПА-фундамент-основание

Параметр	Вариант грунтовых условий		
	№1	№2	№3
Внутреннее сопротивление, $\gamma_1$	0,02	0,02	0,02
Сопротивление внешней среды, $\gamma_2 = \gamma_a \cdot k_a + \gamma_r \cdot k_r$	0,086	0,067	0,089
Общее сопротивление системы ГПА-фундамент-основание, $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$	0,106	0,087	0,109

На рисунке 4.9 приведены графики зависимости расчетных амплитуд колебаний фундамента ГПА от частот вращения роторов силовой турбины и нагнетателя, вычисленные по методикам усовершенствованной расчетной модели и строительных норм, для нормальных условий эксплуатации (НУЭ) и трех расчетных сценариев аварийных ситуаций. Необходимо отметить, что действующие строительные нормы не предусматривают расчетные аварийные ситуации.



А. Амплитуды колебаний легкого ростверка под рамой ГТУ, вычисленные по методике усовершенствованной расчетной модели.



Б. Амплитуды колебаний легкого ростверка под рамой ГТУ, вычисленных по методике строительных норм

Рисунок 4.9 - Сравнение расчетных амплитуд колебаний легкого ростверка

В таблице 4.12 приведены результаты сравнения собственных частот  $\lambda_1$  колебаний легкого фундамента ГПА, вычисленных по методикам усовершенствованной расчетной модели и [70] для нормальных условий эксплуатации и трех расчетных сценариев аварийных ситуаций.

Таблица 4.12

## Сравнение собственных частот колебаний фундамента

Условия эксплуатации фундамента	№ Варианта грунтовых условий, № сценария расчетной аварийной ситуации	По УРМ		По [70]	
		$\lambda_1$ , 1/с	Amax, мм	$\lambda_1$ , 1/с	Amax, 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	-	-

По методике усовершенствованной расчетной модели частоты собственных колебаний фундамента для рассмотренных вариантов грунтовых условий ниже рабочего диапазона частот вращения роторов. Амплитуды колебаний фундамента меньше допустимого 0,03мм по требованию завода изготовителя ГПА. Максимальная расчетная амплитуда колебаний по методике усовершенствованной расчетной модели - 0,01636мм, что составляет 54,5% от допустимого значения по данным завода изготовителя ГПА и соответствует расчетному сценарию аварийной ситуации № 3.

На рисунке 4.10 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 [90], [91]. Выполнена проверка ускорений частиц грунта, контактирующего с поверхностью фундамента, на предмет предупреждения дополнительных осадок от воздействия периодических нагрузок при нормальных условиях эксплуатации фундаментов ГПА. Максимальное 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  $a_{\phi}(\omega)=0,082\text{м/с}^2 < 0,15 \text{ м/с}^2$ , что меньше допустимого значения, воздействие динамических нагрузок не приводит к дополнительным осадкам и деформациям грунтового основания.

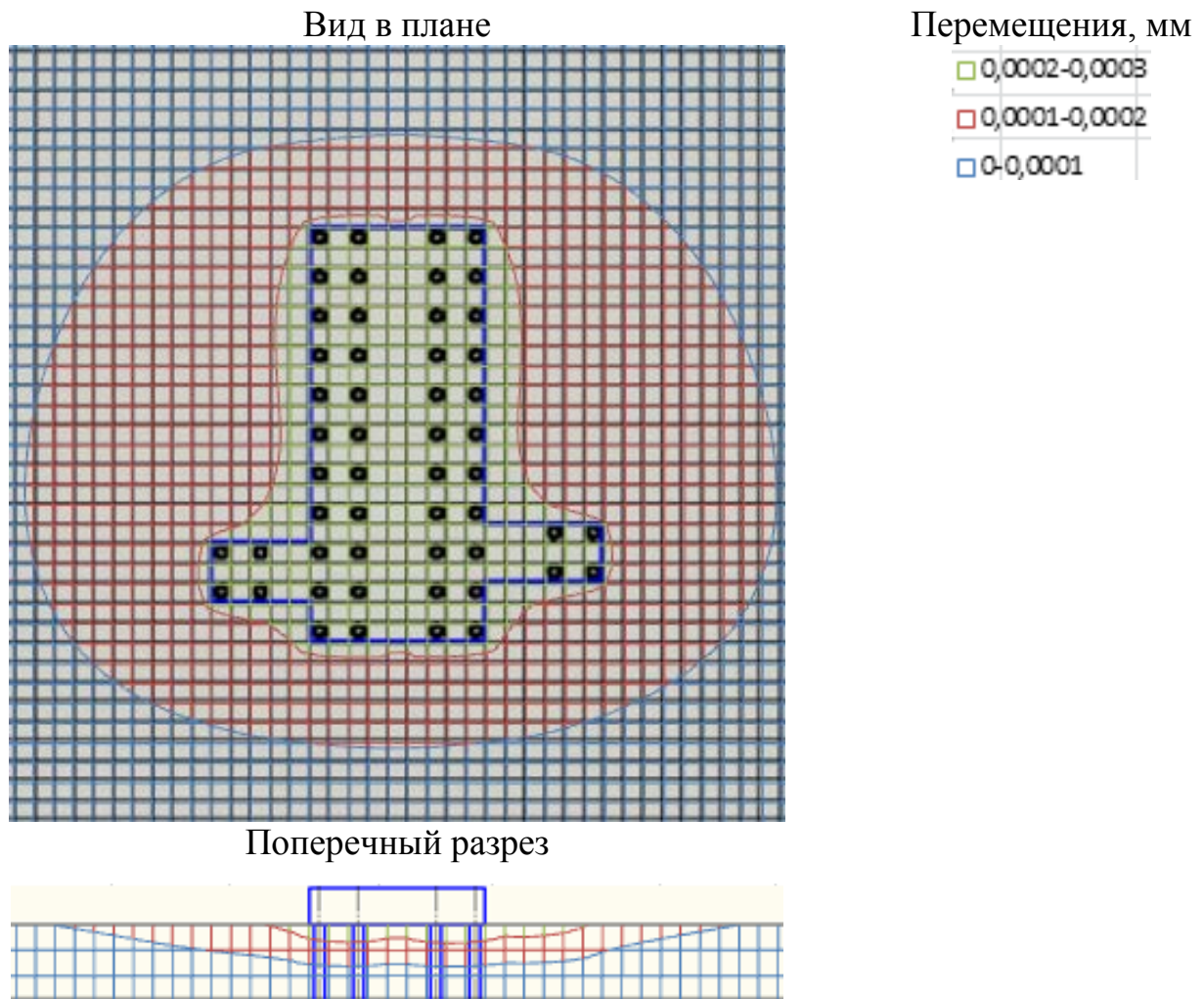
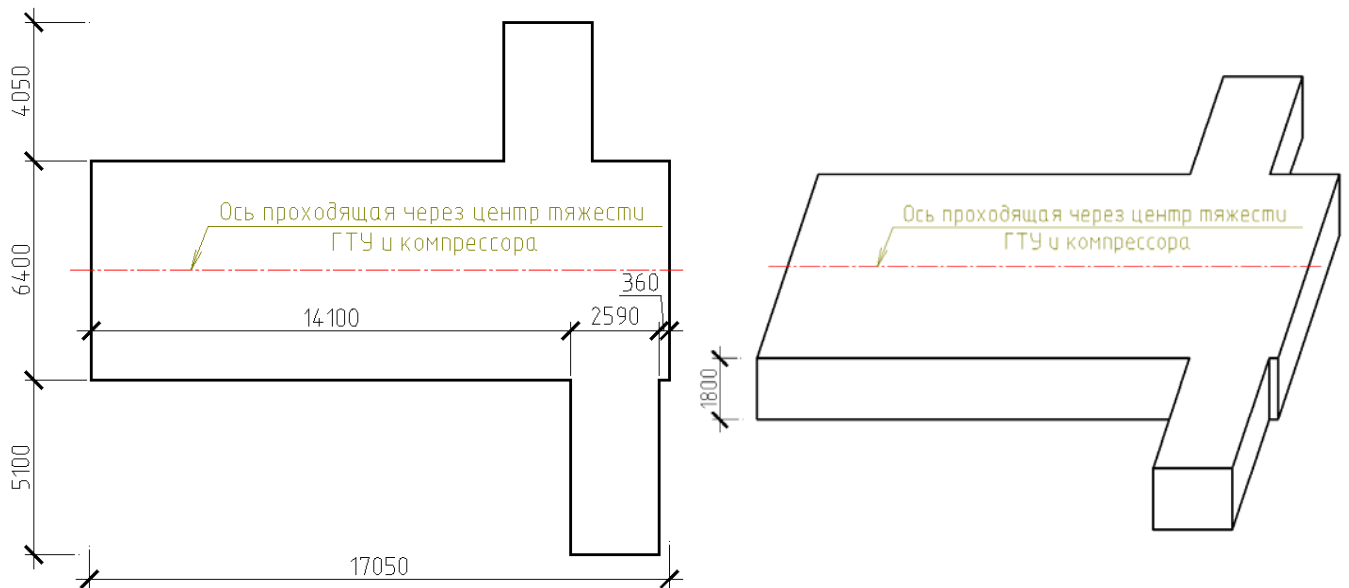


Рисунок 4.10 - Перемещения частиц грунтового основания от воздействия динамической нагрузки при частоте вращения роторов  $n_1=n_4=n_5=5000$  об/мин,  $n_2 = 4300$  об/мин,  $n_3 = 11670$  об/мин для грунтовых условий №2

По методике [70] в вариантах грунтовых условий №1, 2 собственные частоты колебаний фундамента совпадают с рабочими частотами вращения роторов ГПА. По строительным нормам в грунтовых условиях №2 максимальная амплитуда колебаний составляет  $0,09192\text{мм}$  и превышает допустимое значение  $0,03\text{мм}$  на  $206,4\%$ . В грунтовых условиях №1 максимальная амплитуда колебаний фундамента составляют  $0,03384\text{мм}$  и превышает допустимое значение на  $12,8\%$ . По методике [70] жесткости и массы рассматриваемого легкого фундамента не

достаточно для обеспечения требуемого уровня вибраций при нормальных условиях эксплуатации. В этом случае для снижения вибрации необходимо увеличение массы и применение массивного типа фундамента. Рассмотрена конструкция массивного фундамента ГПА, которая традиционно применяется в средней полосе страны. Габариты ростверка фундамента в плане 17,05 х 6,4м, высота железобетонного ростверка 1,8м, масса ростверка 600 т, рисунок 4.11.



А. Габариты фундамента в плане

Б. Общий вид фундамента

Рисунок 4.11 - Ростверк массивного железобетонного фундамента под ГПА

Результаты расчетов собственных частот  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и соответствующих им амплитуд  $A(\lambda_1)$ ,  $A(\lambda_2)$  колебаний фундамента по методике [70] для вариантов грунтовых условий №1 и №2 приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13

Результаты расчетов собственных частот  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и амплитуд  $A(\lambda_1)$ ,  $A(\lambda_2)$  колебаний массивного фундамента под ГПА по [70]

№ Варианта ГУ	$\lambda_1$ , 1/с	$A(\lambda_1)$ , мм	$\lambda_2$ , 1/с	$A(\lambda_2)$ , мм
1	89,6	0,007	127,5	0,007
2	54,3	0,019	77,2	0,02

Частоты собственных колебаний массивного фундамента, вычисленные по строительным нормам для всех вариантов грунтовых условий ниже рабочего

диапазона частот вращения роторов ГПА. Амплитуды колебаний меньше допустимого значения. Недостатком таких фундаментов является высокая материалоемкость.

Так как масса ростверка рассмотренного массивного фундамента превышает массу легкого в 39 раз, при возведении массивных фундаментов под ГПА необходимо учитывать осадку фундамента от собственного веса. В таблице 4.14 приведено сравнение расчетных осадок легкого и массивного фундамента под ГПА для вариантов грунтовых условий №1...№3.

Таблица 4.14

Сравнение осадок легкого и массивного фундамента под ГПА для трех вариантов грунтовых условий

Глубина погружения свайного фундамента, м	Осадка фундамента, мм			
	Легкий фундамент - 15т		Массивный фундамент - 600 т	
	ГУ №3	ГУ№1,2	ГУ №3	ГУ№1,2
8	0,165	0,004	19,4	0,432

Для вариантов грунтовых условий №1,2 вертикальная деформация от воздействия статических нагрузок для легкого фундамента составляет 0,004мм, для массивного фундамента составляет 0,432мм. Для варианта ГУ№3 осадка легкого фундамента - 0,165мм, осадка массивного фундамента – 19,4мм, что превышает 10 мм и является недопустимым для нормальной эксплуатации ГПА на основании опытных данных [16] и положений о предельных деформациях фундаментов ГПА по СТО Газпром 2-2.1-435-2010.

Для обеспечения осадки массивного фундамента  $\leq 10$ мм в грунтовых условиях № 3 необходимо, чтобы свайный фундамент нижним концом опирался в твердомерзлый грунт, с его сохранением в твердомерзлом состоянии на весь срок эксплуатации фундамента. Осадка легкого фундамента для грунтовых условий № 3 является допустимым для нормальной эксплуатации ГПА. В таблице 4.15 приведено сравнение материалоемкости массивного и легкого фундамента.

Сравнение материалоемкости фундаментов

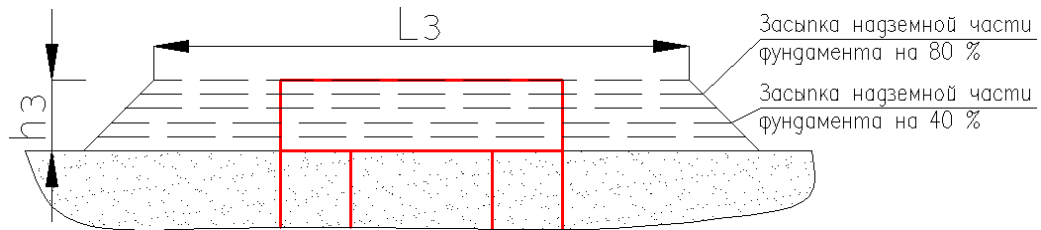
Наименование параметра	Численное значение параметра		Сравнение параметров Рм и Рл $\frac{P_m - P_l}{P_l} * 100\%$
	Массивный фундамент, Рм	Легкий фундамент, Рл	
Общая масса ростверка, т	600	15	3900%
Масса бетона ростверка В35	570т	0т	-
Масса металла ростверка:			
Арматура класса А500	18т	0т	-
Арматура класса А240	12т	0т	-
Металлопрокат из стали С345	0	15	-
Количество свай	52		-
Глубина погружения свай	8	8	0%
Тип свай	Стальные из трубы Ф426х9 по ГОСТ 10704-91		-
Общая масса металлопроката свай	38,5т	38,5т	0%
Общая масса ростверка и свайного поля	635т	53,5т	1087%
Общая масса металла ростверка и свайного поля	68,5т	53,5	28%

По результатам сравнения общая материалоемкость ростверка и свайного поля массивного фундамента больше на 1087%, чем у легкого. Легкий фундамент под ГПА является более выгодным по затратам материала и трудоемкости производства работ, что особенно актуально в условиях Ямала и Восточной Сибири. Усовершенствованная расчетная модель позволяет реализовать применение легких фундаментов ГПА в условиях Ямала и Восточной Сибири с учетом требований механической безопасности ФЗ №384.

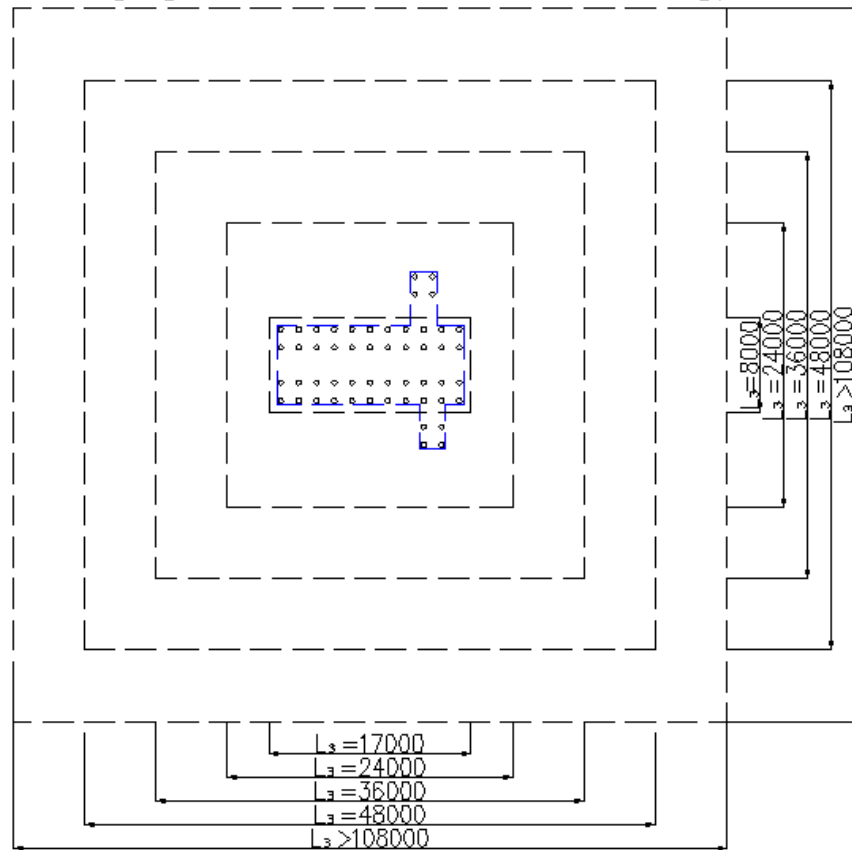
#### **4.5 Влияние засыпки надземной части фундамента на амплитудно-частотные характеристики**

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, рисунок 4.12.



А. Поперечный разрез заполнения надземной части фундамента песком



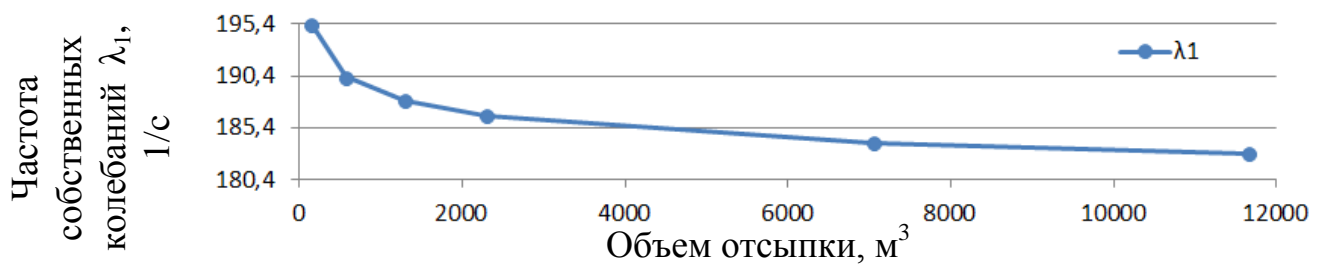
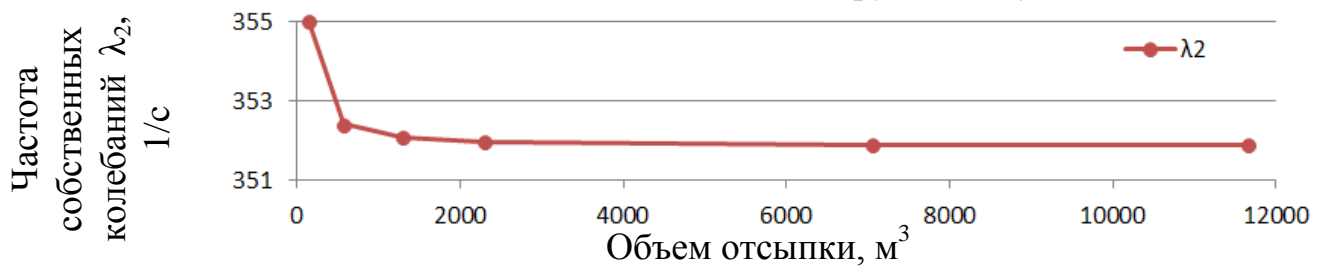
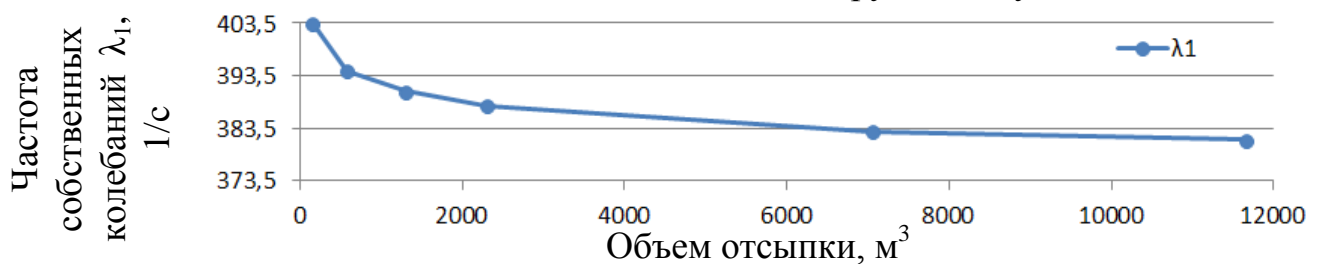
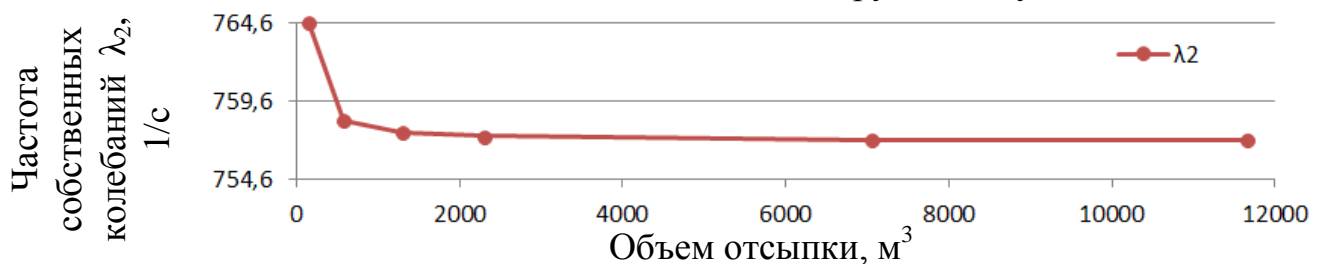
Б. Вид в плане засыпки надземной части фундамента песком

Рисунок 4.12 - Схема засыпки надземной части фундамента

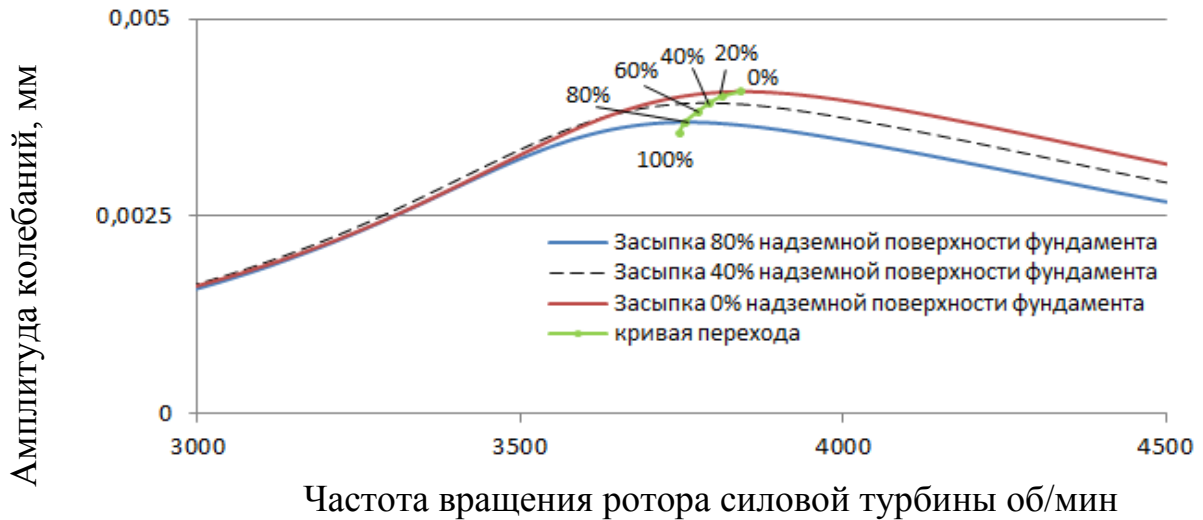
В таблице 4.16 приведены расчетные частоты собственных колебаний фундамента  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  в зависимости от объема отсыпки  $V = h_3 \cdot L_3 \cdot L_3$  на рисунке 4,12 при высоте отсыпки  $h_3 = 1$  м, для грунтовых условий №1 и №2. На рисунке 4.13 приведены графики построенные по данным таблицы 4.16.

Зависимость параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от объема отсыпки

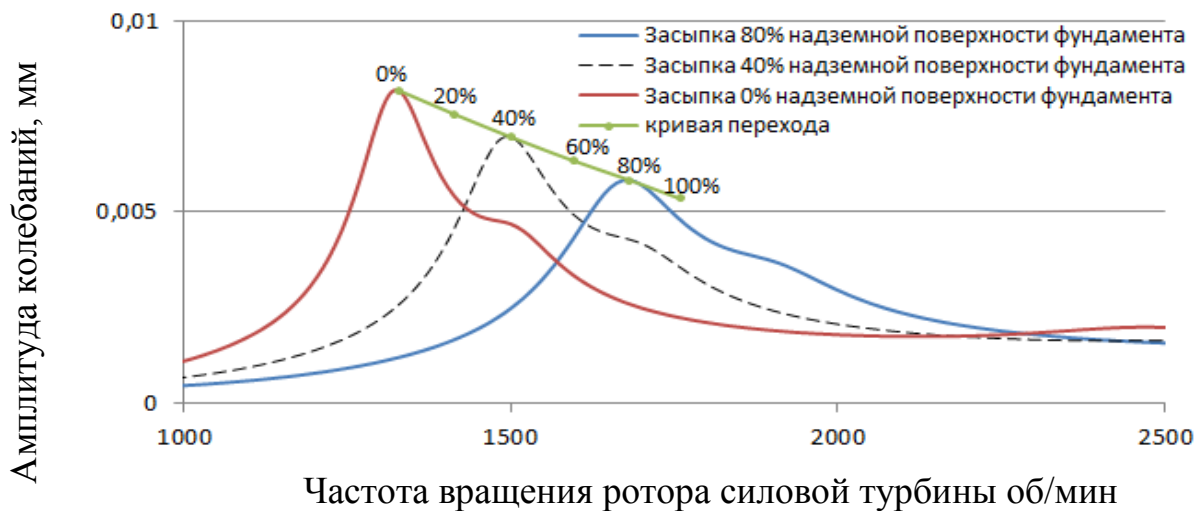
Объем отсыпки, м <sup>3</sup>	Размеры отсыпки, м	Грунтовые условия №1		Грунтовые условия №2	
		$\lambda_1$ , 1/с	$\lambda_2$ , 1/с	$\lambda_1$ , 1/с	$\lambda_2$ , 1/с
11664	108x108	182,9	351,88	381,2	757,1
7056	84x84	183,9	351,88	383,0	757,2
2304	48x48	186,6	351,97	387,9	757,4
1296	36x36	188,1	352,08	390,5	757,6
576	24x24	190,3	352,4	394,4	758,4
136	17x8	195,38	354,98	403,5	764,64

А. Зависимость  $\lambda_1$  от объема засыпки м<sup>3</sup> для грунтовых условий №1Б. Зависимость  $\lambda_2$  от объема засыпки м<sup>3</sup> для грунтовых условий №1В. Зависимость  $\lambda_1$  от объема засыпки м<sup>3</sup> для грунтовых условий №2Г. Зависимость  $\lambda_2$  от объема засыпки м<sup>3</sup> для грунтовых условий №2Рисунок 4.13 - Графики зависимости частот собственных колебаний  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  фундамента от объема засыпки надземной части фундамента

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 в диапазоне частот от 1000 до 2500 об/мин для грунтовых условий №2 (рисунок 4.14).



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



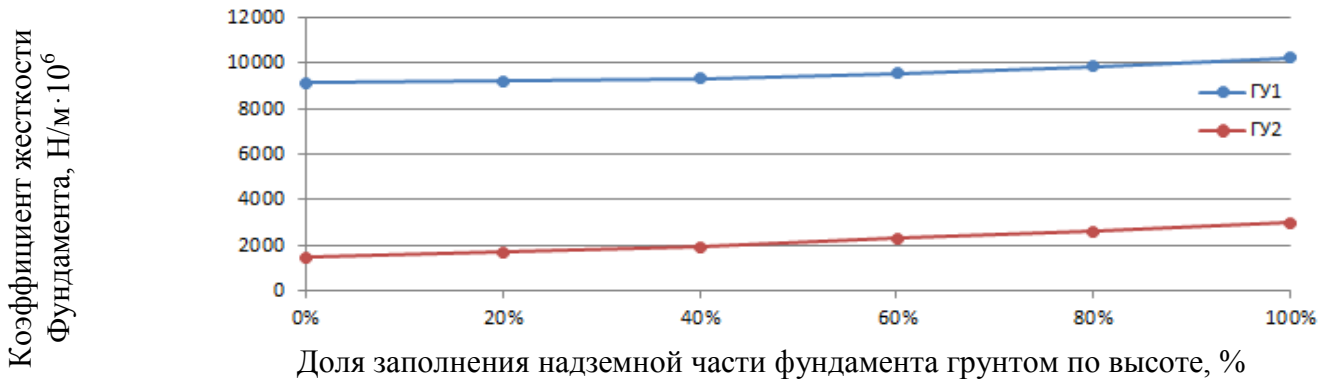
Б. Графики амплитудно-частотных характеристик для грунтовых условий №2

Рисунок 4.14 - Графики амплитудно-частотных характеристик для случаев заполнения надземной поверхности фундамента песком средней крупности

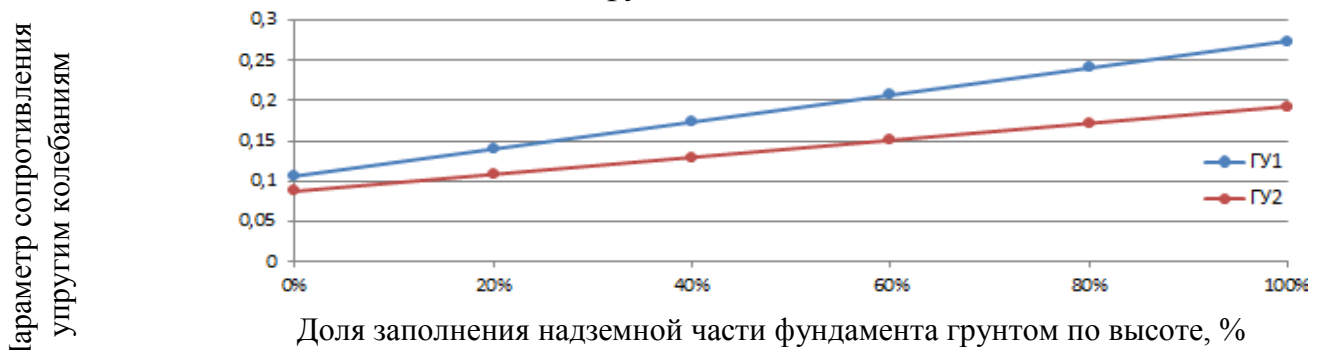
Графики приведены для условий заполнения 80%, 40% и 0% надземной поверхности фундамента (рисунок 4.12А) песком средней крупности с модулем упругости 50 МПа и объемным весом  $1650 \text{ кг/м}^3$ , при значении размера отсыпки в плане  $L_3 = 108 \text{ м}$ , рисунок 4.12, Б. Кривая перехода на графиках изображает численное значение частоты собственных колебаний  $\lambda_1$  и соответствующие

амплитуды колебаний для заполнения надземной части фундамента от 0% до 100%.

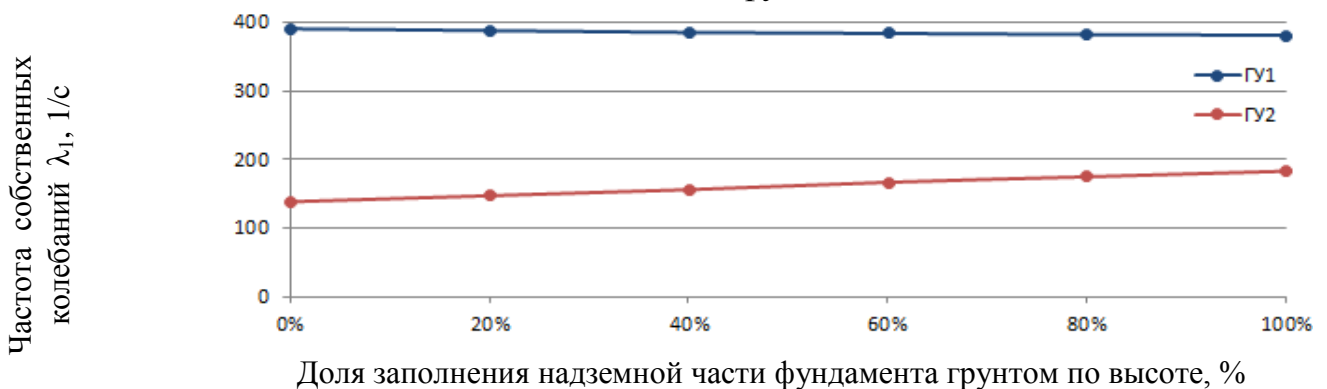
На рисунке 4.15 приведены графики зависимости параметров жесткости, сопротивления упругим колебаниям и частоты собственных колебаний системы фундамент-основание от доли засыпки надземной части фундамента по высоте.



А. Зависимость коэффициента жесткости от доли засыпки надземной части фундамента



Б. Зависимость параметра сопротивления упругим колебаниям от доли засыпки надземной части фундамента



В. Зависимость частоты собственных колебаний от доли засыпки надземной части фундамента

Рисунок 4.15 - Графики зависимости вычисленных параметров от доли засыпки надземной части фундамента песком средней крупности



В таблицах 4.17 и 4.18 сведены расчетные амплитуды колебаний фундамента для грунтовых условий №1 и №2 с учетом заполнения надземной поверхности фундамента грунтом от 0% до 100%.

Таблица 4.17

Расчетные амплитуды колебаний фундамента для грунтовых условий №1

Частота вращения роторов ГПА	Расчетная амплитуда колебаний фундамента в зависимости от доли заполнения % надземной части фундамента грунтом, мм					
	100%	80%	60%	40%	20%	0%
$\omega = \lambda_1, 1/c$	0,0035458	0,003692	0,003821	0,003935	0,004019	0,004078
$\omega = \lambda_2, 1/c$	0,0015164	0,001583	0,001644	0,001698	0,001744	0,00178
Минимальная $\omega, 1/c$	0,0031250	0,003219	0,003282	0,003333	0,003312	0,003266
Номинальная $\omega, 1/c$	0,0020313	0,002131	0,002229	0,002317	0,002410	0,002492
Максимальная $\omega, 1/c$	0,0018769	0,001967	0,002055	0,002134	0,002215	0,002285

Таблица 4.18

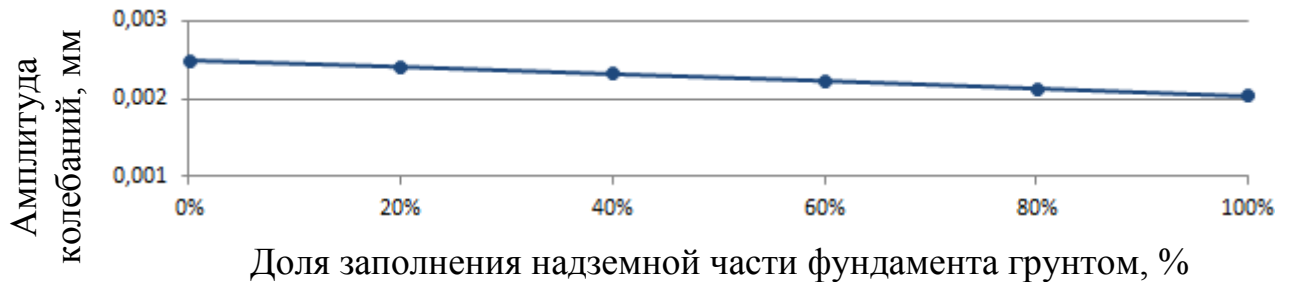
Расчетные амплитуды колебаний фундамента для грунтовых условий №2

Частота вращения роторов ГПА	Расчетная амплитуда колебаний фундамента в зависимости от доли заполнения % надземной части фундамента грунтом, мм					
	100%	80%	60%	40%	20%	0%
$\omega = \lambda_1, 1/c$	0,005361	0,005838	0,006345	0,006966	0,007558	0,008182
$\omega = \lambda_2, 1/c$	0,001525	0,001619	0,001714	0,001816	0,001911	0,002000
Минимальная $\omega, 1/c$	0,001502	0,001509	0,001487	0,001407	0,001348	0,001302
Номинальная $\omega, 1/c$	0,001064	0,001081	0,001098	0,001104	0,001112	0,001117
Максимальная $\omega, 1/c$	0,001037	0,001058	0,001077	0,001087	0,001098	0,001105

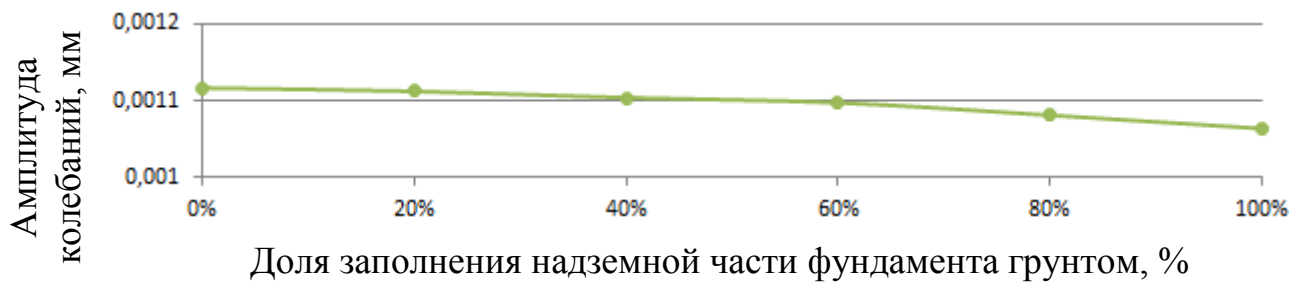
В грунтовых условиях №1 засыпка надземной части фундамента на 100%, 80%, 60%, 40% и 20% увеличивает жесткость системы фундамент основание соответственно на 11,8%, 7,77%, 4,6%, 2,0% и 0,7%; увеличивает значение параметра сопротивления упругим колебаниям соответственно на 157,6%, 126,1%, 94,6%, 63,0% и 31,5%; уменьшает частоту собственных колебаний  $\lambda_1$  фундамента соответственно на 2,45%, 2,16%, 1,75%, 1,40% и 0,71%; уменьшает максимальную амплитуду  $A(\lambda_1)$  колебаний на 13,1%, 9,5%, 6,3%, 3,5% и 1,5%.

В грунтовых условиях №2 объем засыпки надземной части фундамента на 100%, 80%, 60%, 40% и 20% увеличивает жесткость системы фундамент основание соответственно на 106,9%, 80,65%, 57,7%, 33,6% и 15,6%; увеличивает параметр сопротивления упругим колебаниям соответственно на 120,6%, 96,5%, 72,4%, 48,3% и 24,1%; увеличивает частоту собственных колебаний  $\lambda_1$  фундамента соответственно на 32,26%, 26,37%, 20,47%, 12,75% и 6,33%; уменьшает максимальную амплитуду  $A(\lambda_1)$  колебаний на 34,5%, 28,6%, 22,4%, 14,9% и 7,6%.

На рисунке 4.16 построены графики зависимости расчетных амплитуд колебаний от доли заполнения надземной части фундамента грунтом от 0% до 100% по высоте для грунтовых условий №1 и №2 при номинальной частоте вращения роторов ГПА.



А. Зависимость амплитуд колебаний от доли заполнения надземной части фундамента грунтом для грунтовых условий №1



Б. Зависимость амплитуд колебаний от доли заполнения надземной части фундамента грунтом для грунтовых условий №2

Рисунок 4.16 - Графики зависимости расчетных амплитуд колебаний от доли заполнения надземной поверхности фундамента грунтом

#### 4.6 Выводы и общие рекомендации

Разработаны рекомендации для обеспечения нормальных условий эксплуатации и «требований механической безопасности» (статьи 2, 16 Федерального закона №384) фундаментов ГПА.

Разработаны показатели массивных фундаментов, которые являются дополнением действующих строительных норм в части определения массивного типа фундамента под газотурбинные ГПА.

Выполнено сравнение результатов расчета амплитудно-частотных характеристик фундамента ГПА по методикам усовершенствованной расчетной модели и СП26.13330.2012 на примере легкого фундамента ГПА мощностью 25МВт на ГП2 Бованенковского НГКМ. Получены расчетные амплитуды колебаний фундамента для нормальных и аварийных условий эксплуатации на примере трех вариантов грунтовых условий. Выполнено сравнение материалоемкости легкого и массивного фундамента ГПА.

Выполнены сравнительные расчеты по определению влияния засыпки надземной части фундамента грунтом на его амплитудно-частотные характеристики. По результатам сравнительных расчетов, для снижения вибрации рекомендуются увеличение площади контакта конструкции фундамента с внешней средой, обладающей сравнительно высоким показателем сопротивления упругим колебаниям. Увеличение площади контакта конструкции фундамента с грунтовым основанием способствует увеличению жесткости, сопротивления упругим колебаниям и уменьшает амплитуды колебаний фундамента от воздействия периодических нагрузок.

## Заключение

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 воздействии 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 методике усовершенствованной расчетной модели и по строительным нормам 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%.Проделанные исследования позволяют снизить затраты на строительство и реализовать применение легкого фундамента ГПА в геологических условиях полуострова Ямал и Восточной Сибири. К настоящему времени реализован ряд проектов с использованием результатов проделанных научных исследований при строительстве легких фундаментов под газотурбинные ГПА на КС «Сынинская», КС «Интинская», КС «Воркутинская» на участке газопровода «Бованенково-Ухта». Результаты исследований применяются при разработке фундаментов ГПА газопровода «Сила Сибири» на КС2 «Олекминская», а так же при разработке Ковыктинского и Чаяндинского газоконденсатного месторождения.

### Список литературы

1. Абуханов А.З. Механика грунтов / А.З. Абуханов. – Ростов н/Д: Феникс 2006, -352 с.
2. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер. – М. : Недра, 1991. - 284 с.
3. Аксёнов В.И. Коэффициенты для корректировки значений модулей деформации, полученных в результате компрессионных испытаний мёрзлых грунтов / Аксёнов В.И. // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Т. 4. Вып. 1, 2013, – С. 1-12.
4. Александров А.В. Сопротивление материалов / Учебник для вузов – 5-е изд. – Москва 2007. – 560 с.
5. Анализ состояния геотехнических систем за период длительной эксплуатации в криолитозоне, разработка и внедрение управления эксплуатационной надежностью газопромысловых сооружений месторождения Медвежьего / Ю.М. Жильцов, В.Л. Невечера, В.В. Ремизов, Л.Н. Решетников. М., 1990. – 63 с.
6. Андерсленд О. Б. Геотехнические вопросы освоения севера / Андерсленд Д.М., Андерсон Д.М., Пер. с англ. – М.: Недра, 1983. - 551 с.
7. Бадалаха, И. К. Определение напряженно-деформированного состояния упругих массивов путем выделения объемных и сдвиговых деформаций [Текст] / И. К. Бадалаха // Межведомственный сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – Д.: Поліграфіст, 2000 – Вып. 18. – С. 119–127.
8. Бартоломей А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
9. Берлинов М. В. Примеры расчета оснований и фундаментов / Берлинов М.В., Ягупов Б.А., -М.: Стройиздат, 1986. – 173 с.
10. Белобородов С.М. Балансировка роторов компрессоров и турбин с несовпадающими рабочими и балансировочными поверхностями /

- Белобородов С.М., И.В. Шибанов // журнал *Авиационно-космическая техника и технология*, 2011, №8 – С. 99-102.
11. Биялт М.А. Разработка методов обеспечения вибрационной надежности турбоагрегатов на электростанциях и их реализация в омской энергосистеме: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.04.12 / М.А. Биялт ; ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – Екатеринбург, 2013. -24 с.
  12. Болотин В. В., Гольденблат И. И., Смирнов А. Ф. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. 2-е изд. — М.: Стройиздат, 1972.— 191 с.
  13. Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. — 600 с.
  14. Безбородов С.А. Методика расчета колебаний трубопровода с демпфирующими опорами из материала МР / С.А. Безбородов, А.М. Уланов // *вестник СГАУ им. академика С.П. Королева*, 2014, №1 – С.91-97.
  15. Власов В. З. Балки плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. –М. : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960. - 491 с.
  16. Вяхирев Р.И. Совершенствование систем разработки, добычи и подготовки газа на месторождениях Крайнего Севера / Вяхирев Р.И., О.М.Ермилов, Л.С.Чугунов, В.В.Ремизов [и др.]. - М. : Наука, 1996. - 415 с.
  17. Воронцов М.А., Козлов С.И. О возможности применения осевых газовых компрессоров в газотранспортной системе ОАО «Газпром» // *Газовая промышленность*. 2012. № 4. — С. 40–43.
  18. Гвазава Р.Н. Возможность резонансных явлений в фундаментах под турбоагрегаты и их учет при динамическом расчете конструкции / Гвазава Р.Н. // журнал *Основания, фундаменты и механика грунтов*, 2004, №3 - С. 10-12



19. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. / А.С. Гольдин  
— М.: Машиностроение, 1999. - 344 с., ил.
20. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / Гольдштейн М.Н. – М.:  
издательство литературы по строительству , 1971. – 368 с.
21. ГОСТ 1940-1-2007. Требования к качеству балансировки жестких роторов. –  
взамен ГОСТ 22061 – 76 ; введ. 01.07.2008. – М.: Федеральное агентство по  
техническому регулированию и метрологии, Приказ № 6-ст от 25.01.2008. –  
22 с.
22. ГОСТ 31320-2006. Вибрация. Методы и критерии балансировки гибких  
роторов. - взамен ГОСТ27870-88; введ. 01.07.2008. – М.: Федеральное  
агентство по техническому регулированию и метрологии, Приказ № 365-  
ст от 12.12.2007. – 28 с.
23. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – взамен ГОСТ 25100-95; введ.  
01.01.2013. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и  
метрологии, Приказ № 190-ст от 12.07.2012. – 38 с.
24. Долматов Б.И. Механика грунтов / Б.И. Долматов. - М–СПб.: 2000, -  
201с.
25. Долматов Б.И. Расчет оснований зданий и сооружений по предельным  
состояниям/ Б.И. Долматов. - Ленинград.: 1968, 141с.
26. Димов Л.А. Строительство зданий и сооружений ГТС на многолетнемерзлых  
грунтах в южной части Центральной и Восточной Сибири / Л.А. Димов  
//журнал. Газовая промышленность, 2009, №6 - С. 62-65.
27. Евдокимов Я.В Регулирование ГПА: возникающие проблемы и пути их  
решения/ Я.В. Евдакимов// журнал/ Современные технологии  
Автоматизации, 2009, №2 – С. 36-42.
28. Ершов Э.Д. Общая геокриология / Э.Д. Ершов.- М .: Изд-во МГУ, 2002. –  
683с.
29. Жемочкин, Б. Н. Теория упругости [Текст] / Б. Н. Жемочкин. – М.: Гос.  
изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1957. – 256 с.

30. Журбина И.Н. Математическое и физическое моделирование колебаний пластин в гидроупругой постановке с учетом сопротивления: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.13.18 / И.Н. Журбина ; Комсомольск-на-Амуре. гос. технический университет. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. -20 с.
31. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности / Учебное издание. – Москва 2005. – 424 с.
32. Ильин В.П. Численные методы решения задач строительной механики/ В.П. Ильин. – Минск: Высшая школа, 1990. – 345 с.
33. Иориш Ю.И. Виброметрия/ Ю.И. Иориш., М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 771с.
34. Капустин В.В. Методы динамических полей и напряжений и динамической устойчивости грунтовых массивов / В.В. Капустин, О.Р. Озмидов, И.О. Озмидов // журнал. Инженерные изыскания, 2014, №11 - С. 48-53.
35. Клаф Р. Динамика сооружений / Р. Клаф, Д. Пензиен. – М. :Стройиздат, 1979. -320 с.
36. Кондин А.Д. Рациональные конструкции фундаментов промышленных зданий / А.Д. Кондин, М.А. Гоц, Г.М. Драбкин, М.М. Клатцо, М.П. Селуянов. – Ленинград-Москва: Изд-во литературы по строительству, 1964. – 215 с.
37. Копейкин В.С. Основы механики грунтов и теории расчета гибких фундаментов / В.С. Копейкин, В.М. Демкин, А.С. Саенков. – М. : Изд-во АСВ, 2000. – 144 с.
38. Коренев Б.Г. Справочник по динамике сооружений / Б.Г. Коренев, И.М. Рабинович. – М.: , Стройиздат, 1972. – 512 с.
39. Коренев Б.Г. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия / Б.Г. Коренев, И.М.Рабинович. – М.: , Стройиздат, 1981. – 216 с.
40. Коренев Б.Г. Динамический расчет зданий и сооружений / Б.Г. Коренев, И.М.Рабинович. – М.: , Стройиздат, 1984. – 304 с.
41. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин. — М.: Машиностроение, 1982. - 264 с.

42. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов / А.Г. Костюк. — 3 - е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 476 с:
43. Крылов А.Н. О расчете балок лежащих на упругом основании / Крылов А.Н. – Ленинград: Издательство академии наук СССР, 1981. – 154 с.
44. Крылов, А. Н. Собрание трудов [Текст]: в 11 т. / А. Н. Крылов. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 1, ч. 2. – 323 с.
45. Лобанов А.Н. Оценка динамического давления в выхлопном тракте ГПА / А.Ю.Лобанов // журнал. Газовая промышленность, 2009, - №2. - С. 39-42.
46. Ляв А. Математическая теория упругости [Текст]: пер. с 4-го англ. издания/ А. Ляв. – М.; Л.: Изд-во НКТП СССР, 1935. – 674 с.
45. Нуриев Д.М. Численное исследование моделей свай и свайных фундаментов в условиях нагрузок типа сейсмических / Д.М. Нуриев // Известия КГАСУ, 2014, - №4. С. 214-221.
47. Назаренко Ю.Б. Способ устранения резонанса ротора турбореактивного двигателя при критической частоте его вращения с помощью овализации дорожки качения неподвижного кольца роликового подшипника / Назаренко Ю.Б., Потапов А.Ю. // журнал Двигатель, 2012, №1 – С. 14-17.
48. Назаренко Ю.Б. Устранение резонанса на критической частоте вращения роторов при эллиптической траектории вращения оси вала на опоре / Назаренко Ю.Б // журнал Авиационно-космическая техника и технология, 2013, №10 – С. 60-65.
49. Павлюк Н. П. О колебаниях твердого тела опирающегося на упругое основание. Сб. статей о вибрациях фундаментов. Госстройиздат 1933.
50. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М.: Машгиз, 1957.-336 с.
51. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. –М. : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1960. -195 с.

52. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. — М.: «Наука», 1971.-240 с.
53. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е доп. И перераб. / Я.Г. Пановко. —Л. : Машиностроение, 1976. -320 с.
54. Попов А.П. Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений/ А.П. Попов, В.И. Милованов, В.А. Рябов, М.А. Бережной // Международный журнал. Геотехника, 2010, № 6 - С. 4-22.
55. Прочность, устойчивость, колебания. Том 3 (справочник в 3-х т.) Под общ. ред. Биргера И.А., Пановко Я.Г., Изд. «Машиностроение», М.: 1968. — 569 с.
56. Радин Д.Г. Методика расчета нестационарных колебаний рамных фундаментов турбоагрегатов методом конечных элементов по времени: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.23.02 / Д.Г. Радин ; С-Пб. гос. политехнический университет. — С-Пб., 2010. -17 с.
57. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. / Работнов Ю. Н. — М.: Наука, 1979. —744 с.
58. РД 31.31.55-93. Инструкция по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений. — 31 с.
59. РД 34 15.078-91. Рекомендации по проектированию фундаментов турбоагрегатов. — 43 с.
60. РТМ 108.021.102-85. Агрегаты паротурбинные энергетические. Требования к фундаментам. Л.: НПО ЦКТИ, 1986. - 15 с.
61. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками / НИИОСП им. Н.М. Герсиванова. — М.: Стройиздат, 1982. — 207 с.
62. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет / О.А. Савинов. — Л.-М.:Стройиздат 1964.— 349 с.
63. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Изд. 2-е, перераб. и доп. / О.А. Савинов. — Л.:Стройиздат, 1979.—200с.

64. Савинов О.А., Альберт И.У., Сандович Т.А. О возможности использования упрощенных расчетных схем при выборе параметров систем сейсмоизоляции сооружений. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1983, т. 166, с.31-39.
65. Савоненко В.И. Нелинейный динамический анализ роторных систем центробежных машин на опорных сегментных подшипниках / В.И. Савоненко // вестник СумДУ, 2005, № 1 – С. 25-34.
66. Сарычев А.П. Особенности управления активными электромагнитными подшипниками газоперикачивающих агрегатов с гибкими роторами / Сарычев А.П. Руковицын // журнал Вопросы электромеханики, 2009, № 113 – С. 13-18.
67. Смирнов А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашенков, Н.Н. Шапошников. –М.:Стройиздат 1984.–415с.
68. СНиП II-Б.7-70. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – Взамен СН18-58; введ.01.07.71. – М.: изд-во литературы по строительству, 1971. – 34с.
69. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками.– Взамен СНиП II-1979; введ. 01.07.88. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 34с.
70. СП26.13330.2012.Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85; введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 66 с.
71. СП24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85; введ. 20.05.2011. – М.: Минрегион России, 2010. – 86 с.
72. СП22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*; введ. 20.05.2011. – М.: Минрегион России, 2010. – 162 с.
73. СТО Газпром 2-2.1-435-2010. Проектирование оснований, фундаментов, инженерной защиты и мониторинга объектов ОАО «Газпром» в условиях крайнего севера; введ. 9.03.2010. – М.: 2010. – 224 с.

74. Сорокин Е.С. Динамический расчет несущих конструкций зданий / Е.С. Сорокин. – М.: Госстройиздат 1956. – 338 с.
75. Сорочан Е.А. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Е.А. Сорочан, Ю.Г. Трофименков. – М.: Стройиздат 1985. – 480 с.
76. Тарануха Н.А. Исследование колебаний судовых стержневых конструкций с учетом сопротивления внешней среды различной плотности / Н.А. Тарануха, О.В. Журбин, И.Н. Журбин // III Сахалинская региональная морская научно-техническая конференция «Мореходство и морские науки». – 2011. – С. 82-94.
77. Тетельмин В.В. Магистральные нефтегазопроводы. Изд. 3-е, доп. / В.В. Тетельмин, В.А. Язев. – Долгопрудный. 2010. – 351 с.
78. Тимашенко С.П. Колебания в инженерном деле. Пер. с англ. / С.П. Тимашенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472с.
79. Тимошенко С. П. Теория упругости [Текст]: пер. с англ. / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
80. Тимашенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкции / С.П. Тимашенко, – М.: Издательство Наука, 1975. – 704 с.
81. Тимошенко, С. П. Курс теории упругости / С. П. Тимошенко, – Киев.: Издательство Наукова-думка, 1972. – 508 с.
82. Трофименков Ю.Г. Справочник проектировщика. Сложные основания и фундаменты / Ю.Г. Трофименков. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. – 272 с.
83. 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.
84. 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.

85. 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.
86. Тюрин М.А. Исследование воздействия динамических нагрузок на фундамент при работе ГПА / М.А. Тюрин, М.А // 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.
87. 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.
88. 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.
89. Усошина Е.А. Численно-аналитические методы моделирования динамических систем с пористыми неоднородными основаниями: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.13.18 / Е.А. Усошина ; Южный Федеральный Университет – Ростов-на-Дону, 2016. -20 с.
90. Флорин, В. А. Основы механики грунтов.: в 2 т. / В. А. Флорин, - М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1959. – т. 1. – 359 с.
91. Флорин В. А. Основы механики грунтов. Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений / В.А. Флорин, – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и

- строительным материалам, 1963. - 637 с.
92. Федеральный закон № 384. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Документ утвержден президентом Российской Федерации от 30.12.2009. Дата введения в действие: 01.07.2010. – 22 с.
  93. Хренов Н.Н. Влияние температурного режима газа на состояние газопровода в многолетнемерзлых грунтах / Н.Н. Хренов // журнал Основания, фундаменты и механика грунтов, 2011, №1 – С. 24-29.
  94. Цытович Н.А. Механика грунтов. Изд. 4-е, доп. / Н.А. Цытович, – М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. - 637 с.
  95. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. / Н.А. Цытович, – М.: изд-во Высшая школа, 1973. - 448 с.
  96. Цытович Н.А. Механика грунтов. / Н.А. Цытович, – М.: изд-во Высшая школа, 1983. - 288 с.
  97. Шайхутдинов А.З. Разработка и модернизация газоперикачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / А.З. Шайхутдинов, - Казань: ООО «Слово», 2007. – 339 с.
  98. Andersland O. Geotechnical engineering for cold regions / Andersland O., Anderson D., New York, 1983.
  99. Boussinesq, J. Application des potentiels a l'equilibre et du mouvement des solides elastiques [Text] / J. Boussinesq. – Paris, 1885.
  100. Flamant, Comptes rendus, t. 114, Paris, 1892.
  101. Kelvin, Cambridge and Dublin Math. J., 1848.
  102. Alexandre Augusto Simoes. HOW TO PREDICT THE VIBRATION EFFECT DUE TO MACHINE OPERATION ON ITS SURROUNDINGS // 14 th international Congress Sound Vibration, Cairns Australia, 9-12 July, 2007.
  103. ASHWANI JAIN, D. K. SONI. Foundation Vibration Isolation Methods // 3rd WSEAS International Conference on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS, Spain, December 14-16, 2007.



104. Ataulla Attar, Shahbaz Dandin. Economical Method of Reducing vibration on Machine Foundation // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2015. P. 89-97.
105. Biot M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range // JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA. – 1956. - No. 2, pp. 168-178.
106. DOWNHAM E. The Rationale of Monitoring Vibration on Rotating Machinery in Continuously Operating Process Plant // A paper presented by E.Downham and R.Woods at the American society of mechanical engineers vibrations conference in Toronto, Canada. September 8-10, 1971.
107. Dr. Arkady Livshits. DYNAMIC ANALYSIS AND STRUCTURAL DESIGN OF TURBINE GENERATOR FOUNDATIONS // european built environment cae conference, IEC - Israel Electric Corporation Ltd, Israel Nativ Ha-Or St, 1, POB 10, Haifa 31000, Israel, P. 1-12.
108. Galal A. Hassaan. Optimal Design of Machinery Shallow Foundations with Silt Soils // International Journal of Mechanical Engineering. – 2014. - Issue 3, P. 11–24.
109. GEORGE GAZETAS. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1. P. 2-42.
110. H. van Koten. Vibrations of machine foundations and surrounding soil// Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. – 2012. - No. 1, P 29-54.
111. J. Vondrich. Dynamic effects of machines on foundations buildings // Czech Technical University in Prague, Czech Republic. – 2010. - , P 977-982.
112. K.G. Bhatia. FOUNDATIONS FOR INDUSTRIAL MACHINES AND EARTHQUAKE EFFECTS// Journal of Earthquake Technology. – 2008. - No. 1-2, March-June, P. 13–29.
113. Kang Il Lee. Frequency dependencies of phase velocity and attenuation coefficient in a water-saturated sandy sediment from 0.3 to 1.0 MHz // Journal of Acoustical Society of America. – 2007. - No. 5, pp. 2553-2558.

114. Kirsty Alison Kuo. Vibration from Underground Railways: Considering Piled Foundations and Twin Tunnels: a dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Kirsty Alison Kuo ; King's College University of Cambridge, 2010. -192 p.
115. Mohammed Yousif Fattah. DESIGN CHARTS FOR MACHINE FOUNDATIONS // Journal of Engineering. - 2007. – Number 4 December. P. 193-206.
116. Payal Mehta. Analysis and Design of Machine Foundation//Indian Journal of Reasearch. – 2013. - Issue : 5.– P. 70–72.
117. Piyush K. Bhandari, Ayan Sengupta. Dynamic Analysis Of Machine Foundation// International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Ahmednagar, Maharastra, India – 2014. - Special Issue 4.– P. 169–176.
118. Rajib Ul Alam Uzzal. Dynamic response of a beam subjected to moving load and moving mass supported by Pasternak foundation // Journal of Shock and Vibration, Concordia Center for Advanced Vehicle Engineering, Mechanical and Industrial Engineering Department, Concordia University, Montreal, Canada. - 2012 .– P. 205–220.
119. SHAMSHER PRAKASH. FOUNDATIONS FOR VIBRATING MACHINES // Journal of Structural Engineering, SERC, Madras. INDIA. - 2006. – Special Issue, April-May. P. 1-39.
120. Singiresu S. Rao. Vibration of Continuous Systems / Singiresu S. Rao. – New Jersey, Canada.: 2007. – 720 p.