

*М.А. Тюрин, аспирант по специальности 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы в нефтяной и газовой промышленности», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», инженер 1-й категории строительного отдела, ОАО «ВНИПИгаздобыча», e-mail: mihail0710@yandex.ru*

## Анализ методов расчета фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях

В статье выполнен сравнительный анализ существующих методов динамического расчета фундаментов под газоперекачивающие агрегаты (ГПА). Исследуются основные теоретические положения строительных норм для расчета и проектирования фундаментов под ГПА. Разработана усовершенствованная модель грунтового основания, которая позволяет учитывать сильную неоднородность грунтового основания. Усовершенствованная модель позволяет прогнозировать любые аварийные ситуации, связанные с оттаиванием мерзлых грунтов. Выполнен анализ изменения вибраций фундамента во время работы ГПА с учетом изменения жесткости мерзлых грунтов в результате их сезонного оттаивания и промерзания, а также возможных аварийных ситуаций, связанных с большим выделением тепла.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат (ГПА), фундамент, грунтовое основание, мерзлые грунты, скорость вращения ротора, динамические нагрузки, амплитуды колебаний, неупругое сопротивление основания, демпфирование, аварийные ситуации.

Добыча углеводородного сырья и транспортировка газа с каждым годом все более смещаются в зоны многолетнемерзлых и вечномерзлых грунтов. Более 60% территории России – это зона распространения многолетнемерзлых пород со сложными геологическими условиями. В связи с этим возрастает внимание к инженерным сооружениям газовой промышленности, возводимым в условиях вечной мерзлоты. Очень важна адекватная оценка сложившихся к настоящему времени расчетных методик и требований по проектированию фундаментов под ГПА.

Чтобы проектируемые фундаменты максимально соответствовали принятой расчетной модели, в [3] сформулированы основные допущения в теории расчета и требования по проектированию фундаментов (табл. 1). На основе вышеизложенных допущений методика расчета фундамента на

динамические нагрузки включает в себя определение горизонтальных и вертикальных амплитуд колебаний из уравнений, описывающих вынужденные поступательные и крутильные колеба-

ния. В теории расчета фундаментов [3] решается задача колебания системы с одной степенью свободы.

Для определения амплитуд колебаний, соответствующих горизонтальным и

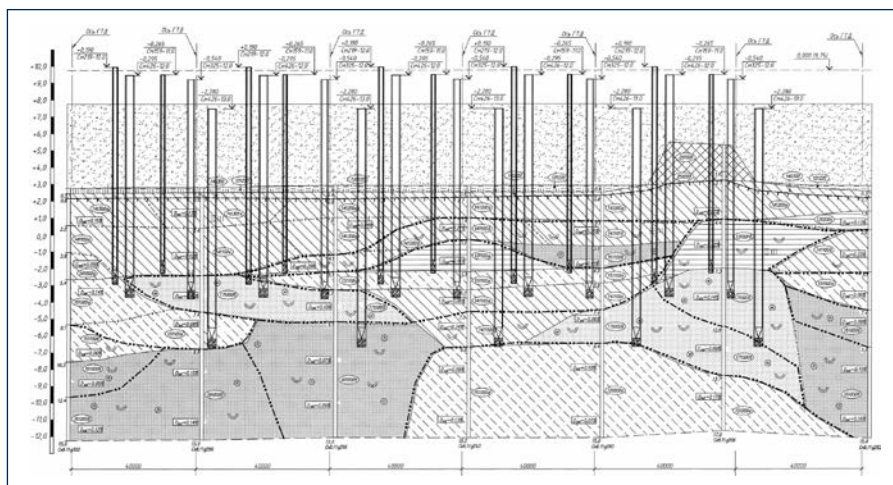


Рис. 1. Геологический разрез грунтового основания под компрессорным цехом дожимной компрессорной станции (2-я очередь, 1-й этап, 1-й модуль) ГП-2 Бованенковского НГКМ

Таблица 1. Основные допущения в теории расчета и требования по проектированию фундаментов по [3]

Основные допущения в теории расчета колебаний фундаментов машин [3]	Основные требования к проектированию фундаментов [3]
1. Основание рассматривается как упруго-вязкое линейно деформируемое, свойства которого определяются коэффициентами упругого равномерного и неравномерного сжатия, упругого равномерного и неравномерного сдвига и коэффициентами, характеризующими демпфирование.	1. Фундаменты машин, как правило, должны быть отделены сквозным швом от смежных фундаментов здания, сооружения и оборудования, а также от пола.
2. Допускается не учитывать эксцентриситет в распределении масс фундамента, если он не превышает 3–5% (в зависимости от прочности грунтового основания) размера стороны подошвы фундамента, в направлении которой смещен центр тяжести.	2. Следует стремиться к совмещению на одной вертикали центра тяжести площади подошвы фундамента и линий действия равнодействующей статических нагрузок от веса машины. Эксцентриситет, как правило, не должен превышать (за исключением случаев, оговоренных в отдаленных разделах) для грунтов с расчетным сопротивлением $R_0 \leq 150$ кПа ( $1,5$ кгс/см <sup>2</sup> ) – 3%, а для грунтов с расчетным сопротивлением $R_0 > 150$ кПа ( $1,5$ кгс/см <sup>2</sup> ) – 5%.
3. При упругом неравномерном сжатии (повороте подошвы фундамента относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести подошвы фундамента перпендикулярно плоскости колебаний) допускается принимать, что плоскость колебаний параллельна линии действия возмущающей силы или плоскости действия возмущающего момента.	3. По типу конструкции фундаменты машин с динамическими нагрузками [3] бывают: <ul style="list-style-type: none"> <li>• массивные;</li> <li>• стенчатые;</li> <li>• рамные;</li> <li>• облегченные, различных конструктивных типов.</li> </ul>
4. При действии на фундамент машины одновременно нескольких возмущающих сил и отсутствии данных об их фазовом соотношении рассматриваются варианты синфазного и противофазного действия сил, вызывающие наиболее неблагоприятные формы колебаний.	4. Подошву фундаментов следует предусматривать прямоугольной формы в плане и располагать на одной отметке. Высоту фундаментов машин следует назначать минимальной из условий размещения технологического оборудования.
	5. Для рамных фундаментов рекомендуется соблюдать симметрию как по общей геометрической схеме, так и по форме элементов.
	6. По п.1.7 устройство фундаментов турбоагрегатов мощностью 25 МВт и более на насыпных грунтах не допускается.

крутильным формам колебаний [3], используются коэффициенты упругого неравномерного сжатия  $C_y$ , упругого равномерного сдвига  $C_x$  и упругого неравномерного сдвига  $C_y$  [кН/м (тс/м<sup>3</sup>)], которые принимаются равными:

$$C_\phi = 2C_z; C_x = 0,7C_z; C_y = C_z.$$

Необходимо отметить, что  $C_z$ , определенный по строительным нормам [3], соответствует случаю, когда грунтовое основание по своим упругим характеристикам однородно. На практике однородные основания встречаются очень редко. Как правило, грунтовые основания представлены множеством напластований инженерно-геологических элементов (рис. 1). Грунтовое основание неоднородно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. В строительных нормах [3] не упоминается о том, как нужно поступать в том случае, если грунтовое основание сильно неоднородное.

В п. 1.28 действующих строительных норм [3] неупругое сопротивление основания или рассеивание энергии колебаний учитывается при помощи па-

раметра относительного демпфирования  $\xi$ . По нормам этот параметр должен определяться по результатам испытаний. Но на стадии проектирования и расчета фундаментов ГПА испытания грунтового основания для определения динамических свойств параметра  $\xi$ , как правило, не выполняются. Поэтому при отсутствии экспериментальных данных в нормах предлагается определять относительное демпфирование  $\xi_z$  для вертикальных гармонических колебаний по эмпирическим формулам:

$$\xi_z = \frac{2}{\sqrt{p}} \left( \xi_z = \frac{0,7}{\sqrt{p}} \right)^* ;$$

где  $p$ , кПа, (т/м<sup>2</sup>) – среднее статистическое давление под подошвой фундамента.

Параметр  $\xi_z$  имеет безразмерное значение и не зависит от упругих характеристик, плотности, пористости и многих других свойств грунтового основания, а зависит только от давления под подошвой фундамента. Зависимость параметра  $\xi_z$  только от статического давления под подошвой фундамента не отражает

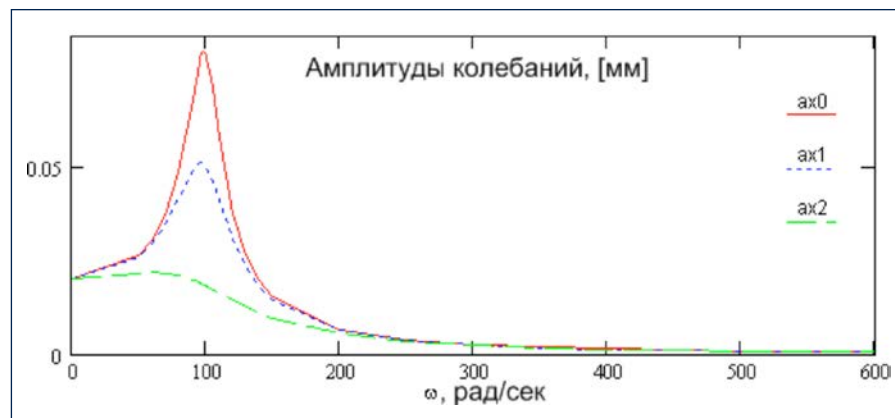


Рис. 2. Сравнение амплитуд колебаний фундаментов в зависимости от параметра неупругого сопротивления основания

Таблица 2. Модуль затухания грунтов по [4]

Грунты	$\Phi_z, c$	
	15 т/м <sup>2</sup>	4т/м <sup>2</sup>
<b>1. Неводонасыщенные грунты:</b>		
Глинистые грунты плотные	0,004	0,006
Супеси и суглинки твердые	0,005	0,006
Пески естественного залегания; пески крупные и средней крупности в насыпи	0,005	0,007
Супеси рыхлые ( $\epsilon > 0,6$ ) в условиях естественного залегания и в насыпи	0,006	0,008
Пески мелкий и пылеватые, рыхлые (коэффициент пористости $\epsilon > 0,6$ )	0,007	0,010
Суглинки и глины слабые, рыхлые ( $\epsilon > 0,6$ ) в условиях естественного залегания и в насыпи	0,011	–
<b>2. Водонасыщенные и глинистые влажные грунты:</b>		
	0,005	–

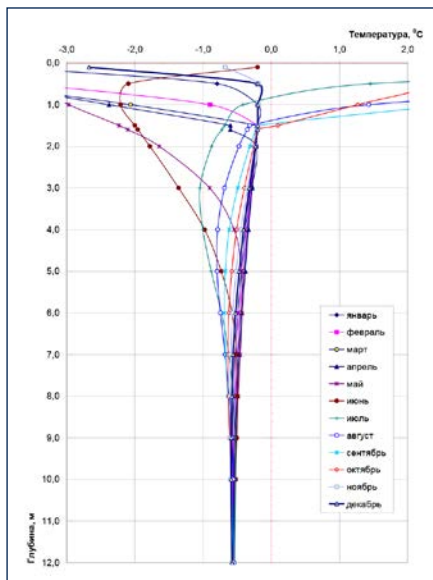


Рис. 3. График распределения температур грунта в течение года на КС «Воркутинская»

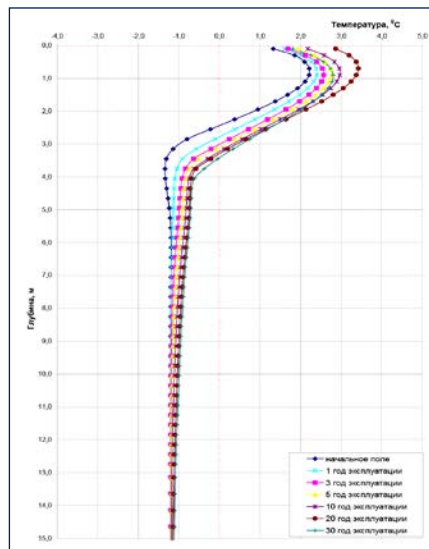


Рис. 4. Прогноз распределения среднегодовых температур грунта на 30 лет на КС «Воркутинская»

реальной физической картины происходящего.

В соответствии с методикой расчета, изложенной в [3], все типы грунтов независимо от их упругих характеристик, плотности, пористости и других свойств грунтового основания обладают одинаковыми демпфирующими свойствами. Это допущение упрощает выполнение расчетов, но не соответствует реальной картине происходящего. Исследования Е.А. Савинова [4] подтверждают, что демпфирующие свойства у разных типов грунтов имеют различные значения (табл. 2).

Необходимо отметить, что в нормах [3] п. 1.28 в качестве характеристики демпфирования допускается использовать модуль затухания  $\Phi_z [c]$ , определяемый для гармонических колебаний по формулам:

$$\Phi_z = \frac{1,6}{\sqrt{C_z}} \left( \Phi_z = \frac{0,5}{\sqrt{C_z}} \right)$$

где  $C_z, кН/м^3, (тс/м^3)$  – коэффициент упругого равномерного сжатия.

В таблице 3 приведено сравнение формул для определения амплитуд колебаний по строительным нормам разных годов и по [4]. Из таблицы видно, что в [2], [3], [4] используются разные параметры, описывающие неупругое сопротивление основания. Методы расчета, изложенные в строительных нормах [3] и [2], отличаются от решения [4]. Демпфирующие свойства грунтового основания в [3] и [2] учитываются косвенно.

Таблица 3. Сравнение формул для определения амплитуд колебаний по строительным нормам [3], [13] и по [4]

Исходное уравнение [4]	$P_z^{(0)}$ $z'' = \Phi \lambda_z^2 z' + \lambda_z^2 z = \frac{P_z^{(0)}}{m} \sin \omega t$		
	Решение по [4]	Решение по СНиП 2.02.05-87	Решение по СНиП II-Б.7-70
Формула для определения амплитуды колебаний	$A_z = \frac{P_z^{(0)}}{K_z} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_z^2}\right)^2 + (\Phi \omega)^2}}$ где $P_z^{(0)}$ – динамическая нагрузка, $K_z$ – коэффициенты жесткости	$a_z = \frac{a_{x,st}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}\right)^2 + 4(\xi'_x)^2 \left(\frac{\omega}{\lambda_x}\right)^2}}$ где $a_{x,st} = \frac{F_{hst}}{S_x}$ – перемещение, м, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы $F_h$ ; $F_h$ – расчетное значение динамической нагрузки; $S_x$ – коэффициенты жесткости системы «фундамент – основание»	$A_z = \frac{A_{x,cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{64\lambda_x^2}}}$ где $A_{x,cm} = \frac{P_h}{S_x}$ – перемещение, м, центра тяжести верхней плиты при статическом действии силы $P_h$ ; $P_h$ – нормативное значение динамической нагрузки; $S_x$ – коэффициенты жесткости конструкции фундамента
Параметр, описывающий неупругое сопротивление основания	$\Phi_z$ , где $\Phi$ – модуль затухания, с; $\omega$ – угловая частота вращения ротора	$\frac{4 \cdot \xi'_x{}^2}{\lambda_x^2}$ , где $\lambda_x$ – угловая частота собственных горизонтальных колебаний фундамента; $\xi'_x$ – относительные демпфирования системы «фундамент – основание»; $\omega$ – угловая частота вращения ротора	$\frac{1}{64 \cdot \lambda_x^2}$ , где $\lambda_x$ – угловая частота собственных горизонтальных колебаний фундамента; $\omega$ – угловая частота вращения ротора

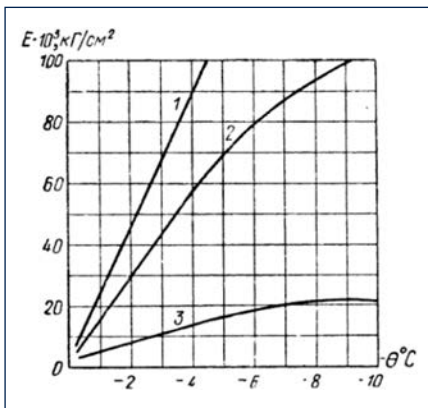


Рис. 5. Зависимость модуля нормальной упругости мерзлых грунтов  $E$  кг/см<sup>2</sup> от величины отрицательной температуры  $-\theta^\circ$  при внешнем давлении  $\sigma = 2$  кг/см<sup>2</sup>, [7]: 1 – мерзлый песок; 2 – мерзлый пылеватый грунт; 3 – мерзлая глина

В соответствии с [3] характеристику демпфирования основания можно определить двумя способами (табл. 4). В зависимости от того, каким способом определен параметр  $\xi_z$ , разница в вычислениях по [3] может составлять до 10 раз.

Важность определения точного значения характеристики демпфирования основания можно подтвердить результатами вычислительного эксперимента (рис. 2).

Рассчитаны амплитуды колебаний трех вариантов условного фундамента, амплитуды колебаний определены по формуле решения [4] уравнения колебаний с учетом затухания (табл. 4).

$$A_z = \frac{P_z^{(0)}}{K_z} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_z^2}\right)^2 + (\Phi\omega)^2}}$$

Частота собственных колебаний всех фундаментов одинаковая  $\lambda = 100$  рад./сек. Соотношение

$$\frac{p_z^{(0)}}{K_z} = 0,02 \text{ мм одинаковое.}$$

Расчет колебаний фундаментов выполнен в диапазоне частот  $\omega = 0-600$  рад./сек., что соответствует частоте вращения ротора  $n = 0-5730$  об./мин. Характеристики демпфирования основания трех вариантов фундаментов имеют разное значение.

Таблица 4. Характеристика демпфирования основания по СНиП 2.02.05-87

Способ № 1 $\xi_z = \frac{0,7}{\sqrt{P}}$	$P = 5-50 \text{ т/м}^2$ $\xi_z = 0.313-0.1$
Способ № 2 $\xi_z = 0,5\Phi\lambda_z$	$\Phi = 0,006-0,001 \text{ сек.}$ $\lambda = 20-125 \text{ рад./сек.}$ $\xi_z = 0.375-0.1$

Таблица 5. Коэффициенты поглощения энергии и внутреннего трения

Материал	$\psi$	$\gamma$
Сталь	0,01-0,03	0,025-0,028
Железобетон	0,25	0,040
Бетон	0,26	0,041

Вариант грунтового основания № 1: модуль затухания грунтов основания  $\Phi_1 = 0,0025$  сек, максимальная амплитуда колебаний соответствует резонансной частоте  $a_{x0} = 0,085$  мм. Вариант грунтового основания № 2:  $\Phi_2 = 0,004$  сек,  $a_{x1} = 0,05$  мм. Вариант грунтового основания № 3:  $\Phi_3 = 0,011$  сек,  $a_{x2} = 0,02$  мм.



**20 - 22 августа**  
**2014 года**

**XV Межрегиональная специализированная выставка-конгресс**

**в рамках X СИБИРСКОГО ФОРУМА НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ И ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК**

**НЕФТЬ. ГАЗ. ГЕОЛОГИЯ. ТЭК**

**ОФИЦИАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ**  
**22 августа в 12.00**

**ТЕХНОПАРК**  
ОАО ТОМСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ДЕЛОВОЙ ЦЕНТР  
Томск, ул.Вершинина, 76  
Тел.: (3822) 41-97-68  
Моб. +7 909-542-94-44  
E-mail: 501919@mail.ru  
HTTP://www.t-park.ru

Таблица 6. Упругие характеристики грунтов

№ слоя грунтового основания	Мощность слоя, м	ИГЭ	Модули деформации грунтов для двух вариантов грунтового основания, т/м <sup>2</sup>		
			Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
1	3,6	Насыпной слежавшийся грунт, песок средней крупности	150 000 t = -1,0 °C	500 t = 3 °C	500 t = 3 °C
2	1,6	Насыпной слежавшийся грунт, песок средней крупности	30 000 t = -0,3 °C	700 t = 0 °C	700 t = 0,5 °C
3	6,4	Суглинок пылеватый, цементированный льдом	50 000 t = -0,5 °C	30 000 t = -0,3 °C	1200 t = 0 °C
4	1,8	Супесь песчанистая, цементированная льдом	140 000 t = -1,0 °C	116 000 t = -0,8 °C	30 000 t = -0,3 °C
5	1,7	Песок мелкий, цементированный льдом	235 000 t = -1,5 °C	210 000 t = -1,4 °C	140 000 t = -0,8 °C
6	–	Песок пылеватый, цементированный льдом	300 000 t = -2 °C	300 000 t = -2 °C	170 000 t = -1,2 °C

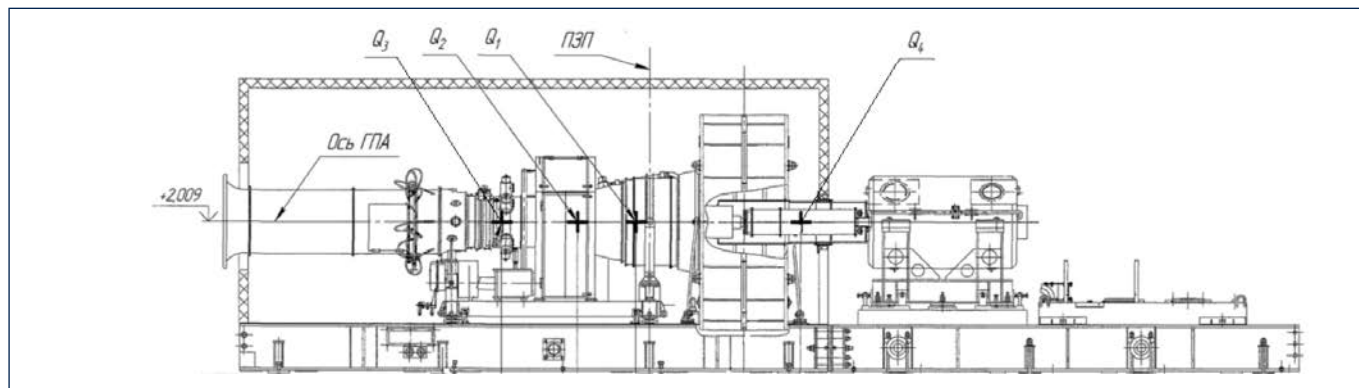


Рис. 6. Схема расположения ГПА на верхней плите ростверка

Нужно отметить, что в работах [3], [4] для расчета фундаментов в качестве характеристики демпфирования основания используется  $\Phi$ , в работе [5] для расчета надфундаментных конструкций используется коэффициент внутреннего трения  $\gamma$ . В таблице 5 приводятся значения коэффициентов поглощения энергии и внутреннего сопротивления для некоторых материалов [6].

На основе изложенного можно сделать выводы, что неточности в определении параметров жесткости основания  $C_y, C_x, C_y, C_z$  и параметров демпфирования основания  $\xi_2$  связаны с неоднородностью основания (рис. 1) и переходом грунтов слоя СТС в течение года из мерзлого состояния в талое и наоборот (рис. 3 и 4). Все это может сильно повлиять на результаты расчета и не отражать реальной картины происходящего.

В зоне вечной мерзлоты в течение всего теплого времени года в основании находится мерзлый практически несжи-

маемый слой грунта на незначительной глубине оттаивания (1,5–3 м). Модуль нормальной упругости  $E$  для мерзлых грунтов [7] (рис. 5) в десятки и сотни раз больше модуля нормальной упругости грунтов талых ( $E \approx 3000 \div 300000$  кг/см<sup>2</sup>), и величина его зависит от ряда факторов: состава мерзлых грунтов, их льдистости, величины отрицательной температуры и внешнего давления.

По нормам [3] в зависимости от того, каким способом был определен параметр демпфирования (табл. 4), можно получить совершенно разные результаты расчета в определении амплитуд колебаний фундаментов (рис. 2). В нормах [2] параметр демпфирования не зависит от того, какими грунтами сложено основание.

Необходимо отметить, что при определении амплитуд колебаний в [3] и [2] учитывается только масса фундамента, а масса грунтового основания не учитывается.

Идеальные однородные основания по глубине и в плане встречаются очень редко. В нормах [3] не описывается, какие упругие и демпфирующие характеристики необходимо принимать для сильно неоднородных оснований. Методика расчета, изложенная в [3], описывает расчет амплитуд колебаний фундаментов на грунтовых основаниях, сложенных однородными грунтами. Вместе с тем неясно, каким образом нужно определять упругие и демпфирующие характеристики сильно неоднородных оснований. Это особенно актуально для грунтовых условий Ямала. Учитывая вышесказанное, необходимо создание нового метода расчета [1] фундаментов под ГПА в сложных геологических условиях (рис. 1). Этот метод должен учитывать неоднородность грунтового основания по жесткости, плотности, демпфирующим свойствам, а также изменение этих свойств в течение года (рис. 3 и 4).

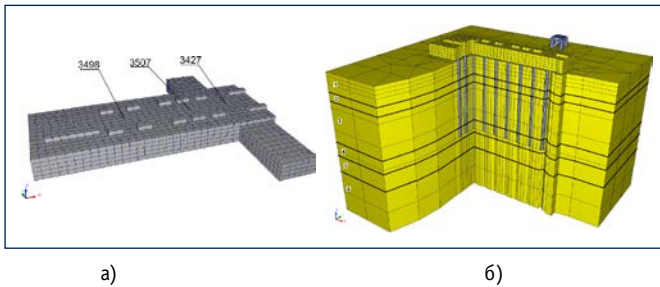


Рис. 7. Общий вид фундамента и грунтового массива  
а) номера узлов на верхней плите фундамента  
б) общий вид фундамента и грунтового массива с послойным разбиением

Усовершенствованная модель грунтового основания представляет собой систему, состоящую из множества упругих связанных между собой материальных тел (части машины, фундамент, массив грунта в основании, разбитый по слоям). Эти тела значительно различаются по форме, размерам и массе [1].

Усовершенствованная модель грунтового основания учитывает рассеивание энергии вибраций в неоднородном грунтовом массиве (учет затухания колебаний). Она позволяет моделировать аварийные ситуации, связанные с большими тепловыделениями и переходом мерзлых грунтов в талое состояние (учет разных упругих характеристик грунтового основания в зависимости от степени уплотнения и температурного состояния грунтов). С помощью данной модели можно оценить влияние упругих волн в грунтовом массиве (вибрации, создаваемые работой ГПА) на соседние сооружения, технологическое оборудование и обслуживающий персонал (рис. 9).

#### НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ РАССМОТРЕНЫ ТРИ ВАРИАНТА ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОГО МАССИВА (табл. 6, рис. 7):

- 1) время года – зима, промерзание слоя СТС;
- 2) время года – лето, оттаивание слоя СТС;
- 3) время года – лето в сочетании с аварийной ситуацией (большое выделение тепла), связанной с оттаиванием грунтового основания до глубины 5,2 м.

Были вычислены амплитуды колебаний в трех точках (рис. 7) верхней плиты ростверка для скоростей вращения ротора ГПА (рис. 6) в диапазоне 1000–6000 об./мин.

На рисунке 8 изображены графики изменения амплитуд колебаний ростверка для трех вариантов температурного состояния грунтового основания в зависимости от скорости вращения ротора ГПА.

В таблице 7 приведено сравнение максимальных амплитуд колебаний верхней плиты ростверка для трех вариантов температурного состояния грунтового основания. Из рисунка 8 и таблицы 7 видно, что при оттаивании верхнего слоя мерзлых грунтов общая жесткость грунтового основания уменьшается, увеличивается максимальная амплитуда колебаний ростверка, частота вращения ротора, соответствующая максимальной амплитуде колебаний ростверка, уменьшается.

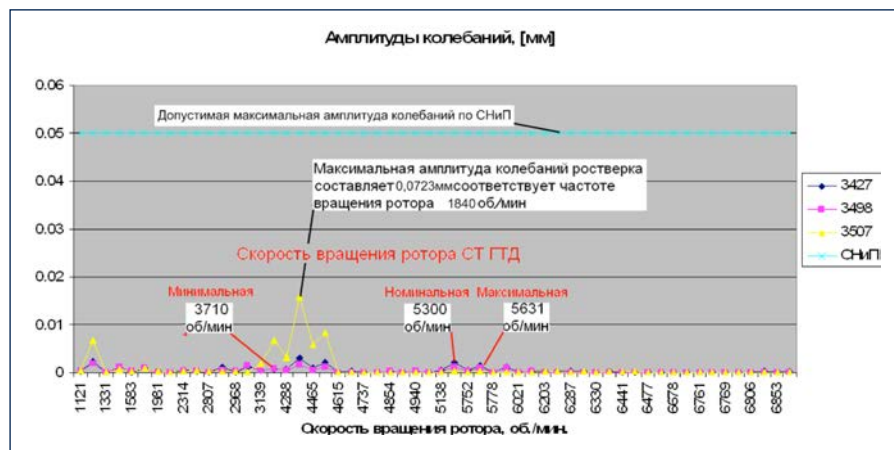
- фонтанная арматура
- блоки  
обвязки скважин
- комплекты  
подземного  
оборудования
- станции управления
- противовыбросовое  
оборудование
- сертификация API и ISO

на правах рекламы

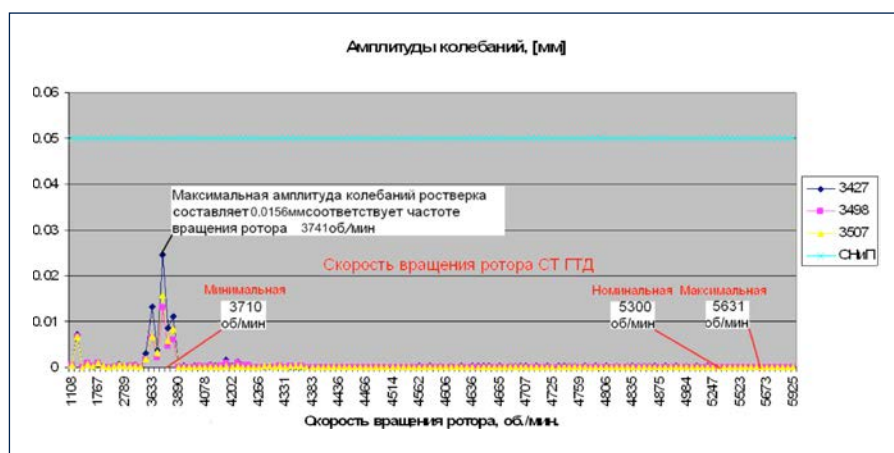
394055, г. Воронеж,  
ул. Ворошилова, 22,  
тел.: (473) 234-87-49, 234-82-73,  
e-mail: 348168@rambler.ru,  
www.vmpzrn.ru

Таблица 7. Сравнение максимальных амплитуд колебаний

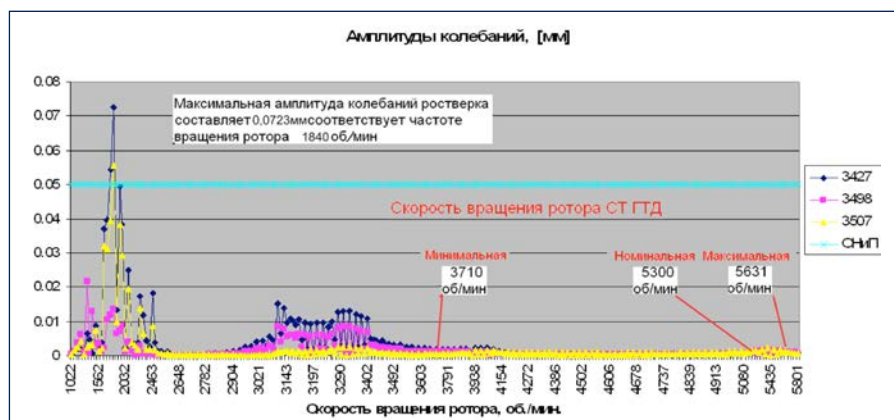
Вариант температурного состояния грунтового массива по таблице 8	Максимальная амплитуда, мм	Скорость вращения ротора, об./мин.
Вариант № 1	0,01565	4337
Вариант № 2	0,02449	3745
Вариант № 3	0,07267	1840



а) амплитуды колебаний узлов ростерка для 1-го варианта грунтового основания – зима



б) амплитуды колебаний узлов ростерка для 1-го варианта грунтового основания – лето



в) амплитуды колебаний узлов ростерка для 1-го варианта грунтового основания – лето в сочетании с аварийной ситуацией (большое выделение тепла)

Рис. 8. Графики изменения амплитуд колебаний ростерка

Из рисунка 8 и таблицы 7 можно сделать вывод, что традиционные типы массивных фундаментов под ГПА отличаются высокой надежностью, это достигается за счет их большой массы. Амплитуды колебаний фундамента в диапазоне скоростей вращения ротора от 3710 до 5631 об./мин. не превышают требования СНиП 2.02.05-87 – 0,05 мм. Нужно отметить, что применение массивных фундаментов в северных регионах страны нецелесообразно из-за их дороговизны, сравнение массивных и легких типов фундаментов приведено в работе [1]. Усовершенствованная модель грунтового основания позволяет моделировать оптимальные облегченные конструкции фундаментов. В работе [1] приведен пример моделирования легкого немассивного ростерка под ГПА. Усовершенствованная модель грунтового основания позволяет прогнозировать практически любую аварийную ситуацию (снижение несущей способности мерзлых грунтов в результате выхода из строя сезонно-охлаждающих устройств, локальные разрушения ростерка, разрушение вертикальных или горизонтальных расколов, выход из строя одной или нескольких свай, локальное уменьшение жесткости группы свай или уменьшение жесткости всех свай, входящих в состав ростерка) [1]. На рисунке 9 изображены амплитуды колебаний грунтового массива (для 3-го варианта температурного состояния по таблице 6), соответствующие минимальной, номинальной и максимальной скоростям вращения ротора ГПА.

На сегодняшний день в строительных нормах нет единых методов расчета, учитывающих возможные аварийные ситуации. В работе [1] предложены основные положения для моделирования грунтового основания и проектирования фундаментов с учетом возможных аварийных ситуаций.

Результаты моделирования позволяют разработать эффективные мероприятия по улучшению условий труда обслуживающего персонала ГПА (снижение вредных вибраций на рабочих местах). Выполнение данных решений позволяет обеспечить надежную службу сооружений в течение всего срока эксплуатации.

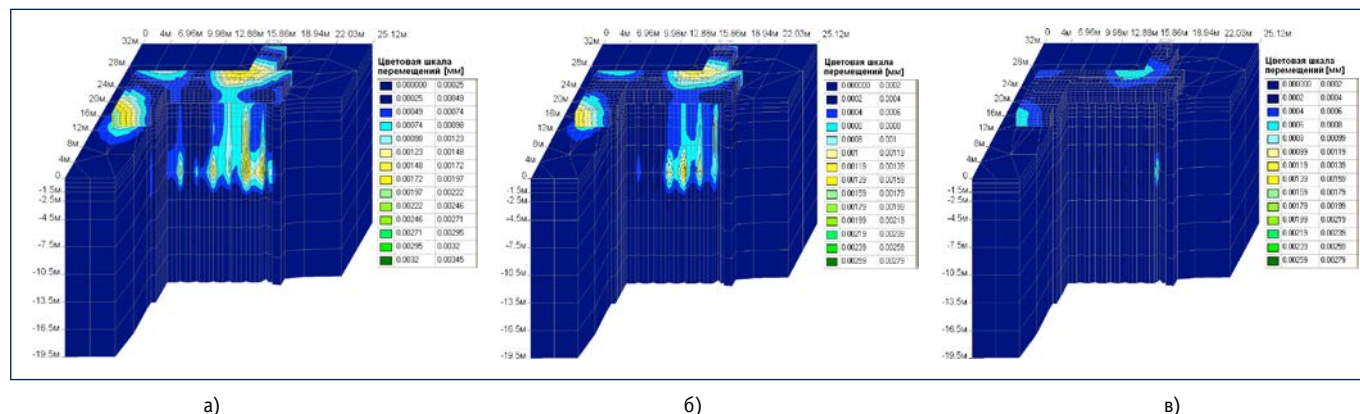


Рис. 9. Распространение амплитуд колебаний в грунтовом массиве для минимальной, номинальной и максимальной скоростей вращения ротора ГПА  
 а) расчетные амплитуды колебаний ростверка и грунтового массива, мм, при скорости вращения ротора 3710 об./мин.  
 б) расчетные амплитуды колебаний ростверка и грунтового массива, мм, при скорости вращения ротора 5300 об./мин.  
 в) расчетные амплитуды колебаний ростверка и грунтового массива, мм, при скорости вращения ротора 5631 об./мин.

#### Литература:

1. Козлов С.И., Тюрин М.А. Применение легких проветриваемых фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях Ямальной группы месторождений // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2013. – № 10.
2. СНиП II-Б.7-70 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками».
3. СНиП 2.02.05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками».
4. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. – М.: Стройиздат, 1964.
5. Корнев Б.Г. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984.
6. Тарануха Н.А., Журбин О.В., Журбина И.Н. Исследование колебаний судовых стержневых конструкций с учетом сопротивления внешней среды различной плотности // Избранные доклады 3-й Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2011.
7. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1973.

UDC 624.151

**М.А. Тюрин**, postgraduate in specialty 05.02.13 «Machines, units and processes in the oil and gas industry», Gazprom VNIIGAZ LLC, Engineer of Category 1, Construction Department of VNIPIgazdobycha JSC, e-mail: mihail0710@yandex.ru

### Analysis of the calculation methods of foundations under gas pumping units at compressor plants in complicated geological conditions

*The article includes benchmarking of the existing methods of dynamic analysis of foundations under gas pumping units (GPU). Main theories of construction standards for calculation and design of foundations under GPU are studied. The improved model of soil foundation that enables to take into account strong non-homogeneity of the soil foundation was developed. The improved model enables to forecast any emergencies related to melting of frozen ground. Change of foundations vibration during GPU operation was analyzed taking into account change of frozen ground stiffness as a result of its seasonal melting and freezing cycles, as well as possible emergencies related to high heat emission.*

**Keywords:** gas pumping unit (GPU), foundation, soil foundation, frozen ground, rotor rpm, dynamic loads, vibration amplitudes, stiff resistance of the foundation, damping, emergencies.

#### References:

1. Kozlov S.I., Tyurin M.A. Primenenie legkikh proventrivaemykh fundamentov pod GPA na kompressornykh stantsiyakh v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh Yamal'skoi gruppy mestorozhdeniy (Use of light ventilated foundations under gas pumping units at compressor plants in complicated geological conditions of Yamal fields group) // NEFTEGAZ Territory. – 2013. – No. 10.
2. SNiP II-B.7-70 «Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami» («Foundations of machines with dynamic loads»).
3. SNiP 2.02.05-87 «Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami» («Foundations of machines with dynamic loads»).
4. Savinov O.A. Sovremennye konstruksii fundamentov pod mashiny i ikh raschet (Modern structures of foundations under machines and their calculation). – Moscow: Stroyizdat, 1964.
5. Korenev B.G. Dinamicheskiy raschet sooruzheniy na spetsial'nye vozdeystviya (Dynamic analysis of structures in terms of special influence). – Moscow: Stroyizdat, 1984.
6. Taranukha N.A., Zhurbina O.V., Zhurbina I.N. Issledovanie kolebaniy sudovykh stержnevyykh konstruksiy s uchedom soprotivleniya vneshei sredy razlichnoi plotnosti (Study of vibrations of ship frame structures taking into account resistance of the external environment of various density) // Selected reports of the Third Sakhalin Regional Marine Scientific and Technical Conference. – Yuzhno-Sakhalinsk: Publishing House of Sakhalin State University, 2011.
7. Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov (Mechanics of frozen ground): instruction aid. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1973.