

С.И. Козлов, д.т.н., ООО «Газпром ВНИИГАЗ»; **М.А. Тюрин**, инженер 1-й категории строительного отдела, ОАО «ВНИПИгаздобыча», e-mail: mihail0710@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКИХ ПРОВЕТРИВАЕМЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПОД ГПА НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЯМАЛЬСКОЙ ГРУППЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В статье рассматриваются инновационные технические решения по строительству фундаментов под газоперекачивающие агрегаты (ГПА) в сложных климатических условиях полуострова Ямал. В работе обосновывается экономическая выгода от применения легких фундаментов под ГПА, их преимущества по сравнению с массивными фундаментами, традиционно возводимыми в средней полосе страны. Разработана усовершенствованная модель грунтового основания для легких типов фундаментов под ГПА, учитывающая неоднородности грунтового основания при выполнении динамического расчета. Изучается проблема отсутствия в строительных нормах единой методики расчета фундаментов ГПА с учетом требования Федерального закона № 384. Разработаны основные положения единой методики расчета фундаментов ГПА с учетом возможных аварийных ситуаций, авторы статьи считают нужным включить эти положения в строительные нормы.

Ключевые слова: Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), полуостров Ямал, газоперекачивающий агрегат (ГПА), требования к «механической безопасности», прогрессирующее обрушение, динамические нагрузки, легкий фундамент, массивный фундамент, грунтовый массив, ростверк, аварийная ситуация, амплитуда колебаний, Федеральный закон № 384.

Добыча углеводородного сырья в настоящее время смещается в зону вечномерзлых грунтов полуострова Ямал [1]. Реализация крупных нефтегазовых проектов XXI в. представляет собой масштабное строительство различных объектов на территориях, не имеющих аналогов по степени сложности геологических условий. Грунты полуострова повсеместно значительно засолены. При повышении температуры несущая способность таких грунтов существенно изменяется даже в отрицательном диапазоне температур [1].

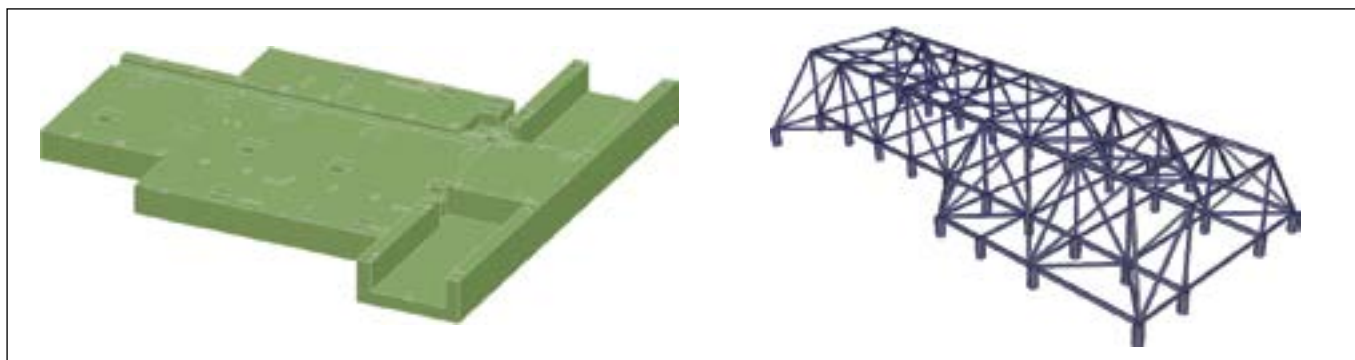
На Ямале высок уровень паводкового подтопления [1], поэтому на площадках обустройства Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) создают искусственные

насыпи высотой 3,5–7 м. 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.

Сооружения газового комплекса в зоне многолетнемерзлых пород строятся с сохранением их оснований в мерзлом состоянии. Основным типом фундаментов является свайный. Надежность 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.

Проветриваемое подполье рассеивает теплоту, которая выделяется наружу через пол отапливаемых зданий и сооружений и тем самым обеспечивает сохранность мерзлых грунтов оснований. Под зданиями проветриваемое подполье устраивается в виде цоколя со специальными отверстиями для пропуска воздуха или в виде открытого подполья.

Вертикальные сезонно охлаждающие устройства состоят из парожидкостных термосифонов, называемых термостабилизаторами. Испарительная часть горизонтальной системы охлаждения располагается на поверхности коренного грунта или выравнивающего слоя (полиэтиленовые трубы). За пределами строительной площадки располагаются конденсаторные блоки.



а)

б)

Рис. 1. Фундаменты под ГПА
а) массивный ж/б фундамент; б) легкий проветриваемый фундамент

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 четкие рекомендации и методики расчета на прогрессирующее обрушение.

Прогрессирующее обрушение относится к ситуации, когда разрушение или повреждение какой-либо малой части конструкции ведет к полному или почти полному разрушению всей конструкции. Поскольку невозможно полностью исключить вероятность возникновения аварийных ситуаций, вызванных деятельностью человека (взрывы газа, теракты, пожары, наезды транспорта и т.д.) или природными явлениями (землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований), необходимо обеспечивать определенную степень безопасности находящихся в зданиях людей и сохранность их имущества за счет уменьшения вероятности разрушения несущих конструкций.

При помощи численного моделирования можно оценить устойчивость конструкции к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения.

В умеренной климатической зоне фундаменты под ГПА строятся массивными (рис. 1а). Вибрации и динамические нагрузки гасятся за счет массы фунда-

Таблица 1. Сравнение массивных и легких проветриваемых фундаментов под ГПА

Массивные ж/б фундаменты	Легкие проветриваемые фундаменты
1. Свайное основание не проветривается	1. Свайное основание проветривается
2. В условиях низких температур проведение бетонных работ (сырых процессов) и возведение массивных железобетонных ростверков связаны с большими трудозатратами	2. Для возведения стального ростверка бетонные работы (сырые процессы) не требуются
3. Большая материалоемкость (суммарная масса бетона на один ростверк – 200–250 т)	3. Сравнительно не большая материалоемкость (суммарная масса всего ростверка – менее 20–25 т)
4. Удаленность и слабо развитая инфраструктура месторождений увеличивают стоимость транспорта строительных материалов	4. Затраты на транспорт строительных материалов до места строительства в 8–10 раз меньше
5. В соответствии с СНиП 2.02.05-87 п. 1.41, «расчет вертикальных и горизонтальных колебаний массивных фундаментов <...> производить не следует»	5. Легкие проветриваемые фундаменты, в соответствии с классификацией СНиП 2.02.05-87, не относятся к массивному типу

мента. В условиях Ямальской группы месторождений из-за большой материалоемкости и значительных трудозатрат экономически невыгодно строительство массивных железобетонных фундаментов под ГПА (табл. 1). Более целесо-

образно в таких условиях применять новые типы фундаментов (рис. 1б). Легкие проветриваемые фундаменты не относятся к массивному типу фундаментов, поэтому требуется глубокий анализ на предмет воздействия дина-

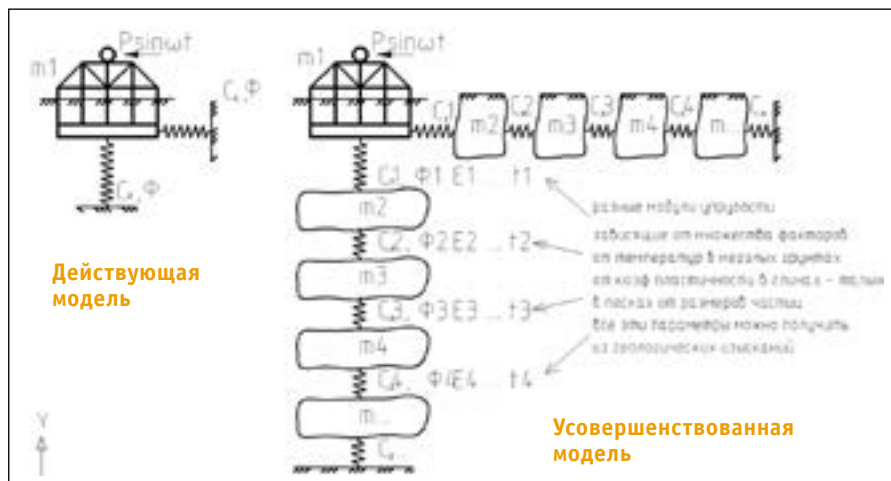


Рис. 2. Расчетные схемы действующей и усовершенствованной моделей

Таблица 2. Принятые допущения

№	Действующая модель	Усовершенствованная модель
1	Тела машин и фундаментов абсолютно твердые	Учитывается жесткость опорных частей машины, жесткость фундамента
2	Основание упругое и лишенное массы	Основание упругое и обладающее массой
3	Рассматривается только верхний слой основания с учетом модуля затухания Φ	Основание разбивается на несколько слоев. Каждый слой обладает своей жесткостью C , своей массой m и своим модулем затухания Φ
4	Модуль затухания имеет одно постоянное «усредненное значение»	Модуль затухания имеет разные значения в зависимости от того, насколько неоднородно основание
5	Центр масс фундамента совпадает с осями приложения периодических нагрузок по осям X, Y, Z . Фактическое отклонение оси приложения периодических нагрузок учитывается вводом возмущающего момента относительно центра тяжести фундамента	Центр масс фундамента не совпадает с осью приложения периодических нагрузок. Неравномерность приложения периодических нагрузок учитывается разбиением на слои по вертикали и горизонтали

Таблица 3. Величины модуля упругости различных грунтов, бетона и стали

Вид грунтов	Модуль упругости грунта $E_{г,р}$ кг/см ²	Модуль упругости бетона $E_б$ кг/см ²	Модуль упругости стали $E_{ст}$ кг/см ²	$\frac{E_б}{E_{г,р}}$	$\frac{E_{см}}{E_{г,р}}$
Песчаные	400–1000			150–1000	2100–5250
Глинистые:		190 000–400 000	2 100 000		
• пластичные	200–800			200–2000	2625–10500
• полутвердые и твердые	800–3000			50–500	700–2625

мических нагрузок с учетом возможных аварийных ситуаций. Напомним, что в соответствии с п. 1,20 СНиП2.02.05-87 горизонтальная амплитуда колебаний ростверка под ГПА при номинальной частоте вращения ротора > 1500 об./мин. не должна превышать 0,05 мм. В методиках расчета таких конструкций на динамические нагрузки в трудах Н.П. Павлюка [5], Савинова [4] и многих других авторов вводятся следующие допущения:

1) тела машин и фундаментов рассматриваются как абсолютно твер-

дые тела (это обусловлено тем, что величина модуля упругости бетона и стали в сотни и тысячи раз превосходит величину модуля упругости различных грунтов);

2) основание считается упругим и лишенным массы;

3) центр масс фундамента совпадает с осью приложения периодических нагрузок по осям X, Y, Z .

С учетом этих допущений динамический расчет массивных фундаментов сводился к задаче о колебаниях твердого тела на упругом основании. Колебания

рассматриваемого вида, например, по оси Y без учета затухания, описывается дифференциальным уравнением:

$$m \cdot y'' + C_y y = P,$$

где $y = A_y \sin \omega t$ – отклонение тела от равновесного положения по направлению оси Y в любой момент времени t ; ω – частота вынужденных колебаний, [1/сек];

$P_y = P_y \sin \omega t$ – возмущающая периодическая сила, [кг·м/сек²];

$m = c/\lambda_y^2$ – масса системы, [кг];

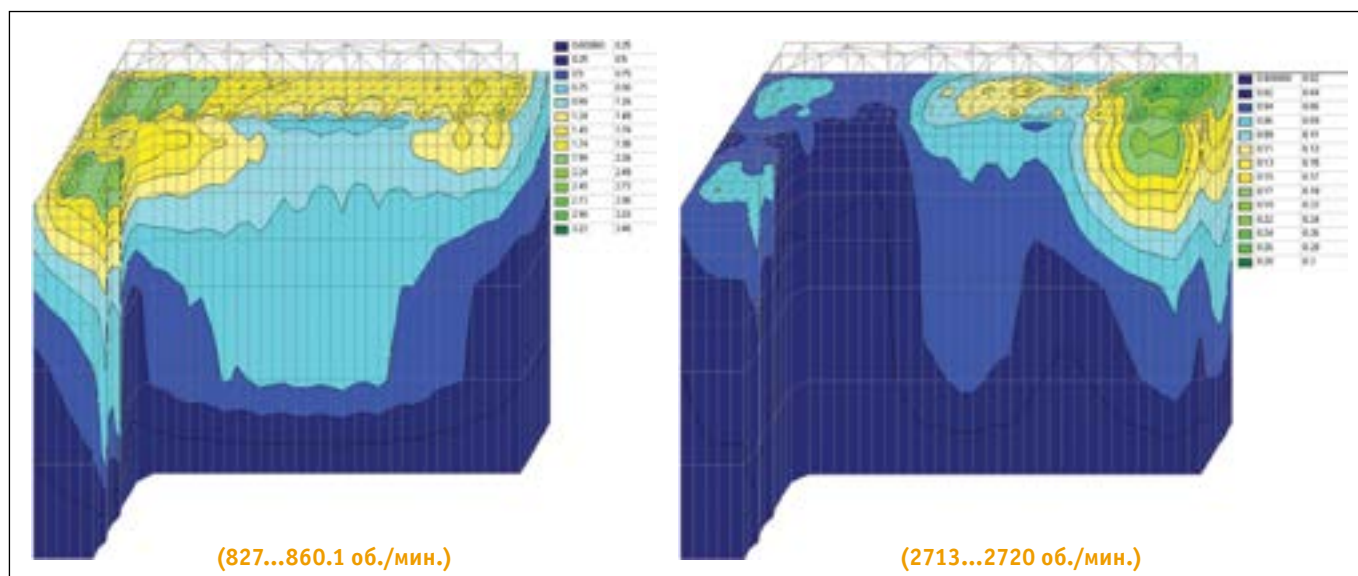


Рис. 3. Амплитуды колебаний частиц грунтового массива, создаваемые работой ГПА

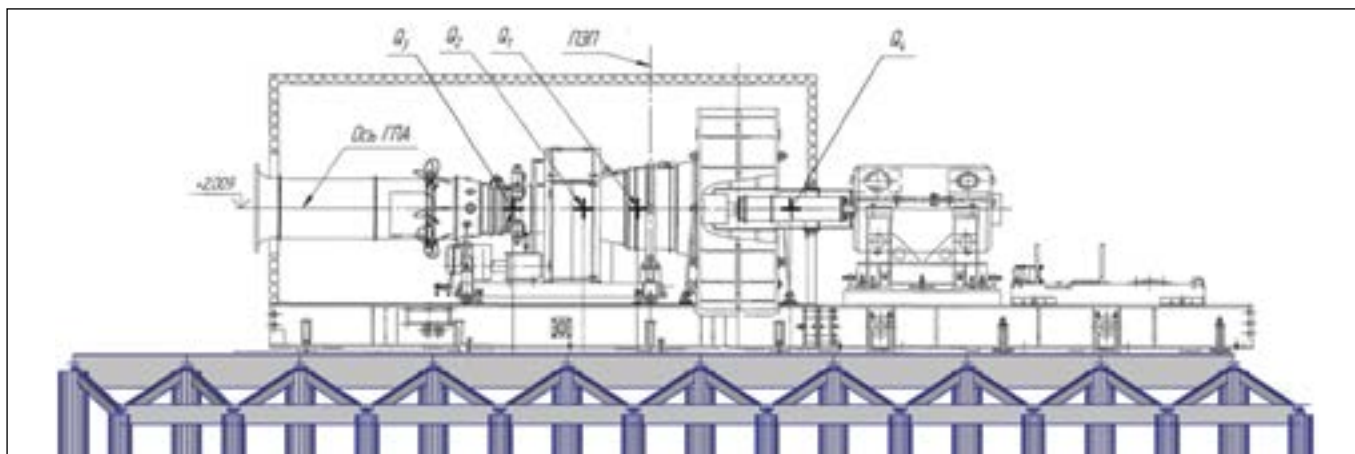


Рис. 4. Схема расположения ГПА на верхней плите стального ростверка

$C_y = \lambda y^2 m$ – коэффициент жесткости системы,

$$\frac{\text{кг}}{\text{сек}^2};$$

$\lambda_y = \sqrt{\frac{C_y}{m}}$ – частота свободных гармонических колебаний тела,

$$\frac{1}{\text{сек}};$$

Выражение для реакции грунтового основания без учета затухания будет [4]:

$$R_y = -Q - C_y \cdot y,$$

где $Q = mg$ – вес тела, кг·м/сек².

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

Н.П. Павлюк предложил зависимость между равнодействующей реакцией упругого основания и перемещениями фундамента принимать в виде [5]:

$$R_y = C_y(y + \Phi y'), \left[\frac{\text{кг}}{\text{сек}^2} \left(\text{м} + \text{сек} \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right) = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}^2} = \text{Н} \right],$$

$$L = C_\psi(\psi + \Phi \psi'), \left[\text{Н} \cdot \text{м} \left(\text{рад} + \text{сек} \frac{\text{рад}}{\text{сек}} \right) = \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{рад} \right],$$

где Φ – постоянный коэффициент (модуль затухания), характеризующий неупругие сопротивления основания перемещением фундамента, в сек.

Уравнение вынужденных поступательных колебаний с учетом модуля затухания Φ по оси Y будет иметь вид:

$$m \cdot y'' + \Phi \lambda_y^2 y' + C_y y = P.$$

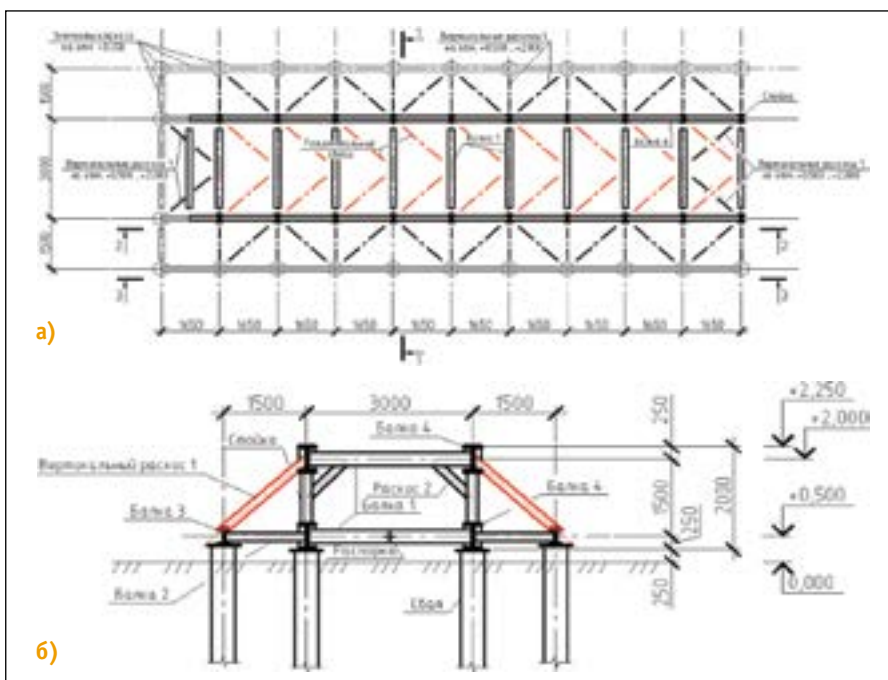


Рис. 5. Конструкция ростверка

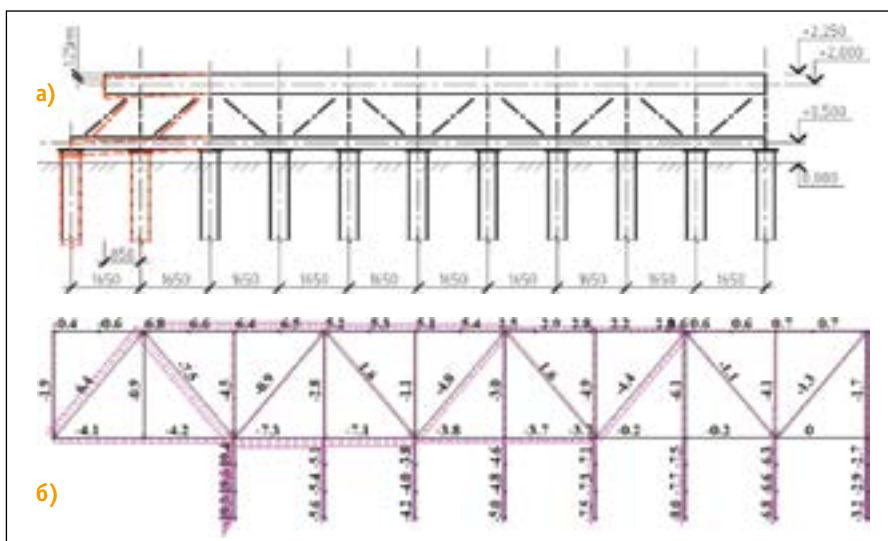
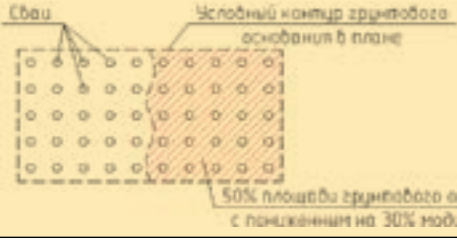
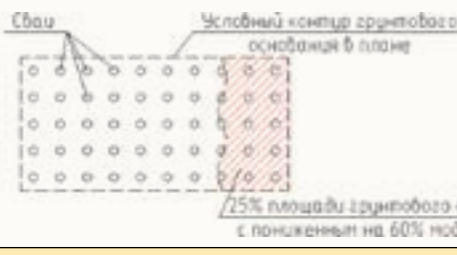
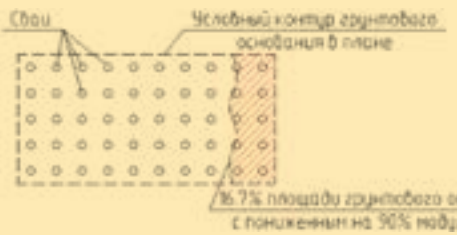


Рис. 6. Потеря несущей способности шести свай в результате локального растепления грунтового основания:
а) вертикальные деформации ростверка с неработающими шестью сваями;
б) усилия в элементах ростверка – аварийная ситуация

Таблица 4. Основные положения для выполнения расчета на возможные аварийные ситуации

Основные положения	Методология выполнения расчета
1. Возможные аварийные ситуации (сценарии), которые нужно учитывать на стадии проектирования	Сценарий № 1 – потеря несущей способности 15% свай от общего количества свай, входящих в состав ростверка
	Сценарий № 2 – потеря несущей способности 15% элементов структурной конструкции ростверка, т.е. потеря несущей способности 15% наклонных раскосов от общего количества, 15% горизонтальных связей от общего количества, 15% вертикальных стоек от общего количества
	Сценарий № 3 – совмещений 1-го и 2-го сценариев в различных пропорциях. Например, потеря несущей способности 5% свай и 10% элементов структурной конструкции ростверка. Или потеря несущей способности 11% свай и 4% элементов структурной конструкции ростверка
	Сценарий № 4 – общее ослабление всех элементов структурной конструкции ростверка и всех свай в составе ростверка на 15%. Ослабление элементов выполняется путем уменьшения площади поперечного сечения профилей. Например, для металлических свай из труб диаметром 426 мм с толщиной стенки 10 мм ослабление на 15% означает, что труба должна приниматься с толщиной стенки 8,5 мм. Аналогичная операция выполняется для любых других профилей металлопроката: например, у двутавров должны уменьшаться на 15% соответственно толщина стенки и толщина полки
	Сценарий № 5.1 – уменьшение на 15% модуля деформации грунтов основания
	Сценарий № 5.2 – уменьшение на 30% модуля деформации для 50% площади грунтового основания в плане 
	Сценарий № 5.3 – уменьшение на 60% модуля деформации для 25% площади грунтового основания в плане 
Сценарий № 5.4 – уменьшение на 90% модуля деформации для 16,7% площади грунтового основания в плане 	

Уравнение вынужденных крутильных колебаний с учетом модуля затухания Φ относительно вертикальной оси будет иметь вид:

$$\theta \cdot \psi^n + \Phi \lambda_{\psi}^2 + C_{\psi} \psi' = M,$$

где $\psi = A_{\psi} \sin \omega t$ – угол поворота тела относительно вертикальной оси при колебаниях в любой момент времени t ; ω – частота вынужденных колебаний, [1/сек];

$M_{\psi} = M_{\psi} \sin \omega t$ – возмущающий периодический момент пары сил, [Н·м=кг·м²/сек²];

$\theta = m \cdot l^2$ – момент инерции массы тела относительно вертикальной оси, [кг·м²];

$C_{\psi} = \lambda_{\psi}^2 \theta$ – коэффициент жесткости системы при повороте в горизонтальной плоскости, [Н·м=кг·м²/сек²];

$\lambda_{\psi} = \sqrt{\frac{C_{\psi}}{\theta}}$ – угловая частота свободных гармонических колебаний тела,

$$\sqrt{\frac{H \cdot m}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{сек}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2}} = \sqrt{\frac{1}{\text{сек}^2}} = \frac{1}{\text{сек}}.$$

В соответствии со СНиП 2.02.05-87, амплитуды колебаний ростверка определяются как сумма поступательных и крутильных колебаний:

$$a_{h,\psi} = a_x + a_{\psi} l_{br}$$

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

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

a_{ψ} – амплитуда (угол поворота, рад.) крутильных колебаний верхней плиты относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести:

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

где ω – частота вращения машины, с⁻¹, $\omega = 0,105 \cdot n_r$,

n_r – частота вращения машины (ротора свободной турбины, ротора нагнетателя).

Модуль затухания Φ основания для расчетной модели в строительных нормах имеет усредненное значение по глубине или постоянное значение, соответствующее верхнему слою основания. Это допущение может привести к погрешностям в вычислении колебаний.

На самом деле при неоднородном основании модуль затухания Φ сильно

зависит от подстилающих нижележащих слоев, тогда как в действующей модели модуль затухания принимается только для верхнего слоя грунтового массива (при этом неизвестно, какая толщина верхнего слоя должна учитываться и что делать, когда основание сильно неоднородное).

Моделирование свайных ростверков на мощных искусственных основаниях значительно усложняется особенностями грунтовых (засоленные и льдистые грунты) и климатических (опасность растепления мерзлых грунтов) условий полуострова Ямал. Грунты – это неоднородная среда, хорошо работающая на сжатие и плохо работающая на растяжение, и очень сложно предсказать, как грунты будут себя вести при воздействии динамических нагрузок.


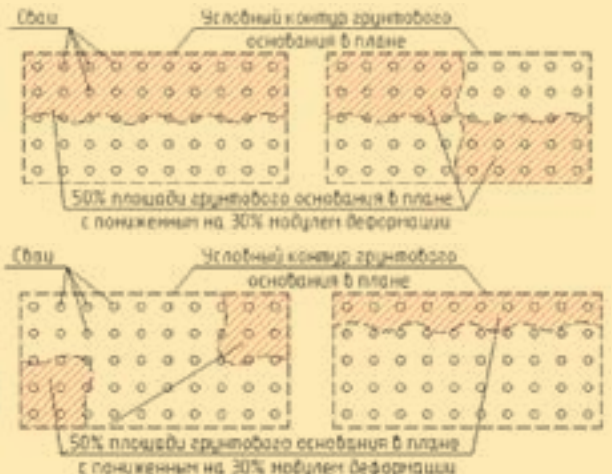
Для учета неоднородности грунтового основания требуется новый подход к моделированию (рис. 2). В усовершенствованной модели грунтовой массив обладает упругими свойствами и массой. В таблице 2 приведены основные допущения, принимаемые для действующей модели и предлагаемой усовершенствованной модели.

Усовершенствованная модель 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, массе, по упругим свойствам и модулям затухания (табл. 3, рис. 2).

Усовершенствованная модель грунтового основания учитывает рассеивание энергии вибраций в неоднородном грунтовой 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 грунтовой массиве (вибрации, создаваемые работой ГПА) на соседние сооружения, технологическое оборудование и обслуживающий персонал (рис. 3).

Поскольку турбоагрегаты ГПА создают значительные динамические нагрузки (масса вращающегося ротора – 500–1500 кг, частота вращения – 3000–

Продолжение Таблицы 4. Основные положения для выполнения расчета на возможные аварийные ситуации

Основные положения	Методология выполнения расчета
	<p>Сценарий № 5.5 – уменьшение на 100% модуля деформации для 15% площади грунтового основания в плане</p> 
<p>1. Возможные аварийные ситуации (сценарии), которые нужно учитывать на стадии проектирования</p>	<p>Сценарий № 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 и т.д. – комбинирование сценариев № 5.1–5.5 в различных пропорциях</p> 
	<p>Сценарий № 6 – повышение расчетной температуры на 1 °С для грунтов, находящихся в мерзлом состоянии. Например, если в соответствии с инженерно-геологическими изысканиями и расчетом температурного состояния грунтового основания на глубине 5 м от уровня планировки расчетная температура грунтового массива составляет –2,5 °С, то для аварийной ситуации температура должна применяться $T = -2,5 + 1 = -1,5$ °С</p>
	<p>Сценарий № 7 – увеличение слоя СТС (сезонно талый слой), СМС (сезонно мерзлый слой) на 50% от расчетного. Например, если в летний период мерзлые грунты оттаивают на 2 м вглубь от уровня планировки, то при учете аварийной ситуации следует учитывать, что глубина оттаивания может увеличиться до 3 м</p>
	<p>Сценарий №8 – ударная нагрузка от взрывной волны. Нагрузки должны учитываться в горизонтальном, вертикальном и наклонном направлениях. Приоритет должен отдаваться направлению нагрузки, в котором жесткость фундамента минимальна по сравнению с другими направлениями приложения нагрузки</p>
	<p>Примечание: 1. Для сценариев № 1–3 при выборе элементов (свая, раскос, стойка и др.), которые необходимо выключать из работы, приоритет нужно отдавать наиболее нагруженным, в которых появляются максимальные усилия при нормальных условиях эксплуатации сооружения. Расчет должен выполняться в две стадии. Стадия № 1 – определение максимальных расчетных усилий в элементах конструкции при нормальной (не аварийной) эксплуатации сооружения. Стадия № 2 – моделирование аварийной ситуации при помощи выключения из работы 15% наиболее нагруженных элементов конструкции (для сценария № 1 – это 15% наиболее нагруженных свай, для сценария № 2 – 15% наиболее нагруженных вертикальных связей, горизонтальных связей, стоек и распорок, для сценария № 3 – это комбинирование сценариев № 1 и 2 в различных пропорциях)</p>

Окончание Таблицы 4. Основные положения для выполнения расчета на возможные аварийные ситуации

Основные положения	Методология выполнения расчета
2. Нагрузки для аварийных ситуаций	Необходимо учитывать три типа нагрузок: 1. Ударные динамические нагрузки, например удар от взрывной волны для сценария № 8. 2. Статические нагрузки, т.е. нагрузки, действующие на конструкцию уже после ее частичного разрушения для сценариев № 1–7. 3. Динамическая нагрузка, которая создается работой технологического оборудования (вращающийся ротор ГПА) для сценариев № 1–7.
3. Прочностные характеристики материалов, работа стальных конструкций за пределами упругости	Для стальных конструкций нужно учитывать пластические деформации материала, т.е. расчетное «временное» сопротивление стали, работа металла за пределами упругости
4. Допустимые деформации верхней плиты ростверка, соответствующие нормальному режиму работы ГПА и аварийному	Допустимые деформации фундамента, соответствующие нормальному режиму работы ГПА. Суммарное отклонение верхней плиты фундамента под раму ГПА не должно превышать в вертикальном и горизонтальном направлениях $\Delta s < 10$ мм. Крен фундамента не должен превышать $\Delta s/L < 1/6000$. Допустимые деформации фундамента, соответствующие аварийному режиму работы ГПА. Суммарное отклонение верхней плиты фундамента под раму ГПА не должно превышать в вертикальном и горизонтальном направлениях $\Delta s < 10$ мм. Крен фундамента не должен превышать $\Delta s/L < 1/6000$. Требования к предельно допустимым амплитудам колебаний верхней плиты поврежденного фундамента – в соответствии с требованиями п. 1,20 СНиП2.02.05-87.
	Примечание: Условные обозначения: L – размеры фундамента в плане, его длина или ширина; Δs – смещение от проектного положения любой точки верхней плиты фундамента; $\Delta s/L$ – крен фундамента, отношение максимального перемещения угловой или крайней точки фундамента к его длине.

9000 об./мин.), требуется выполнять динамический расчет ростверка на определение амплитуд колебаний с учетом возможных аварийных ситуаций (снижение несущей способности мерзлых грунтов в результате растепления, локальные разрушения вертикальных или горизонтальных расколов, выход из строя одной или нескольких свай).

На основе «усовершенствованной модели грунтового основания» с целью выявления слабых мест конструкции моделировались аварийные ситуации:

- потеря несущей способности шести свай в составе ростверка (локальное растепление грунтового основания),
- локальные разрушения вертикальных или горизонтальных расколов.

Стальной ростверк представляет собой мощную геометрически не изменяемую пространственную конструкцию (рис. 5), которая передает колебания на грунтовый массив, за счет которого они гасятся (рассеивание энергии вибраций в грунтовом массиве). В горизонтальном направлении жесткость каркаса обеспечивается за счет работы горизонтальных связей (рис. 5а), в вертикальном – за счет работы вертикальных связей (наклонных расколов, рис. 5б).

На рисунке 6 представлен случай потери несущей способности шести свай в составе ростверка (в результате локального растепления грунтового основания). Крайняя левая часть ростверка висит на соседних сваях за счет работы наклонных расколов, провисание левой стороны ростверка не превышает 1,25 мм (рис. 6а).

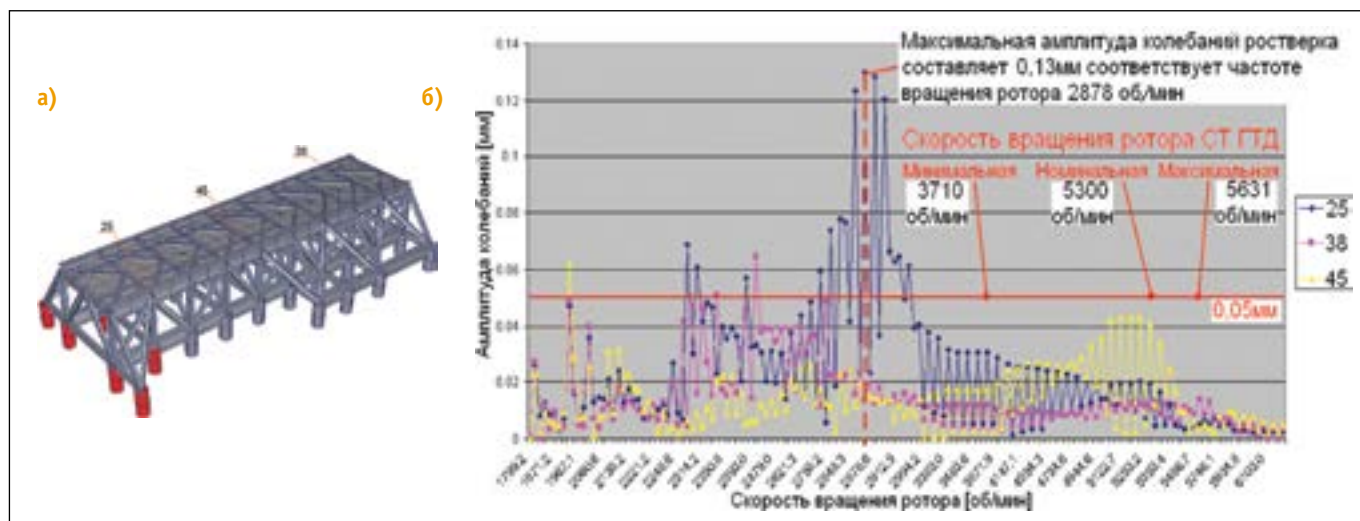


Рис. 7. Амплитуды колебаний ростверка с неработающими шестью сваями в диапазоне скоростей вращения ротора ГПА от 1799 до 5631 об./мин.

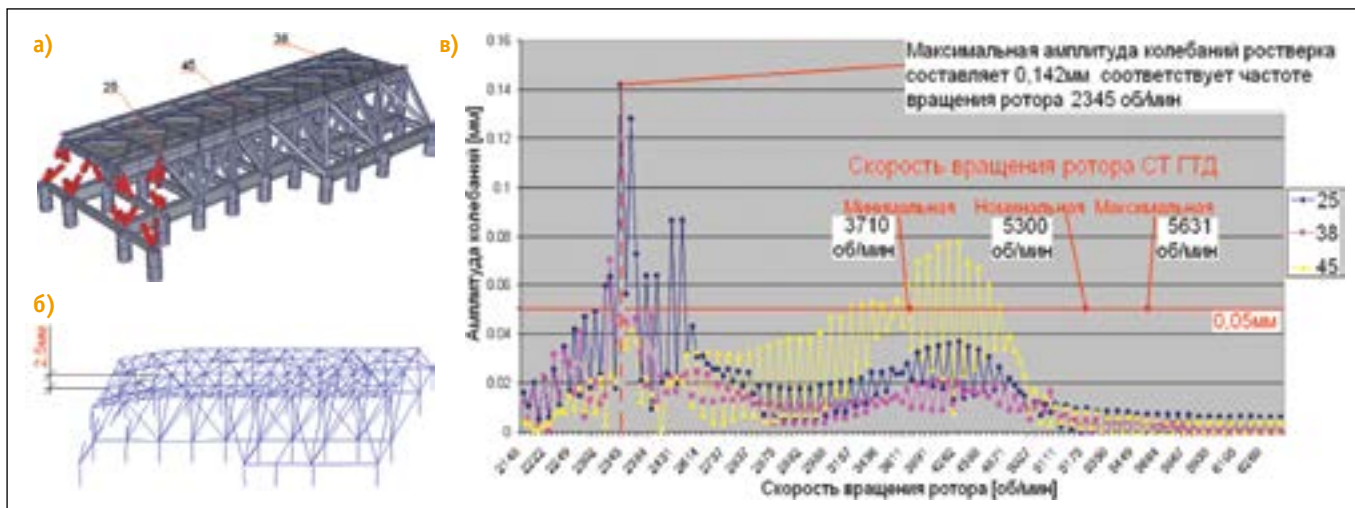


Рис. 8. Случай локального разрушения вертикальных и горизонтальных связей ростверга

После потери несущей способности шести свай в составе ростверга происходит перераспределение усилий. Максимальные сжимающие усилия в наклонных раскосах увеличиваются на 267% – с 2,8 до 7,5 т. Максимальные сжимающие усилия в сваях увеличиваются на 245% – с 8,1 до 19,9 т. За счет совместной работы элементов структурной конструкции усилия с вышедших из строя свай перераспределяются на оставшиеся неповрежденными

свай. Геометрическая неизменяемость и проектное положение верхней плиты ростверга обеспечиваются. Были определены амплитуды колебаний в трех точках (рис. 7а) верхней плиты ростверга для разных скоростей вращения ротора ГПА (рис. 7б, в диапазоне 1700–6103 об./мин.). Снижение общей жесткости стальной конструкции (потеря несущей способности шести свай в составе ростверга) не приводит к увеличению вибраций в рабочем

диапазоне частот вращения ротора ГПА 3710–5631 об./мин. Максимальная амплитуда колебаний, составляющая 0,13 мм, соответствует скорости вращения ротора 2878 об./мин. Она появляется в период разгона агрегата и исчезает уже при скорости вращения ротора 3000 об./мин. Таким образом, даже при локальном разрушении ростверга требования п. 1,20 СНиП 2.02.05-87 выполняются, горизонтальная амплитуда коле-

1 октября 2013 года ВМЗ исполнилось 85 лет!



Воронежский
механический
завод

- фонтанная арматура
- станции управления фонтанной арматурой (СУФА)
- комплекты модульной обвязки скважин
- оборудование для бурения на депрессии
- деспергаторы
- эжекторы



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

баний ростверка (при номинальной частоте вращения ротора 5300 об./мин.) не превышает 0,05 мм. В данной аварийной ситуации ГПА может продолжать работать в штатном режиме без остановки до устранения последствий аварии.

Был произведен анализ аварийной ситуации, связанной с локальным разрушением вертикальных и горизонтальных раскосов ростверка (рис. 8а). Провисание левой части ростверка составляет 2,5 мм (рис. 8б). Геометрическая неизменяемость и проектное положение верхней плиты ростверка обеспечиваются. Локальное разрушение раскосов и стоек незначительно увеличивает вибрации в рабочем диапазоне частот вращения ротора ГПА. При минимальной скорости вращения ротора 3710 об./мин. амплитуда колебаний ростверка 0,08 мм превышает оговоренные СНиП 0,05 мм, т.е. требования СНиП не выполняются. Но при номинальной скорости вращения ротора 5300 об./мин. амплитуда колебаний ростверка составляет 0,01 мм – требования СНиП выполняются (рис. 8в). В данной аварийной ситуации ГПА может продолжать работать в штатном режиме без остановки до устранения последствий аварии при условии, что скорость вращения ротора будет 5300 об./мин. и выше.

Усовершенствованная модель грунтового основания позволяет создавать оптимальные конструкции ростверков (с учетом массы и вязких свойств грунтового основания).

Модель позволяет прогнозировать практически любую возможную аварийную ситуацию (снижение несущей способности мерзлых грунтов в результате выхода из строя сезонно-охлаждающих устройств, локальные разрушения ростверка, разрушение вертикальных или горизонтальных раскосов, выход из строя одной или нескольких свай, локальное уменьшение жесткости группы свай или уменьшение жесткости всех свай, входящих в состав ростверка). Результаты моделирования позволяют разработать эффективные мероприятия по улучшению условий труда обслуживающего персонала ГПА (снижение вредных вибраций на рабочих местах). Однако на сегодняшний день в строительных нормах нет единых методов расчета, учитывающих возможные аварийные ситуации (Федеральный закон № 384). В строительных нормах нет допусков по предельно допустимым деформациям оснований под фундаменты ГПА.

Необходима единая методика расчета фундаментов ГПА, учитывающая требования ФЗ № 384, она должна регламентировать основные положения для выполнения расчета (табл. 4).

В момент аварии могут возникнуть локальные разрушения строительной конструкции, она деформируется, происходит изменение ее жесткости. На стадии проектирования инженеру нужно знать, при каких минимально допустимых деформациях технологическое оборудование может продолжать работать до устранения последствий аварии.

Необходимо отметить, что деформации фундамента могут быть равны нулю только в двух случаях:

- модуль упругости материала фундамента и грунтового основания будет равен бесконечности;
 - нагрузка на основание равна нулю.
- Обеспечить нулевые деформации основания в реальных грунтовых условиях – это нерешаемая задача.

Обеспечить малые, близкие к нулю деформации фундамента, не приводящие к серьезным последствиям, – задача вполне решаемая.

В таблице 4 оговорены допуски по предельно допустимым деформациям фундаментов ГПА, которые, по мнению авторов статьи, должны войти в строительные нормы.

Выполнение данных решений позволяет обеспечить надежную службу сооружений в течение всего срока эксплуатации.

Литература:

1. Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А., Бережной М.А. Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений // Геотехника. – 2010. – № 6.
2. Димов Л.А. Строительство зданий и сооружений ГТС на многолетнемерзлых грунтах в южной части Центральной и Восточной Сибири // Газовая промышленность. – 2009. – № 6.
3. СНиП 2.02.05-87 «Фундаменты машин с динамическими нагрузками».
4. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. – Стройиздат, 1964.
5. Павлюк Н.П. О колебаниях твердого тела, опирающегося на упругое основание: Сб. статей о вибрациях фундаментов. – Госстройиздат, 1933.

Constraction

S.I. Kozlov, Doctor of Engineering, Gazprom VNIIGAZ LLC; M.A. Tyurin, 1 Category Engineer of the Construction Department of VNIPIgazdobycha JSC, e-mail: mihail0710@yandex.ru

Use of light ventilated foundations under gas pumping units on compressor plants in complicated geological conditions of Yamal fields group

In article innovative technical solutions on construction of the bases under gas-distributing units (GPA) in difficult climatic conditions of the peninsula of Yamal are considered. The economic benefit locates in work from application of «the easy bases» under GPA, their advantage in comparison with the «massive» bases, traditionally erected in a country midland. The advanced model of the soil basis is developed for «easy types of the bases» under GPA. The advanced model of the soil basis considers heterogeneity of the soil basis at performance of dynamic calculation. The absence problem in construction norms of a uniform design procedure of the bases of GPA taking into account the requirement of the Federal law No. 384 is studied. Basic provisions of a uniform design procedure of the bases of GPA taking into account possible emergencies are developed, authors of article consider it necessary to include these provisions in construction norms.

Keywords: Bovanenkovskoe oil and gas-condensate field, the Yamal peninsula, gas pumping unit, requirements to «mechanical safety», progressive collapse, dynamic loads, light foundation, heavy foundation, soil body, grillage, emergency, amplitude of vibration, Federal Law No. 384.

References:

1. Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А., Березной М.А. Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений (Improving the management way of the ground base cryogenic resources for designing foundation works) // Geotechnics. – 2010. – № 6.
2. Dimov L.A. Stroitel'stvo zdaniy i sooruzheniy GTS na mnogoletnemerzlykh gruntakh v yuzhnoi chasti Tsentral'noi i Vostochnoi Sibiri (Construction of buildings and GTS constructions on long-term frozen soil in the southern part of the Central and Eastern Siberia) // Gas industry. – 2009. – № 6.
3. Construction Norms and Regulations 2.02.05-87 «Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami» («The bases of cars with dynamic loadings»).
4. Savinov O.A. Sovremennye konstruktzii fundamentov pod mashiny i ikh raschet (Modern designs of the bases under cars and their calculation). – Stroyizdat, 1964.
5. Pavlyuk N.P. O kolebaniyakh tverdogo tela, opirayutshegosya na uprugoe osnovanie (About fluctuations of a firm body leaning on the elastic basis): Collection of articles about vibrations of the bases. – Stroyizdat, 1933.