

Федеральное агентство по образованию

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

Л.Я.Стрижак

ФУНДАМЕНТЫ ПОД КОМПРЕССОРЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

2010

Л.Я.Стрижак Фундаменты под компрессоры,
Учебное пособие: СПб, 2010-10-22

Учебное пособие предназначено для выполнения самостоятельной работы на основании излагаемой методики проектирования фундамента под компрессоры.

Излагается подход к проектированию массивных фундаментов под поршневые компрессоры и рамных фундаментов для центробежных компрессоров. Приводятся примеры конструирования на основе монографии Савинова О.А. Фундаменты под машины. Основы проектирования. Л. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1955.

Предназначено для студентов пятого курса, изучающих дисциплину «Газокомпрессорные станции и цеха компрессии а рамках подготовки по специальности 070200 «Техника и физика низких температур», «Вакуумная и компрессорная техника физических установок» и направления 5522700 «Энергомашиностроение».

Табл.14. Ил.22. Библиогр. 1назв.

Фундаменты под компрессоры

При работе компрессора на него действует сложная система сил. Эти силы меняются во времени по величине и направлению, и являются причиной возникновения вибраций фундаментов. Вибрации фундаментов приводят к сотрясению грунтов, которые распространяются и передаются строениям окружающим компрессорную станцию.

Вибрации фундаментов могут служить причиной износа деталей, снижения производительности компрессора.

Под воздействием вибраций могут образовываться трещины в фундаментах машин и стен здания, усадка бетона, неравномерная осадка грунта.

Вибрации нарушают нормальную работу, затрудняют технологические процессы и вредно воздействуют на людей.

Главным средством борьбы с вибрациями является правильное устройство фундаментов под машины.

Классифицируя машины по принципу действия, их можно разделить на два класса:

- машины с динамическими нагрузками, при работе которых возникают значительные силы инерции, и
- машины спокойного действия, неуравновешенные силы инерции движущихся частей которых относительно невелики. В таблице 1 дана классификация энергетических машин по их воздействию на грунты.

Таблица 1

Группа машин	Вид главного движения	Типичные представители
Машины периодического действия (с установившимся движением)	А. Равномерное вращение	Турбоагрегаты (турбовоздуходувки, турбокомпрессоры, турбонасосы)
	Б. Равномерное вращение и связанное с ним возвратно-поступательное движение	Машины с кривошипно-шатунным механизмом (поршневые компрессоры и насосы, двигатели внутреннего сгорания)

Машины, роторы которых совершают равномерное вращение, являются теоретически полностью уравновешенными. На практике, однако, добиться полного совмещения центра масс тяжести ротора с геометрической осью вращения практически невозможно.

Возникающие неуравновешенные силы передаются на фундамент. Такая неуравновешенность называется статической неуравновешенностью, имеет обычно небольшое значение и учитывается при расчёте фундаментов.

Другой тип неуравновешенности возникает, если центр тяжести ротора совмещён с геометрической осью вращения, но сама ось вращения не совпадает ни с одной из главных осей вращающегося тела. Эта неуравновешенность называется динамической и является причиной возникновения неуравновешенной пары центробежных сил. Обычно эксцентриситет ничтожен по величине, но из-за высоких частот вращения современных машин силы оказываются значительными. Для турбокомпрессоров с равномерно вращающимися роторами неуравновешенные силы инерции меняются по синусоидальному закону. Для поршневых компрессоров с кривошипно-шатунными механизмами изменение сил инерции подчиняются более сложному закону. Он определяется суммой ряда составляющих с разными частотами.

По частоте вращения машины делятся на низкочастотные (до 1000 об/мин) и высокочастотные (больше 800-1000 об/мин).

Типы конструкций фундаментов под компрессоры

По конструкции фундаменты делятся на два основных вида – массивные (жёсткие) и рамные (с нежёстким верхним строением). Наиболее распространены массивные фундаменты.

Массивные фундаменты устанавливаются под большинство машин с кривошипно-шатунными механизмами (поршневые компрессоры), для турбокомпрессоров и насосов массивные фундаменты могут устраиваться с подвалом или без него. Фундаменты бесподвального типа наиболее распространены и применяются для машин, устанавливаемых на уровне самого нижнего этажа здания. Фундаменты подвального типа сильно развитую наземную часть, высота которой соответствует высоте нижнего этажа.

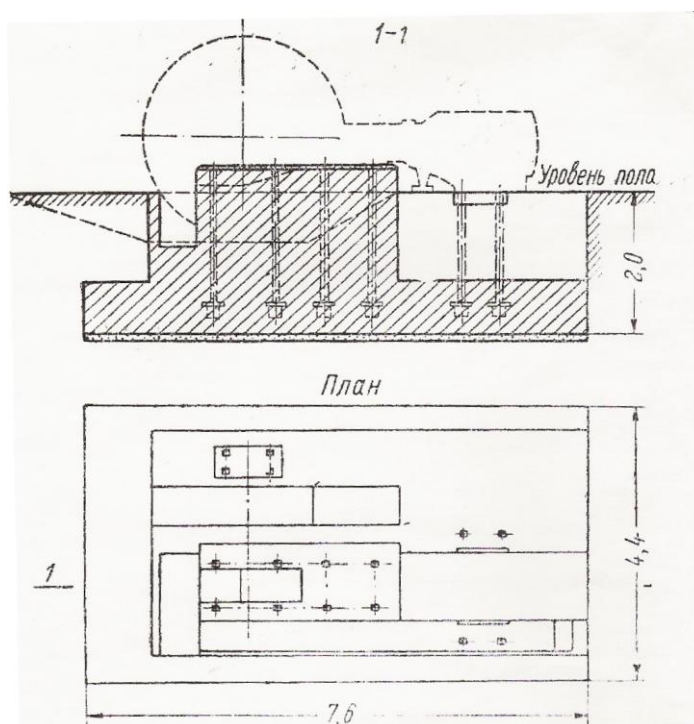


Рис.1. Фундамент под воздушный горизонтальный поршневой компрессор производительностью 35 м.куб/мин

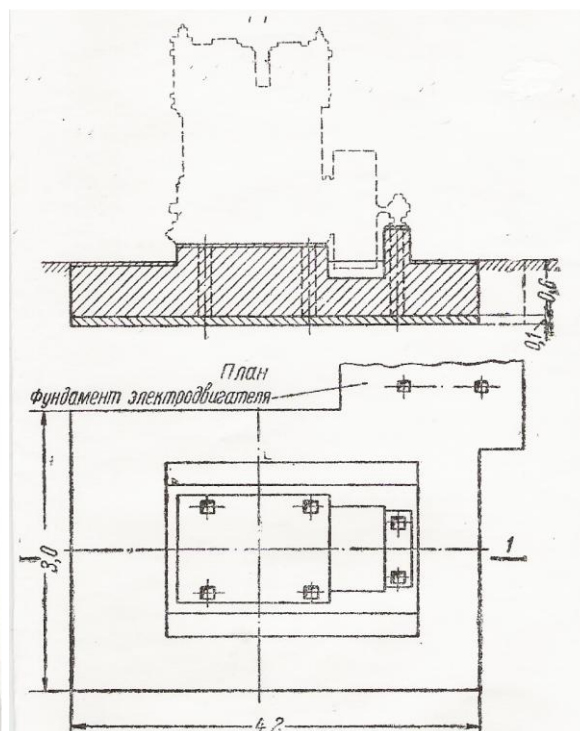


Рис.2. Фундамент в виде плиты под вертикальный двухцилиндровый компрессор производительностью 19 м.куб/мин

Фундаменты подвального типа делятся на фундаменты с массивной верхней частью и стеночные с верхним строением, образованным продольными или поперечными стенами. Общей особенностью массивных фундаментов является их большая жёсткость, что позволяет при расчётах рассматривать их как твёрдые тела.

На рис. 1 и 2 представлены конструкции фундаментов массивного бесподвального типа для горизонтального и вертикального компрессоров. Фундаменты представляют бетонные блоки сложной формы, верхний обрез которых совпадает с уровнем пола. Выемки и выступы позволяют удобно расположить машину и коммуникации, обеспечить эксплуатацию машины. Для крепления к фундаменту используются анкерные болты, закладываемые в специальные шахты. Нижняя часть фундамента представляет собой прямоугольную плиту, опирающуюся на грунт. Отличие фундамента бесподвального типа под вертикальный компрессор состоит в отсутствии глубоких выемок и отверстий, что позволяет выполнить его в виде плиты. Обрез фундамента совпадает с уровнем пола нижнего этажа. Электродвигатель устанавливается на

этом же фундаменте. Для возведения массивных фундаментов применяется армированный бетон.

Рамные фундаменты относятся к фундаментам подвального типа. Общей особенностью многогранного фундамента является наличие несущей пространственной многостоечной жёсткой рамы, которая стойками заделана в мощную опорную плиту, **рис.3**.

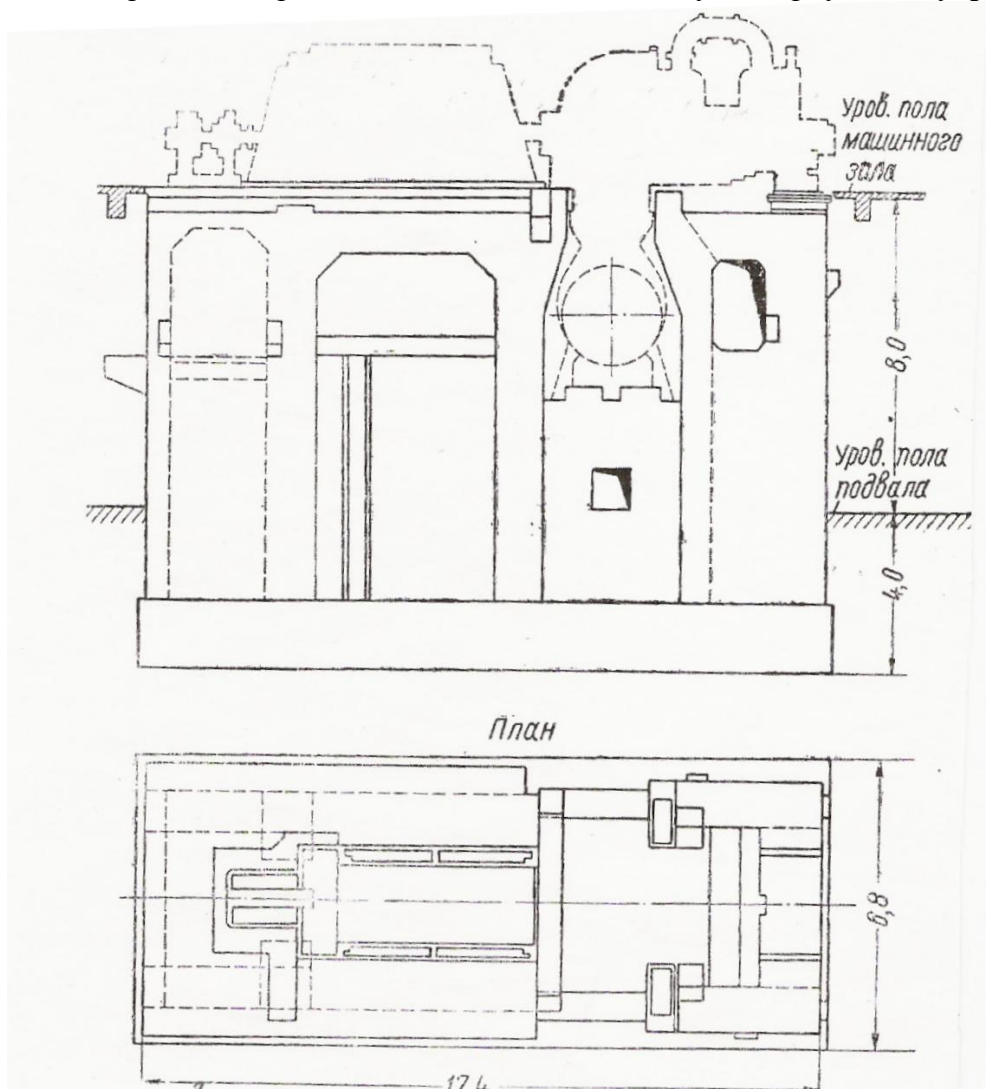


Рис.3. Рамный фундамент под турбогенератор мощностью 25000 квт

Горизонтальные элементы (продольные и поперечные ригели) предназначенные для организации площадки установки и обслуживания. Эти фундаменты применяются только для установки высокочастотных машин (турбокомпрессоры турбины). Пространственная рама, **рис. 4**, образуется обычно поперечными П-образными рамами, ригеля которых поддерживают подшипники агрегата. Поперечные рамы связаны между собой в узлах продольными ригелями. В большинстве случаев конструктивное исполнение верхнего строения рамных фундаментов включает элементы не только рамной конструкции, но и участки стен и т.д. Материалом для возведения рамных фундаментов используется железобетон. Иногда верхнее строение выполняется из металла, **рис. 5**. Часто оказывается целесообразным выполнение конструкции смешанного типа – стальные стенки и железобетонные ригели.

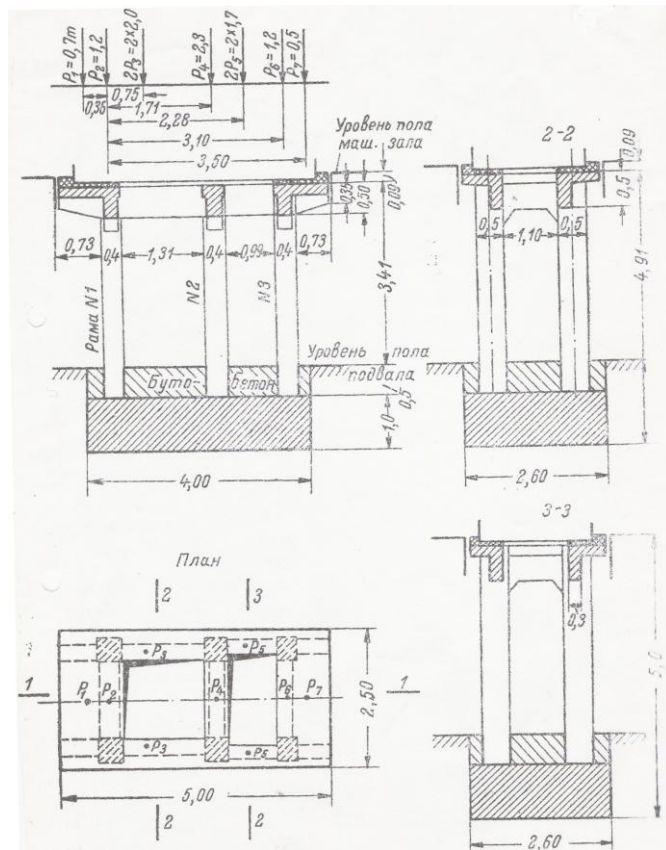


Рис.4. Общий вид фундамента

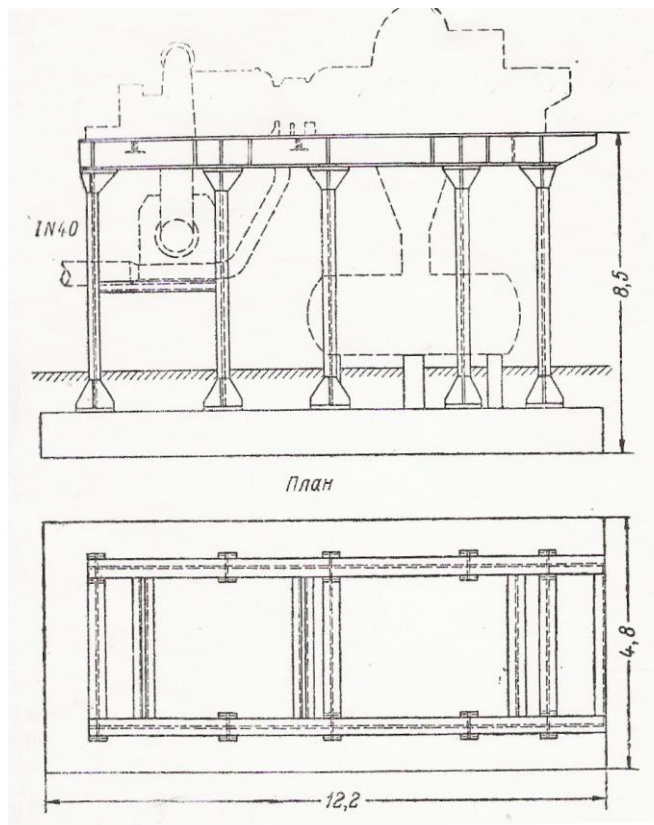


Рис.5. Металлический рамный фундамент под турбовоздуховодку

Требования к фундаментам машин

Фундамент должен обеспечить возможность эксплуатации машин без помех выполнению функций, как самого агрегата, так и находящихся вблизи других объектов. Конструкция фундамента должна отвечать следующим требованиям:

- прочности, устойчивости и выносливости;
- отсутствие чрезмерных осадок и деформаций, нарушающих нормальную эксплуатацию машины;
- отсутствие сильных вибраций, являющихся причиной плохой работы собственно агрегата и обслуживающего персонала предприятий и окружающих его зданий.

Общие особенности фундаментов машин следующие:

1. В отличие от фундаментов зданий и сооружений, фундаменты машин, исходя из условий размещения агрегата, имеют такие размеры, что статическое давление на основании являются незначительными $\sim 0,02 - 0,06$ МПа для бесподвальных фундаментов и $0,1 - 0,2$ МПа для фундамента подвального типа. По условиям прочности почти всякий грунт может служить основанием под фундаменты машин.
2. Фундаменты машин компактны и возможность возникновения неравномерных осадок основания исключается.
3. Высота фундаментов позволяет использовать слабое армирование или даже отказаться от него.

Действующие нормы рекомендуют производить проверку прочности основания по простейшим формулам:

$$[P] = \alpha P_{ст}, \quad (1)$$

где $P_{ст}$ – допускаемое давление, назначаемое по условиям проектирования естественных оснований промышленных и гражданских зданий;

α – коэффициент уменьшения в зависимости от вида динамического воздействия на фундамент. Определений осадок фундаментов машины в проектной практике не производится.

Соблюдение требования о недопущении сильных вибраций фундаментов и их воздействия на соседние здания и сооружения является более сложным. В первую очередь влияют особенности конструкции машины, интенсивность динамического воздействия на фундамент и вид грунта основания. Необходимо также учитывать чувствительность к сотрясению находящихся по соседству промышленных объектов, домов и т.п. Точный учёт всех обстоятельств неосуществим. Фундамент выполняют таких размеров, при которых амплитуды колебаний не превосходят предельные величины, установленные по опыту. Учёт распространения колебаний производится только тогда, когда вблизи машины имеются особо чувствительные к сотрясениям аппараты, приборы, жилые дома. При наличии особых условий для установки машины используют фундаменты специальных конструкций с амортизатором или применяют устройства, изолирующие точные станки и т.д.

На **рис.6** представлен обобщённый график для оценки интенсивности вибраций фундаментов под машины с установившимся движением. Граница между областями сильных и умеренных вибраций в первом приближении может рассматриваться как кривая изменения предельных величин допускаемых амплитуд вибраций в зависимости от частоты. Эти величины близки к рекомендациям технических условий, согласно которым расчётные амплитуды вибраций фундаментов низкочастотных машин (с кривошипным шатунным механизмом) ограничиваются $0,2$ мм, а высокочастотных (турбины) – $0,06-0,1$ мм при частоте 1500 колебаний/мин и $0,02-0,05$ мм при 3000 колебаний/мин.

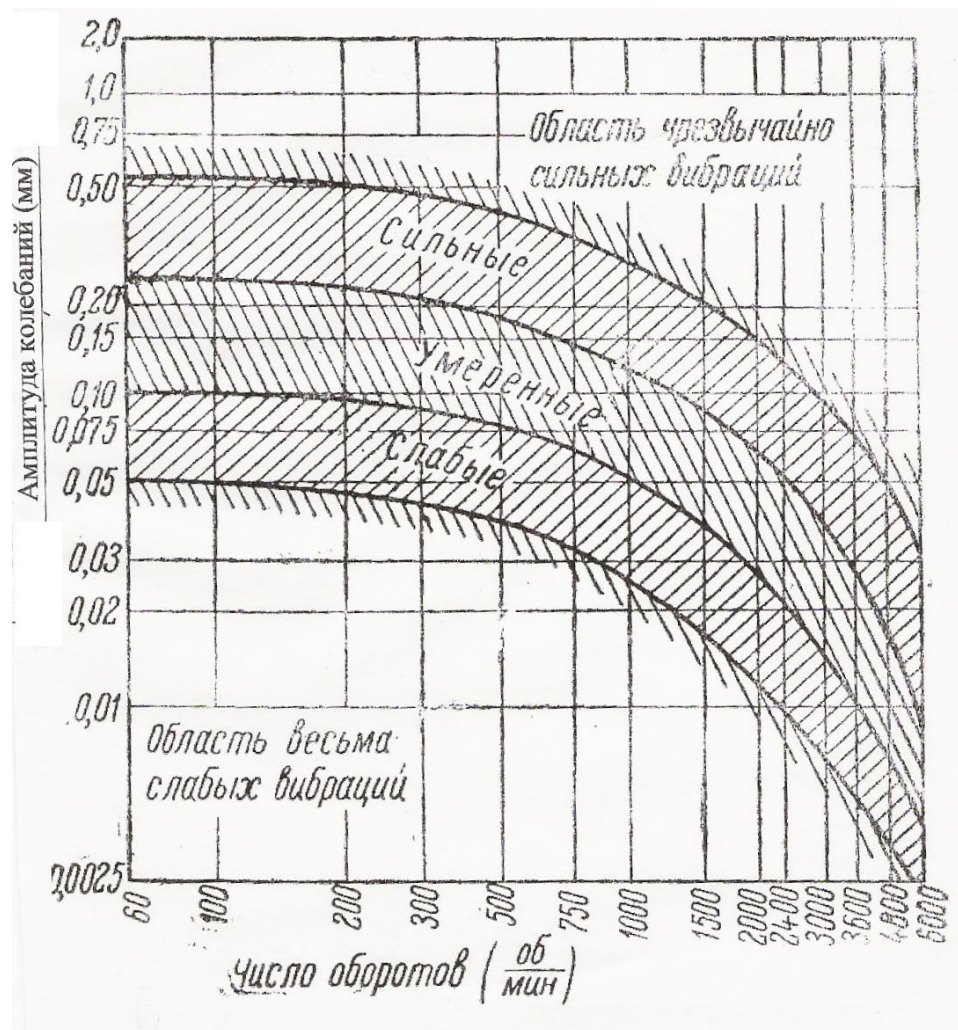


Рис.6. График для оценки интенсивности вибраций фундаментов под машины с установившимся движением

В таблице 2 приводятся допускаемые амплитуды колебаний фундаментов под машины с установившимся движением на уровне подошвы станины машины.

Таблица 2

Виды колебаний	Амплитуды колебаний в мм							
	Частота колебаний кол/мин							
	<500	500	750	1000	1500	3000	5000	10000
Вертикальные	0,15	0,12	0,09	0,075	0,06	0,03	0,015	0,005
Горизонтальные	0,2	0,16	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,0075

Расчёт фундаментов машин на колебания проводится по формуле:

$$A \leq A_d \quad (2)$$

Выбор размеров и типы основных массивных фундаментов

Надёжность конструкции фундаментов для машины в незначительной степени зависит от его заложения и обеспечивается соответствующим выбором размеров его подошвы. Экономность конструкции фундамента в основном определяется глубиной его заложения и не связана с размером подошвы. На **рис.7** показаны графики изменения отношения собственных частот и амплитуд вынужденных колебаний в зависимости от глубины заложения фундамента.

Из графика следует, что увеличение глубины заложения в 4 раза снижает частоту собственных колебаний на ~ 25%. Аналогичные результаты получаются и при рассмотрении свободных горизонтальных и вращательных колебаний фундаментов.

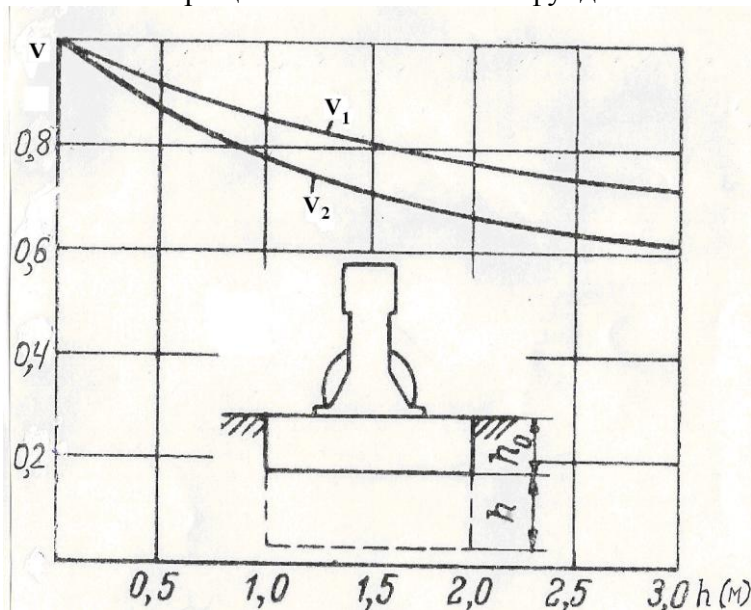


Рис.7. Графики зависимости собственных частот и амплитуды вынужденных вертикальных колебаний фундамента в зависимости от глубины его заложения

Таким образом, низкие частоты собственных колебаний массивных фундаментов практически не зависят от глубины заложения. Для снижения вертикальных колебаний увеличение размеров подошвы в ~ 10 раз выгоднее по стоимости увеличения глубины заложения. Горизонтальные колебания наоборот возрастают с увеличением глубины заложения, **рис. 8.**

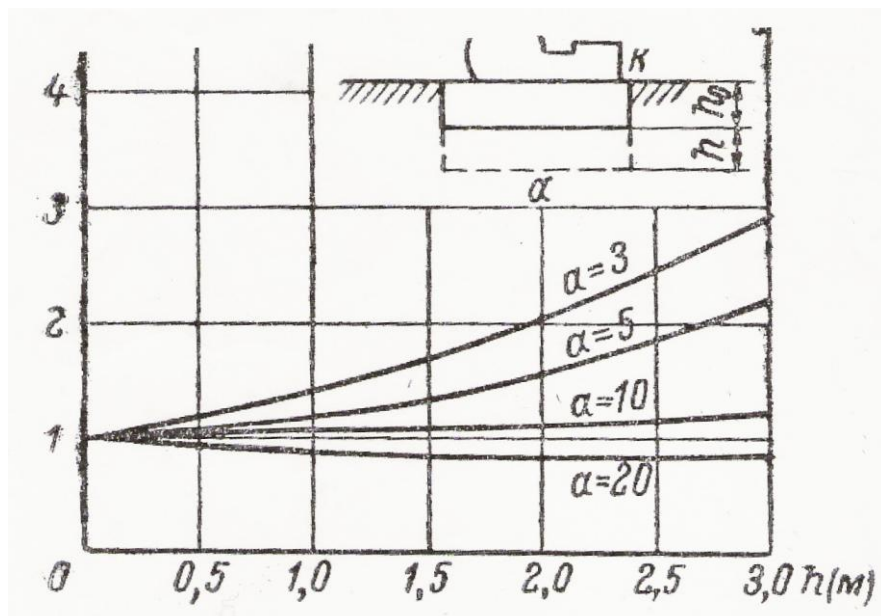


Рис.8. График зависимости амплитуд вынужденных горизонтальных амплитуд

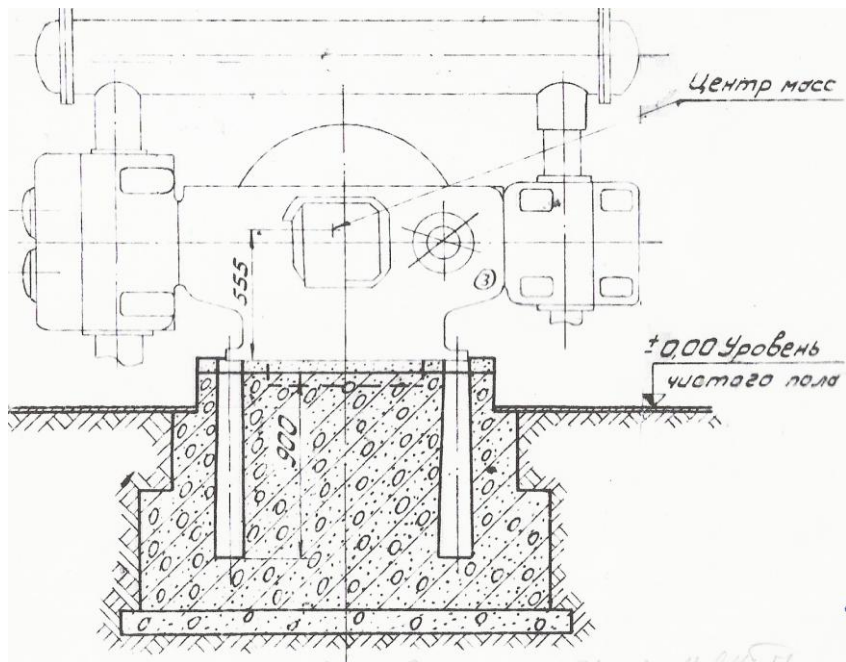


Рис.9. Задание на проектирование фундамента поршневого компрессора на 24 м³/мин

Глубина заложения мало влияет на характер и интенсивность распространяющихся колебаний грунта и соответственно мало влияет на колебания соседних промышленных объектов. По этой причине глубина фундамента машины не связана с фундаментами смежных зданий и сооружений.

Таким образом, основное условие выбора правильных размеров фундаментов машин сводится к определению минимальной величины глубины заложения. Определение размеров подошвы производится по расчёту. Задание на размещение агрегата дается предприятием-изготовителем в форме габаритных чертежей верхнего строения фундаментов, на которых указаны размеры и расположение выемок, выступов, закладных частей и анкерных креплений. Это задание является обязательным для проектировщика, **рис. 9, 10**. Минимальная высота подземной части фундамента назначается таким образом, чтобы обеспечить защиту головок, наиболее глубоко сидящих анкерных болтов от непосредственного контакта с грунтом и минимально необходимая по условиям прочности толщина опорной плиты, **рис. 11**.

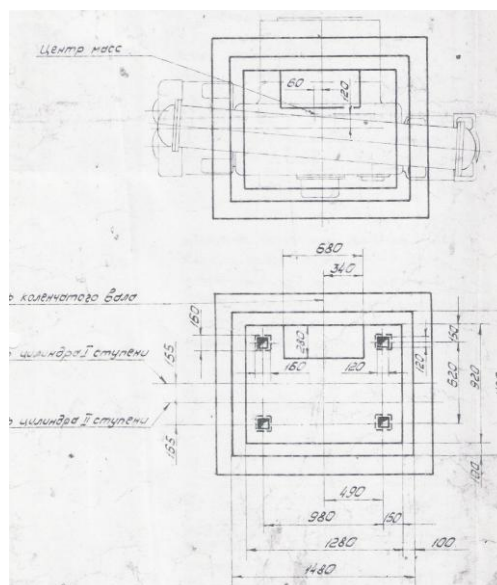


Рис.10. Монтажный чертёж верхней части фундамента поршневого компрессора на 24 м³/мин

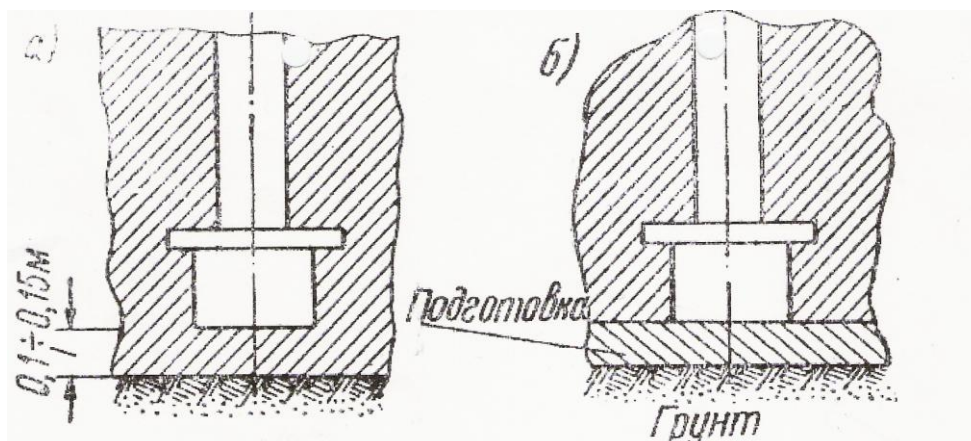


Рис.11. Предельное допускаемое расположение головок анкерных болтов

Толщина днщ отдельных прямков должна быть не больше $1/4$ — $1/5$ наименьшего размера прямка в плане, **рис.11**. Если рядом с фундаментом проходят глубокие каналы и прямки для трубопроводов различного назначения, кабелей и т.п., то минимальная глубина заложения фундамента машины может приниматься равной глубине заложения каналов. В противном случае подошва фундамента должна быть ниже дна канала не менее чем на 0,3 и 0,5 м. При подборе размеров фундамента обычно сталкиваются с длинными анкерными болтами (до 2,5–3,0 м). Это объясняется желанием включить в работу большую часть кладки фундамента. С переходом на армированный бетон длина болтов может быть ограничена до 1,0–1,5м.

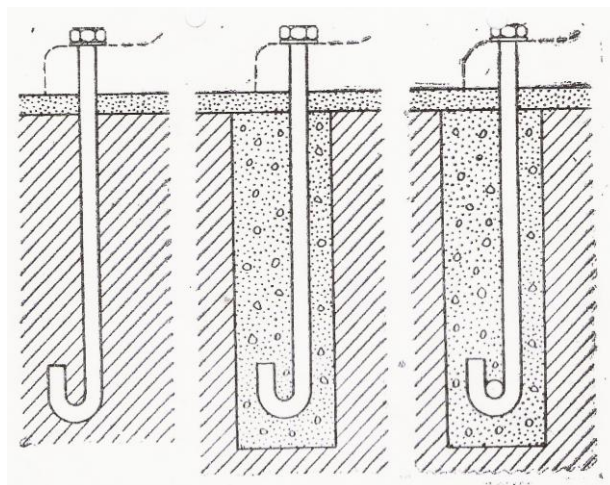


Рис.12. Фундаментные болты

При всём разнообразии конструкций анкерных болтов их можно разделить на две группы: съёмные болты и наглухо заделываемые в кладки фундамента. Болты первой группы показаны на **рис. 12**. В этих болтах поперечина, заделываемая в бетон, является жёсткой, прочной и позволяет выдерживать натяжение свободного от заливки болта. Эта конструкция рекомендуется для болтов $d \leq 40$ мм.

Болты второй группы показаны на рис. 13. В этих болтах поперечина, заливаемая в бетон, является жёсткой, прочной и позволяет выдерживать натяжение свободного от заливки болта.

Эта конструкция рекомендуется для болтов $d \geq 40$ мм. Болты второй группы, в ответственных случаях закладываются при монтаже машин в специальные шахты и впоследствии заливаются раствором.

Второй тип анкерного болта наиболее универсален и распространён. Закреплёние в бетонном массиве осуществляется при помощи сварной или литой анкерной шахты с

прямоугольным отверстием, в которое вводится головка болта с последующим поворотом на 90° до упоров. Можно использовать стальную трубку и железный ящик, привариваемые наглухо к анкерной плите.

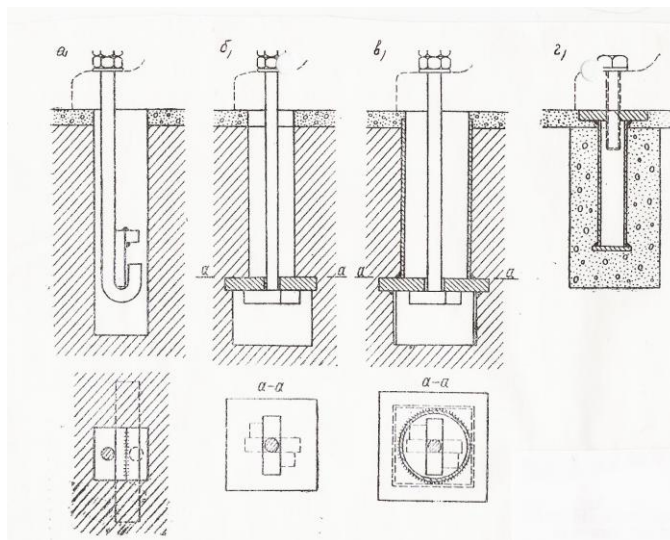


Рис.13. Конструкции съёмных болтов

Опытные данные показывают, что для соблюдения равнопрочности цилиндрический стержень без крюка должен быть заделан в бетон на 20...30 диаметров. При наличии крюка глубина заделки сокращается до 10~15 диаметров. Итак, заделка в бетон болта на 15...20 диаметров достаточна для равнопрочности на разрыв и выдёргивание. Болты с анкерными плитками можно конструировать более короткими. Надёжность соединения зависит от прочности бетона на смятие под плиткой и срез. Для обеспечения прочности на смятие необходимо принимать ширину плитки (5...6) d. Второе требование определяет глубину заделки (l_x) по условию равнопрочности.

$$l_0 = \frac{\pi d^2 \sigma_e}{4S \tau_e}, \quad (3)$$

Где S — периметр анкерной плиты,

σ_e — временное сопротивление болта растяжению,

τ_e — временное сопротивление срезу бетонной кладки.

Глубина заделки съёмных болтов с анкерными плитками при $d = 25...75$ мм не превышает 0,5...0,7 м. $l_{0 \min} \geq 0,4$ м.

Таблица 3

Диаметр болта в мм	Глубина заделки l_0 в м	
	Глухие болты с крюками на конце	Съёмные болты с анкерными плитками при $S \geq d$
< 20	0,4	0,4
24-30	0,5	0,4
32-36	0,6	0,4
40-50	0,7~0,8	0,5
55-60	—	0,6
65-70	—	0,7
75-80	—	0,8
85-90	—	0,9

В таблице 3 приведены минимальные глубины заделки анкерных болтов. Чем длиннее болты, тем более надёжным и эластичным является крепление машин.

Определение глубины заложения, размеров подошвы и типа фундамента

После определения высоты фундамента по условиям размещения и крепления машины проектировщик должен определить глубину заложения, размеры подошвы и тип основания фундамента. Если на месте постройки располагаются грунты, которые могут служить естественным основанием, то, глубина заложения фундаментов бесподвального типа принимается равной минимальной высоте подземной части, определённой по условиям закрепления машины, оборудования и коммуникаций. Из условия надёжности работы основания, необходимо заглублять фундамент в грунт на глубину не менее $\frac{1}{4}$ высоты его подземной части, но не менее 1 м. При предварительном подборе размеров подошвы фундамента следует обеспечить совпадение центров масс фундамента, машины и подошвы. Расчётное значение эксцентриситета на слабых грунтах ($P_{ст} = \leq 0,15$ МПа) должно быть не более 3%, а в остальных случаях не более 5% от размера стороны подошвы, вдоль которой происходит смещение центра масс (Требования ТУ). Фундаменты машин должны отделяться зазором не менее 0,3...0,5 м от фундаментов и наземных конструкций зданий (для низкочастотных неуравновешенных машин с установившимся движением). Для высокочастотных машин для фундаментов подвального типа можно делать опоры стоек, поддерживающие перекрытия под подвалом. Эти стойки имеют незначительную жёсткость при изгибе и по этой причине не дают горизонтальных колебаний, а вертикальные колебания обычно незначительны и не распределяются по площади перекрытия на большие расстояния. Под башмаками стоек можно подкладывать слой войлока 1,5...2 см. Для тяжёлых зданий с жёстким железобетонным каркасом и развитыми фундаментами можно возводить фундамент под компрессоры на песчаной подушке, уложенной на фундаментную плиту здания. При расположении в здании нескольких машин, ТУ допускает установку неуравновешенных машин на одном общем фундаменте. Устройство такого фундамента целесообразно для низкочастотных машин, для которых возникают преимущественно горизонтальные силы инерции. В этом случае общий фундамент обладает огромной жёсткостью в горизонтальной плоскости и полностью устраняет вибрации. Для вертикальных машин общий фундамент даёт меньший эффект, так как такой фундамент перестает вести себя, как твёрдое тело, а работает как упругая лента. Вибрации при этом практически не отличаются от тех, которые имели отдельные фундаменты под каждую машину. Таким образом, установка на общий фундамент вертикальных машин нецелесообразна. Это замечание относится и к устройству фундаментов высокочастотных машин независимо от вида их динамического действия.

После выбора размеров подошвы проводится расчёт фундамента на колебания и при необходимости уточняются размеры.

При слабых или неоднородных грунтах фундамент устраивается на подушке из мало сжимаемого сыпучего материала (песка, щебня, гравия) или на искусственном основании при большой мощности слоя слабого грунта (например, свайном основании). При слое слабого грунта применяют замену его подушкой. При замене сильно сжимаемого грунта (ила, торфа и др.) площадь подсыпки ограничивается бетонными ограничителями. Укладка подсыпки производится горизонтальными слоями толщиной 15 см с трамбовкой. Уплотнение верхних слоёв толщин основания обязательно. Насыпные грунты уплотняются трамбовкой или вибрированием с обильной поливкой водой. Песчаная подушка под фундаменты укладывается слоями 20...25 см с обильной поливкой. Щебень, гравий и шлак укладывается слоями 30...40 см с трамбовкой.

Проектирование массивных фундаментов под машины с кривошипно-шатунным механизмами и установившимся движением

К этому типу машин относятся поршневые компрессоры и газомотокомпрессоры. Динамическими нагрузками, вызывающими колебания фундаментов являются неуравновешенные силы инерции движущихся частей кривошипно-шатунных механизмов.

Вычисление неуравновешенных сил инерции выполняются заводами - изготовителями и результаты входят в состав заданий на проектирование фундаментов. При отсутствии этих расчётов динамические нагрузки можно вычислить приближённо следующим образом:

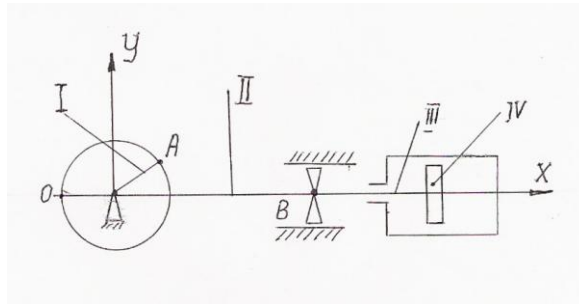


Схема кривошипно-шатунного механизма

Силы инерции движущихся частей приводятся к одной равнодействующей силе, приложенной в точке, которую раскладываем на составляющие N по направлению движения и T — перпендикулярную силе N . Массу всех движущихся частей заменяем точечными массами m_a и m_b , сосредоточенными в пальце кривошипа (A) и крейцкопфа (B). Эти массы определяются как:

$$m_a = \frac{r_0}{r} m_I + \frac{2}{3} m_{II}; \quad m_b = \frac{1}{3} m_{II} + m_{III}, \quad (4)$$

Где m_I — общая масса кривошипа (шейки коленчатого вала и противовеса)

m_{II} — масса шатуна,

m_{III} — общая масса штока, поршня и всех поступательно движущихся частей

r_0 — расстояние от оси вала до общего центра масс кривошипа и соединённых с ним элементов (если центр расположен вне отрезка OA, то r_0 берётся со знаком минус «-»).

r — длина кривошипа.

При равномерном вращении масса m_a даёт центробежную силу

$$P_a = m_a \cdot r \cdot \omega^2, \quad (5)$$

где ω — угловая скорость вращения кривошипа.

Сила инерции P_b поступательно движущихся масс m_b представляется как:

$$P_b = m_b r \omega^2 \cos \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_4 \cos 4\omega t + A_6 \cos 6\omega t + \dots, \quad (6)$$

где $A_2 = \lambda_1 + \frac{1}{4} \lambda^3 + \frac{15}{128} \lambda^5 + \dots$, $A_4 = -\left(\frac{1}{4} \lambda^3 + \frac{3}{16} \lambda^5 + \dots\right)$, $A_6 = \frac{9}{128} \lambda^5 + \dots$

$\lambda = \frac{r}{l}$ — отношение длин кривошипа и шатуна.

Коэффициентами A_2 и A_4 можно пренебречь по сравнению с A_2 , так как их величины близки к нулю, табл.5, где выражения для сил N и T определяются как:

$$N = m_a + m_b r \omega^2 \cos \omega t + A_2 m_b \omega^2 \cos 2\omega t, \quad (7)$$

$$T = m_a r \omega^2 \sin \omega \cdot t$$

Значения модуля затухания Φ
(по данным измерения колебаний опытных фундаментов)

Таблица 4

№ п/п	Наименование и краткая Характеристика грунтов	Величины площадей подошвы опытных фундаментов в м ²	Φ (сек)		Исследователь
			По данным измерения вертикальных колебаний	По данным измерений горизонтальных колебаний	
1	Крупнозернистый сухой песок (уплотнённая насыпь слоем 2 м)	0,5	0,0013	0,0013	О.А.Савинов
2	Среднезернистый слабовлажный песок мощностью слоя более 10м	1,5...3,0	—	0,0025	Н.М.Терентьев
3	Мелкозернистый, однородный песок средней плотности, в верхней части толщии влажный с глубины 1,5 м водонасыщенный	0,5...4,0	0,0028–0,033	0,0015 – 0,0040	А.О.Савинов
4	Супесь пылевато-илистая, мелкозернистая, насыщенная водой, плотная (слоем более 3,5 м)	1,0...5,6	0,0020–0,0030	0,0025	Н.П.Павлюк А.Д.Кондин
5	Суглинок пористый, насыщенный водой. Мощность слоя 12 м	2,0 – 8,0	0,0033 – 0,0050	—	Д.Д.Баркан А.И.Михальчук
6	Суглинки слабые, насыщенные водой. Мощность слоя более 10 м	0,5 – 1,5	0,0020 – 0,0015	—	Я.Н.Смолин
7	Ленточная глина, плотная, полутвёрдая	0,5 – 2,0	0,0017	0,0015 – 0,0020	А.Д.Кондин и О.А.Савинов

Численные значения коэффициентов A_2 , A_4 и A_6

Таблица 5

λ/A	$\frac{1}{3,5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4,5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{7}$
A_2	0,2918	0,2540	0,2250	0,2020	0,16780	0,1436
A_4	– 0,0062	–0,0041	–0,0028	–0,0020	–0,0012	–0,0007
A_6	0,000126	0,000069	0,000038	0,000022	0,000009	0,000004

При нескольких цилиндрах производится сложение неуравновешенных сил по правилам механики. В таблице 6. приводятся готовые выражения для многоцилиндровых машин, когда все цилиндры одинаковы и расстояния равны.

По таблице 6 можно определить неуравновешенные силы инерции, а по имеющимся расстояниям

между осями цилиндров – c – можно определить момент пары сил в плоскости цилиндров.

Фундаменты под машины с кривошипно-шатунным механизмом проектируются только массивными, обычно в виде сплошных плит, реже ступенчатыми. Бетонные фундаменты под машины с кривошипно-шатунными механизмами обязательно снабжаются арматурой.

Элементы, такие как стенки, консоли и т. д, ослабленные выемками, надёжно армируются.

Общее содержание арматуры до 25 кг на 1м³.

Таблица 6

Величины неуравновешенных сил инерции многоцилиндровых машин						
Цилиндров	Углы заклинивания кривошипов	Составляющие равнодействующей (точка приложения — середина расстояния между крайними цилиндрами)		Моменты пар		Примечание
		в направлении скольжения поршня	в перпендикулярном направлении	в плоскости цилиндров	в перпендикулярной плоскости	
2	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 0$	$2(m_a + m_b) r \omega^2 \cos \omega t$	$2 m_a r \omega^2 \sin \omega t$	0	0	Силы инерции II-го порядка опущены
2	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 180^\circ$	0	0	$c(m_a + m_b) r \omega^2 \cos \omega t$	$c m_a r \omega^2 \sin \omega t$	
2	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 90^\circ$	$\sqrt{2}(m_a + m_b) r \omega^2 \cos(\omega t + \frac{\pi}{4})$	$\sqrt{2} m_a r \omega^2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$	$\sqrt{2} c(m_a + m_b) \cdot r \omega^2 \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$	$\sqrt{2} c m_a r \omega^2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$	
3	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 120^\circ$ $\beta_3 = 240^\circ$	$\sqrt{3} A_2 m_b r \omega^2 \cos 2\omega t$	0	$c(m_a + m_b) r \omega^2 \cos(\omega t - \frac{\pi}{3}) - 2c A_2 m_b r \omega^2 \cos(2\omega t - \frac{\pi}{3})$	$1,2 c m_a r \omega^2 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$	
4	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 90^\circ$ $\beta_3 = 90^\circ$ $\beta_4 = 360^\circ$	$4 A_2 m_b r \omega^2 \cos 2\omega t$	0	0	0	
5	$\beta_1 = 0$ $\beta_2 = 120^\circ$ $\beta_3 = 240^\circ$ $\beta_4 = 240^\circ$ $\beta_5 = 360^\circ$ $\beta_6 = 480^\circ$	0	0	0	0	

Массивные фундаменты под турбоагрегаты

При расчёте этих фундаментов обычно задаются вероятными величинами центробежных сил в зависимости от предельного значения эксцентриситета вращающихся частей. В первом приближении при нормальной эксплуатации сила, действующая на подшипник в долях от веса ротора, (mg), приходящаяся на этот подшипник, может составлять $\cos\left(\frac{n_0}{1000}\right)^2$, но не менее 0,2.

Предельно возможные силы могут быть приняты в 5 раз больше. Массивные фундаменты выполняются в подвальном и бесподвальном исполнении. Минимальная высота подземной части определяется положением головки анкерных болтов или из соотношения наибольшего размера подошвы и высоте как 8:1.

Таблица 7

Наименьшие размеры элементов бетонных фундаментов подвального типа под машины с вращающимися частями			
№ п/п	Наименование элементов	Наименьшая рабочая высота сечения	
		фундаменты под машины с числом оборотов не более 1 000 об/мин	фундаменты под машины с числом оборотов более 1000 об/мин
1	Стены:		
	а) основные продольные	0,8 м	0,6 м
	б) " поперечные	0,3 "	0,3 "
2	в) второстепенные несущие стенки	0,10 "	0,15 "
	Элементы верхней части:		
	а) главные балки или ригели, поддерживающие машину	Не менее 1/4 пролета в свету и не менее 0,5 м	Не менее 1/2,5 пролета в свету и не менее 0,75 м
	б) второстепенные балки	0,4 м	0,4 м
	в) консольные балки (в опорном сечении)	Не менее 0,5 длины вылета	Не менее 0,75 длины вылета
	г) плиты	0,15 м	0,20 м

Таблица 8

Предельные размеры консольных частей рамных фундаментов под турбоагрегаты		
Наименование элементов	Предельные размеры	
	высота сечения	длина пролета или вылета (для консолей)
Плиты	$h_n \geq 0,2 \text{ м}$	$l_n \leq 1,2 \text{ м}$
Второстепенные и бортовые балки	$h_g \geq 0,4 \text{ м}$	$l_g \leq 4h_g$
Консоли	$H \geq 0,75L$	$L \leq 1,5 \text{ м}$

Для фундамента подвального типа размеры и конструкция нижней плиты принимаются так, чтобы обеспечить равномерную передачу давления на грунт. Толщина нижней плиты должна быть не менее 0,6 м и не менее длины наибольшего выступа в плане. Для стеновых фундаментов толщина должна быть не менее толщины стен (или не менее 0,8 м). В таблице 7 даны наименьшие размеры элементов подвального типа. Паропроводы и другие горячие части должны быть термоизолированы, и отделяться от фундамента воздушной прослойкой (температура на поверхности фундамента $\leq 50^\circ$). Пропуск каналов через тело фундамента не допускается. Каналы должны проходить в металлических коробах с изоляцией. Расчет на колебания производится только для низкочастотных машин.

Проектирование рамных фундаментов

Особенности работы высокочастотных машин на рамном фундаменте сводятся к тому, что нижняя плита под действием горизонтальных сил не участвует в колебаниях, так как стойки рам играют роль амортизаторов. Верхняя рама с установленными на ней машине ведёт себя как система жестко связанная между собой и свободная от связей с основанием. Её амплитуды колебаний зависят от её массы и размеров. Под действием вертикальных сил колебания фундамента близки к резонансным для системы с противоположным смещением верхней и нижней рам. Амплитуда вертикальных перемещений верхней рамы наиболее существенно зависит от жёсткости на изгиб ригелей поперечных рам верхнего строения, массы нижней плиты и жёсткости её основания. Чем больше жёсткость поперечных рам и основания и чем меньше масса нижней плиты, тем меньше колебания верхней рамы. Таким образом, при выборе размеров верхней рамы необходимо стремиться к максимальному увеличению её массы (увеличение сечения балок, ригелей, расширение консольных выступов). При высоте сечения $d_i \geq 0,08 l_i^2$, где l — пролёт (м) ригеля, проверка на колебания не нужна. Стойки рам верхнего сечения не должны иметь значительных поперечных размеров (не превышать требуемых по прочности). Обычно размеры стоек составляют (4) размера машины, а верхнее строение их условий размещения вспомогательного оборудования, коммуникаций и машины имеет весьма сложную форму. Размеры нижней плиты принимают минимальными из расчёта размещения стоек рам верхнего сечения, расчёта прочности основания по допустимому давлению и тела самой плиты. Эксцентриситет равнодействующей не должен превышать 3% от размера соответствующей стороны подошвы. В фундаментах с металлическим верхним строением для увеличения массы и жёсткости рамы целесообразно производить бетонирование промежутков с арматурой, приближая конструкцию к железобетонной. Металлические стойки поперечных рам не связывают с раскосами за исключением необходимых для крепления оборудования и коммуникаций. Соблюдая симметрию при проектировании консоли выполняются как показано на **рис. 14 и 15**.

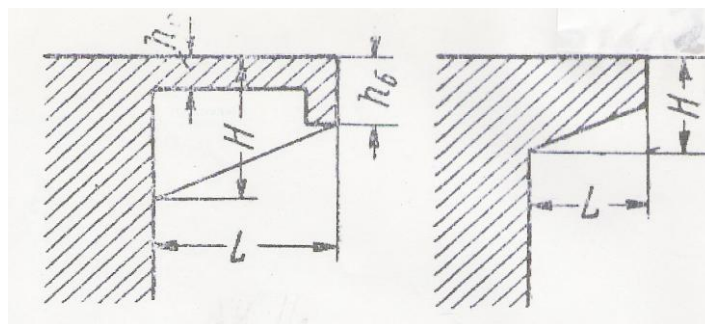


Рис.14. Рекомендуемые схемы устройства консольных частей верхней горизонтальной рамы:
 $L > 0,75 \text{ м}$ $L \leq 0,75 \text{ м}$

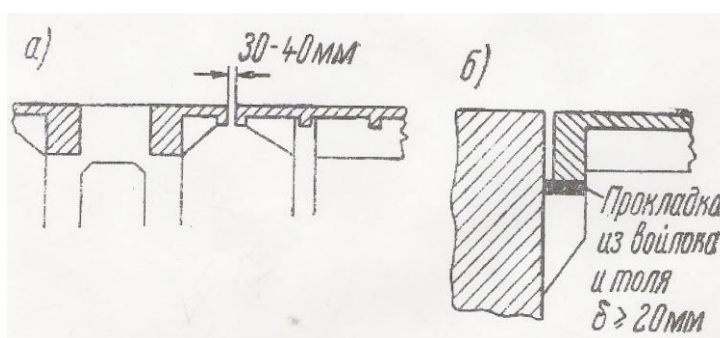


Рис.15. Схемы примыкания к рамному фундаменту перекрытия над подвалом

Верхняя часть фундамента отделяется от перекрытия над подвалом по всему периметру. Допускается опирать на рамные фундаменты турбоагрегатов только вкладные перекрытия между местами установки сложных машин, либо жёстко соединять их с фундаментами в одно целое и отделять от остальных конструкций. Нижняя плита отделяется от смежных фундаментов зазором. В редких случаях при неблагоприятных грунтах, фундаменты могут объединяться с конструкцией здания машинного зала. При строительстве рамного фундамента для предотвращения усадочных трещин необходимо тщательно армировать стойки балки, ригели у углов и по контурам отверстий. Арматура должна заходить в толщу бетона не менее, чем на $40 \dots 50d$ (d — диаметр стержня арматуры). Все элементы верхнего строения по контуру должны иметь замкнутую арматуру. Стержни снабжаются крюками. Работающие на прогиб должны иметь двойную арматуру, а в стойках симметричную. Применяют арматуро-опалубочные блоки для ускорения и повышения качества работ.

Основы расчёта массивных фундаментов на колебания

Обычно тела машины и фундамента рассматриваются как абсолютно жёсткие. Основание считается упругим и лишённым массы. Результаты оказываются близки к действительности при правильном выборе коэффициентов жёсткости основания, которые можно определить с достаточной для практики точностью.

Окончательный вид формулы для определения обобщённых коэффициентов упругого сжатия и сдвига основания:

$$C_z = C_0 \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta F} \right] \sqrt{\frac{p}{p_0}}; \quad C_\varphi = C_0 \left[1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta F} \right] \sqrt{\frac{p}{p_0}}; \quad C_x = C_0 \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta F} \right] \sqrt{\frac{p}{p_0}},$$

(8)

где a — длина подошвы фундамента (по оси x),
 b — ширина (по оси y),

F — площадь подошвы фундамента,

$$\Delta = \sqrt{\frac{c}{q}} = 1,0 \text{ м}^{-1} \text{ — (величина независимая от грунта), характеризующая отношение}$$

коэффициента упругого сжатия основания — (c) к натяжению всесторонне растянутой мембраны (q), которое наложено без трения на неограниченное упругое основание (задача о положении жёсткого штампа на упругом основании Филоненко—Бородича). [1]

$$C_0 = 1,7 \frac{E_0}{1-\sigma^2} 10^{-3} \text{ кг/см}^3, \quad (9)$$

$$D_0 = 1,7 \frac{E_0 \cdot 10^{-3}}{(H\sigma)(1-0,5\sigma)} \text{ кг/см}^3. \quad (10)$$

C_0, D_0 — величины, определённые из опытов при $P = P_0$.

E_0 — величина модуля упругости кг/см^2 , определённая по результатам лабораторных испытаний образцов грунта,

σ — коэффициент Пуассона, равняющийся в среднем 0,4 (0,3...0,5),

$$D/c \approx 0,75.$$

Выражение для частоты собственных вертикальных колебаний:

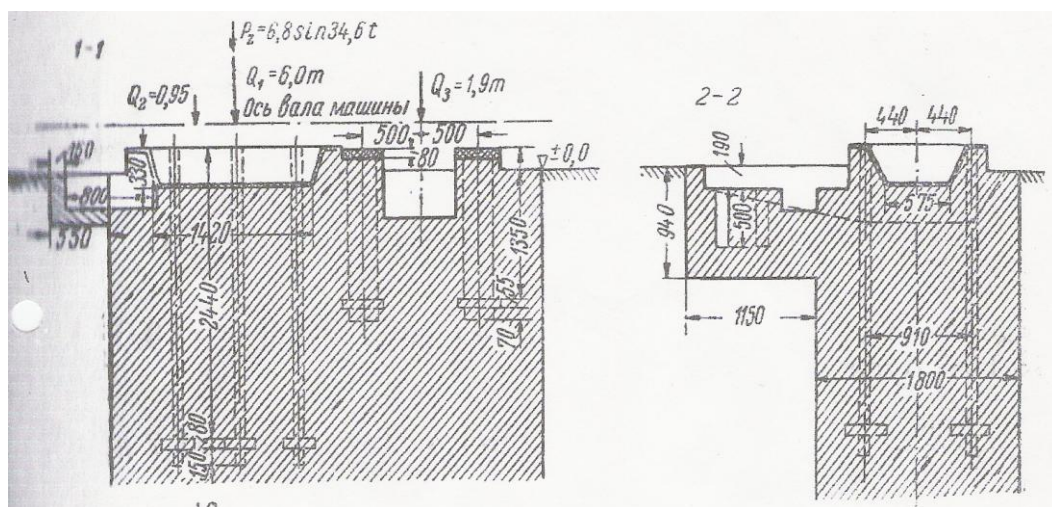
$$\lambda_{z_0} = \sqrt{\frac{c_{z_0} \cdot F}{m_0}},$$

где F — площадь подошвы фундамента,

m — масса фундамента.

Пример расчёта. [1]

Рабочее число оборотов вертикального компрессора $n = 330$ об/мин. Вертикальная составляющая неуравновешенных сил инерции $N_y = 68$ кн. Силами инерции второго порядка пренебрегаем. Горизонтальные силы инерции уравновешены. Масса компрессора $8,85 \cdot 10^3$ кг. Фундамент возводится на мощном слое среднезернистого песка. Допускаемое давление на грунт $[p] = 0,25$ МПа, коэффициент жёсткости основания $C_0 = 0,16$ МПа. Минимальная высота подземной части фундамента 2,6 м. Принятые размеры фундамента на **рис.16**.



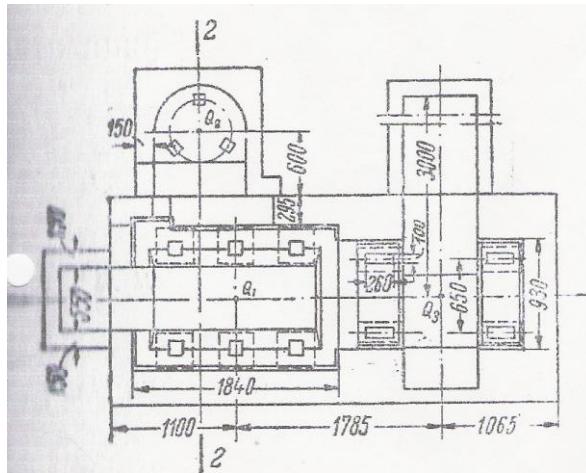


Рис.16. Габаритные размеры верхней части фундамента под вертикальный компрессор (к примерам 1 и 2)

Пользуясь табличными данными, определяем:

Расстояние от подошвы до центра масс фундамента:

$$h_0 = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = 1,38 \text{ м} \quad (11)$$

Относительные эксцентриситеты:

$$x_0 = -0,4\% < 5\%$$

$$y_0 = -2,5\% < 5\%$$

Удельное статическое давление

$$\text{При } F = 3,6 \times 4,2 = 15,1 \text{ м равняется } p = \frac{67,8}{15,1} = 0,015 \text{ МПа.}$$

По Φ (100 — 102) находим

$$c_z = 4,6 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}; \quad c_\varphi = 7,2 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}; \quad c_x = 3,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

Частота собственных вертикальных колебаний

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{4,6 \cdot 10^3 \cdot 15,1 \cdot 9,8}{67,8}} = 103 \frac{\text{кол}}{\text{с}}.$$

Низшая частота собственных горизонтальных колебаний:

$$\lambda = x_0 \lambda_x,$$

$$\text{где } x_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h^2 k_x}{k_\varphi}}} \text{ по рис. 17,}$$

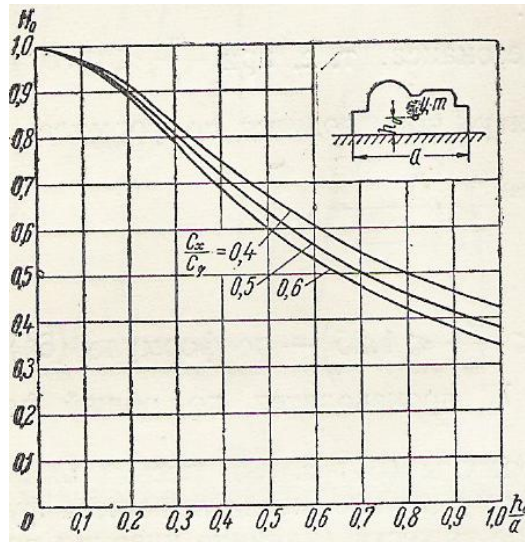


Рис.17. Вспомогательный график для определения низшей частоты собственных горизонтальных колебаний фундамента

$$x_0 = 0,77 \text{ при } \frac{h_0}{a} = 0,33.$$

$$x_1 = 0,77 \sqrt{\frac{c_x F}{m}} = 0,77 \sqrt{\frac{3,3 \cdot 10^3 \cdot 15,1 \cdot 9,81}{67,8}} = 65 \frac{\text{кол}}{\text{с}}$$

Определим амплитуды вынужденных колебаний фундамента. Для этого действующую на фундамент периодическую силу φ_z к паре и силе, приложенным в центре масс.

Действующая периодическая сила:

$$P_z = 6,8 \cdot 10^3 \sin 34,6t \text{ кг.} \quad (12)$$

Пара сил, приложенная к телу плиты фундамента в центре его тяжести (42 x 3,6 x 0,8) равна

$$M_{x0z} = -6,8 \cdot 0,4 \sin 34,6t = -2,7 \sin 34,6t \text{ атм.} \quad (13)$$

Выражение для вынужденных вертикальных колебаний фундамента

$$Z = H_k^{cm} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{x_1^2}} \quad (14)$$

H_k^{cm} — перемещение точки (к) при статическом действии возмущающих сил: $P_z / C_z' \cdot F = A_k^{cm}$.

$$Z = \frac{6,8}{4,6 \cdot 10^3 \cdot 15,1} \left(\frac{1}{1 - \frac{34,6^2}{10^3}} \right) \sin 34,6t = 0,11 \cdot 10^{-3} \sin 34,6t \text{ м.}$$

Угол поворота фундамента:

$$\varphi = \frac{M_{x0z} \cdot x}{C_\varphi \cdot Y} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\lambda_1^2}} = \frac{-2,7 \cdot 12}{7,2 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 4,2^3} \frac{1}{1 - \frac{34,6^2}{65^2}} = -0,22 \cdot 10^{-3} \sin 34,6t \text{ рад} \quad (15)$$

Сила и пара действуют в одной фазе. Максимальные амплитуды вертикальных колебаний верхнего обреза:

$$A_x = 0,022 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ равно } \sim 0,6 \text{ мм, т.е. амплитуда колебаний не превосходят допустимые.}$$

Таблица 9

Классификация грунтов, как оснований фундаментов машин			
Категория	Характеристика основания	Наименование грунтов	C_0 в $кг/см^2$ (при $P_0 = 0,2 кг/см^2$)
I	Нежесткие	Супеси, суглинки и глины в пластичном состоянии, близком к границе текучести (консистенция $B > 0,8$); водонасыщенные пылеватые и илистые грунты слабой плотности	0,5—0,8
II	Малой жесткости	Супеси, суглинки и глины пластичные ($B = 0,5 \div 0,8$); грунты пылеватые средней плотности, насыщенные водой	0,8—1,5
III	Средней жесткости	Супеси, суглинки и глины пластичные ($B = 0,2 \div 0,5$); пески пылеватые, плотные; пески мелко-, средне- и крупнозернистые независимо от плотности и влажности; гравий и галька; лёссовидные грунты естественной влажности	1,5—2,0
IV	Жесткие	Суглинки и глины тугопластичные и твердые ($B < 0,2$)	2,0—3,0

Таблица 10

Значения коэффициента C (по данным измерения колебаний опытных фундаментов)

№ п/п	Виды грунтов	Наименование и краткая характеристика грунтов	Величины площадей подошвы опытных фундаментов в $м^2$	C в $кг/см^2$ (при $P_0 = 0,2 кг/см^2$)
1	Песчаные грунты	Крупнозернистый, рыхлый, сухой песок (свежая насыпь слоем 2 м)	0,5	1,6
2		Тот же грунт, уплотненный вибрированием	0,5	1,6
3		Среднезернистый, слабовлажный песок мощностью слоя более 10 м	1,5—3,0	2,0
4		Мелкозернистый, однородный песок средней плотности, в верхней части толщи влажный, с глубины 1,5 м насыщенный водой	0,5—4,0	1,9
5		Тонкозернистый, плотный, водонасыщенный песок	4,0—15,0	1,6
6	Глинистые грунты	Супесь пылевато-илистая, мелкозернистая, насыщенная водой, плотная (слоем более 3,5 м)	1,0—5,6	2,5
7		Супесь мелкозернистая, пылеватая, средней плотности	0,5	1,7
8		Суглинок пористый, насыщенный водой. Мощность слоя 12 м	2,0—8,0	0,8
9		Суглинки слабые, насыщенные водой. Мощность слоя более 10 м	0,5—1,5	0,4
10		Ленточные глины: а) плотные, полутвердые, влажность 29%	1,0—2,0	3,1
		б) средней плотности, водонасыщенные, влажность 35%	0,65—1,3	0,5
11		Лессестественной влажности (слой большой мощности)	0,81—4,0	1,8—2,0
12	Лессовидный суглинок естественной влажности	2,5	1,5	

Массивные фундаменты под турбоагрегаты, мотор-генераторы и другие машины с вращающимися частями

Пример подбора размеров нижней части фундамента под мотор-генератор мощностью 6000квт:

$n_{расч}$ 500 об/мин

Масса машины 131000 кг

Масса вращающихся частей $61,5 \cdot 10^3$ кг

Габариты верхнего строения фундамента со схемой статических нагрузок показаны на **рис.18**.

Грунты на месте постройки фундамента состоят:

0,0...1,3 м — насыпной грунт

1,3...10м — сухой лес

Строим фундамент на сухом лесе

$C_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}^3$; $[\rho] = 0,25 \text{ МПа}$

Глубина заложения 1,5м, размеры подошвы принимаем 4,4x10м.

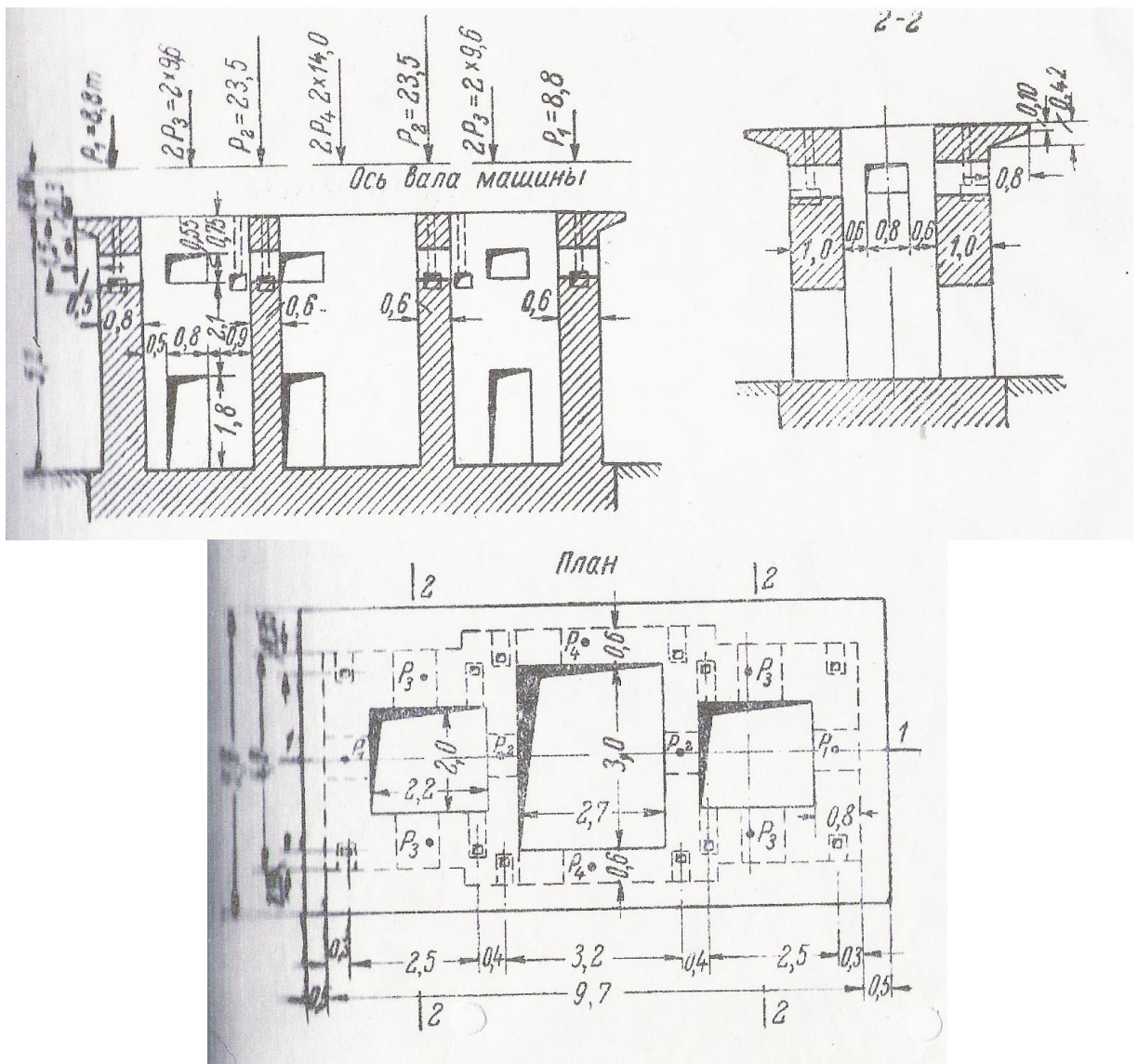


Рис.18. Габариты верхнего строения фундамента под мотор-генератор

Вспомогательные вычисления

Таблица 11

Элемент	Объём бетона м ³	Масса в кг	Расстояние от подошвы ? масс в м Z _i	m _i Z _i
Агрегат	—	131x10 ³	7,6	995 x10 ³
Крайние поперечные стены	2x4,0x0,8x5,2=33,3	73,3x10 ³	4,1	302 x 10 ³
Средние поперечные стены	2x4,2x0,6x5,2=26	57,5x10 ³	4,1	230 x 10 ³
Крайние продольные стены	2x2,2x1,0x5,2=22,9	57,5x10 ³	4,1	206,5 x10 ³
Опорная плита	10x4,4x1,5=71	156x10 ³	0,75	116,5 x10 ³
		$\sum 505,3 \cdot 10^3 \text{ кг}$		$\sum 2028 \cdot 10^3 \text{ кгм}$

$$h_0 = \frac{2028 \cdot 10^3}{505,3 \cdot 10^3} = 4,02 \text{ м}$$

$$p = \frac{505,3}{44} = 11,5 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2.$$

Коэффициенты C_φ и C_x:

$$C_\varphi = 2 \cdot 10^7 \left[1 + \frac{2(4,4 + 3 \cdot 10)}{1 \cdot 44} \right] \sqrt{\frac{11,5}{2}} = 12,7 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}^3;$$

$$C_x = 0,7 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[1 + \frac{2(4,4 + 10)}{1 \cdot 44} \right] \sqrt{\frac{11,5}{2}} = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ н/м}^3.$$

Расчёт колебаний

Масса фундамента $m = 505,3 \cdot 10^3 \text{ кг}$

По графику рис.17 находим

$$x_0 = 0,4 \frac{h_0}{a} = \frac{4,02}{4,4} = 0,91.$$

Частота λ₁:

$$\lambda_1 = 0,4 \sqrt{\frac{5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 44}{51,8 \cdot 10^3}} = 27 \text{ с}^{-1}.$$

Амплитуда вынужденных горизонтальных колебаний верхнего обреза фундамента:

$$(p_x^{(0)} = 0,12 \cdot 61,5 = 7,4) \cdot 10^3 \text{ кг}$$

$$A_x = \left(\frac{7,4}{5,6 \cdot 10^3 \cdot 44} + \frac{7,4 \cdot 7,6 \cdot 6,7 \cdot 12}{12,7 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 4,4^3} \right) \cdot \frac{1}{1 - \frac{500^2}{9,55^2 \cdot 27^2}} = 0,16 \text{ мм} < 0,2.$$

Размеры фундамента удовлетворительны, т.к. расчётное значение A_x меньше допускаемого предела [0,2мм].

Колебания рамных фундаментов можно разделить на три независимых задачи:

1. Вертикальные колебания
2. Горизонтальные колебания в плоскости перпендикулярной оси вала машины.
3. Вращательные горизонтальные колебания относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс площади подошвы.

Для случая вертикальных колебаний массы элементов верхнего строения и части машины заменяем системой материальных точек, сосредоточенных в центрах ригелей и узлах поперечных рам.

При изучении горизонтальных колебаний верхнюю плиту рассматриваем как твёрдое тело со сплошным распределением масс агрегата, продольных и поперечных ригелей и приведённой части стоек поперечных рам. Такой подход допустим при малом эксцентриситете центров масс отдельных частей системы.

Рамный фундамент рассматривается как твёрдое тело, опирающееся на упругое основание. Из опыта известно, что возможность проявления резонансных колебаний основных видов для фундамента под турбоагрегаты исключена. Вероятность появления резонансных колебаний основных видов фундаментов под мотор-генераторы велика, так как низшие частоты собственных колебаний находятся в пределах обычных оборотов этих машин. При рассмотрении амплитуд горизонтальных и вертикальных колебаний основных видов верхнюю раму (плиту) вместе с агрегатом рассматривают как свободное твёрдое тело. Под массой тела понимается масса верхней рамы агрегата и 50% длины стоек. Горизонтальные колебания центра масс рамы ограничиваются пределами:

$$A_x = \frac{0,2 \cdot 0,25}{\omega^2} \text{ м.} \quad (16)$$

При нормальной отбалансированности роторов амплитуда составляет менее 0,01...0,015 мм, что и наблюдается в действительности. Расчётные значения пролёта ригеля и высоты стоек l_i и h_i необходимо определять по графику на рис.19.

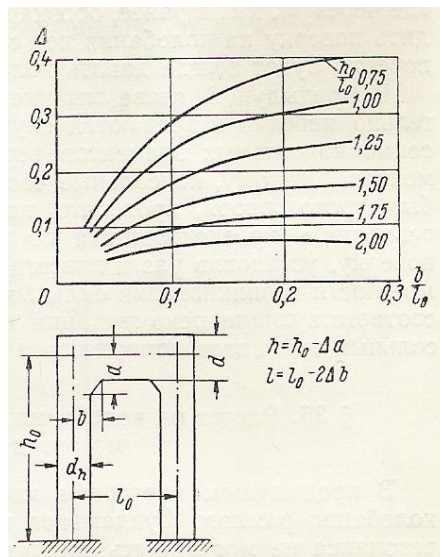


Рис.19. График для определения расчётных размеров поперечных рам

Коэффициент жёсткости системы:

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{C_x \cdot F} + \frac{h^2}{C_\varphi \cdot I} + \frac{1}{K}}, \quad (17)$$

где C_x, C_φ — коэффициенты упругого сдвига и неравномерного сжатия основания фундамента,

F, I — площадь подошвы и момент инерции этой площади относительно главной оси, параллельной оси вала машины.

h — расстояние от подошвы до вертикального обреза фундамента,

$K = \sum K_i$ — сумма коэффициентов жёсткости всех поперечных рам фундамента.

$$K_i = V_x \frac{12EJ_{hi}}{h_i^3} \frac{1+6k_i}{2+3k_i}, \quad (18)$$

$$k_i = \frac{h_i \cdot I_{li}}{l_i \cdot I_{hi}}, \quad (19)$$

h_i, l_i — расчётные высоты стоек и пролёт ригеля,

I_{li}, I_{hi} — моменты инерции площади поперечных сечений ригеля и стоек рам,

v_x — поправочный коэффициент, учитывающий влияние на деформацию рам перерезающих сил, см. график на рис.21.

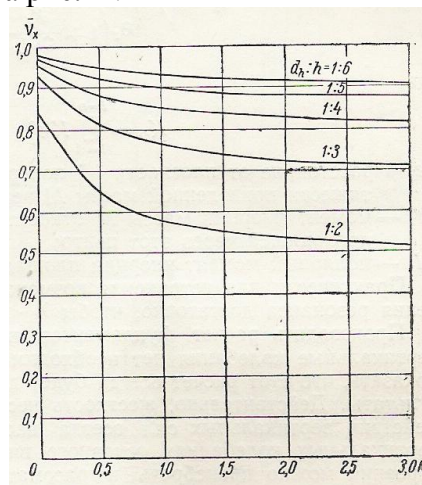


Рис.21 Графики для определения коэффициента v_x

По величинам M и K_x определяем основную частоту λ_x собственных колебаний и наибольшую амплитуду A_x вынужденных горизонтальных колебаний фундамента:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{K_x}{M}}, \quad (20)$$

$$A_x = \frac{R}{K_x} \sqrt{\frac{\eta_{рез}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}\right)^2 \eta_{рез}^2 + \frac{\omega^2}{\lambda_x^2}}}}, \quad (21)$$

где $\eta_{рез}$ — коэффициент нарастания колебаний при резонансе, который принимается при расчёте железобетонных рамных фундаментов равным 8.

Вращательные колебания фундамента относительно вертикальной оси бывают значительными только при резонансе. При определении низшей частоты вращательных колебаний пренебрегают влиянием инерции вращения нижней плиты, тогда

$$\lambda_\psi = \sqrt{\frac{K_\psi}{\theta_z \left(1 + \frac{K_\psi}{C_\psi I_z}\right)}}, \quad (22)$$

где $K_{\psi} = \sum_{i=1} K_i l_i^2$;

l_i — расстояние от плоскости (i) поперечной рамы до центра приведённой массы верхней части фундамента;

θ_z — момент инерции M относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс;

I_z — полярный момент инерции площади подошвы фундамента.

Условие отсутствия резонанса $0,6\omega < \lambda_{\omega} < 1,4\omega$. Расчёт на вертикальные колебания не приводится, так как результаты будут всегда положительны. Жёсткость рам при действии вертикальных сил настолько велика, что можно пренебречь упругостью верхней рамы и рассматривать фундамент как твёрдое тело на упругом основании. Формула для амплитуды колебаний:

$$A_z = \frac{P_z^{(0)}}{K_z} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\lambda_z^2}\right)^2 + \Phi_{\omega}^2}} = A_z^{cm} \eta_{я}, \quad (23)$$

Где Φ — модуль затухания сил.

С учётом $\frac{P_z^{(0)}}{F} \leq 700 \dots 600$ н/м² и коэффициента нарастания $\leq 2,5 \dots 3$ амплитуда вертикальных колебаний не превышает 0,05...0,08 мм и оказывается ниже допустимых при $n=250 \dots 1000$ об/мин.

Пример расчёта колебания рамного фундамента под мотор-генератор [1]

Мощность генератора $N = 10000$ квт;

Частота вращения — 300об/мин

Размеры фундамента на рис.20

Под подошвой фундамента – суглинок

с $p = 0,35$ н/м², $C_0 = 3$ кг/см³ = 30 н/10⁻⁶ м² = 30×10^6 н/м².

Определим расчётные величины массы M и момент инерции θ_z верхней плиты и агрегата.

Таблица 13

Наименование частей установки	Наименование элементов	Количество	Объём м ³	Вес т	Масса тм ⁻¹ сек ²		$p_{расч} \cdot \rho_i$ м	$nm_i \rho_i^2$
					Одного элемента	Всех элементов		
Машина	P ₁	2	—	9,6	0,98	1,96	5,95	69,5
	P ₂	2	—	22,4	2,32	4,64	2,25	23,3
	P ₃	4	—	14,6	1,49	5,96	4,62	127,3
	P ₄	2	—	26,1	2,66	5,32	2,35	27,4
Верхняя рама фундамента (с включением 50% массы стоек	Продольные балки Б-1	4	4,51	10,9	1,11	4,44	4,62	94,5
	Б-2	2	6,26	15,0	1,53	3,06	2,35	15,8
	Ригеля рам	2	6,0	14,4	1,47	2,94	5,95	100,4
	Ригеля рам	2	6,7	16,1	1,64	3,28	2,25	16,8
	стойки (50%)	4	3,74	9,1	0,93	3,72	6,35	149
стойки (50%)	4	3,74	9,1	0,83	3,72	3,2	36,8	

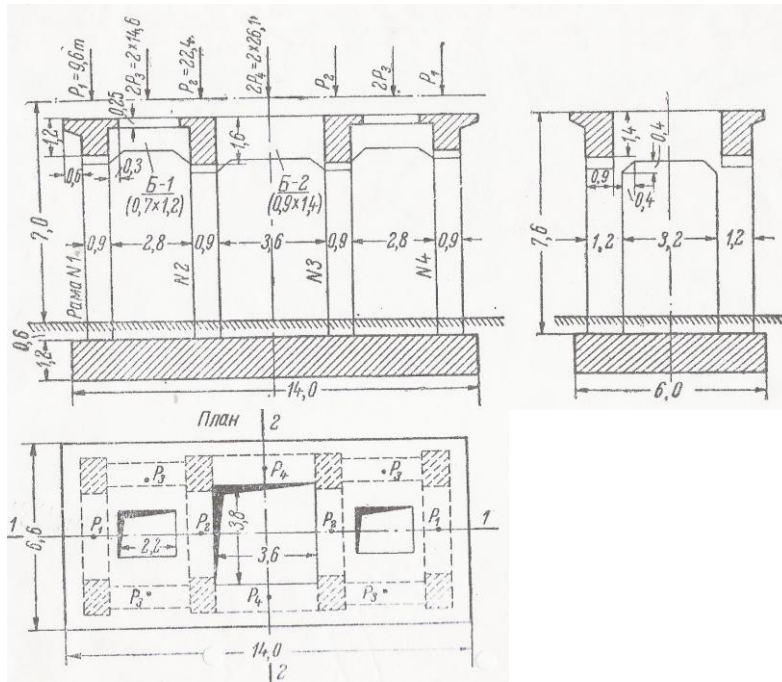


Рис.22. Габаритные размеры фундамента под мотор-генератор
 Результаты расчёта размеров и моментов инерции стоек и ригелей поперечных рам

Таблица 14

№ поперечных рам	Геометрические размеры в м					Расчётные размеры		Моменты инерции		$k = \frac{h \cdot J_e}{l \cdot J_h}$
	H_0	l_0	a	b	d	h	l	J_h	J_e	
1 и 4	7,0	4,4	1,0	1,0	1,2	6,88	4,0	0,129	0,155	2,0
2 и 3	6,8	4,4	1,2	1,0	1,6	6,89	4,0	0,129	0,295	3,7

По графику (рис.21) при $\frac{d_0}{n} = \frac{1,2}{6,8} \approx \frac{1}{5,5}$ при наименьшем $k=2$ находим $\nu_x = 0,9$.

Коэффициент жёсткости рамы №4 при $F \leq 2 \cdot 10^6 \text{ т/м}^2$, будет равен:

$$k_{1,4} = 0,9 \frac{12 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,129}{6,8^3} \frac{1+6 \cdot 2}{2+3 \cdot 2} = 1,47 \cdot 10^4 \text{ т/м},$$

$$k_{2,3} = 0,9 \frac{1,2 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,129}{6,6^3} \frac{1+6 \cdot 3,7}{2+3 \cdot 3,7} = 1,72 \cdot 10^4 \text{ т/м}$$

По этим значениям вычисляем:

$$k = 2 \cdot 1,47 + 1,72 \cdot 10^4 = 6,4 \cdot 10^4 \text{ т/м},$$

$$k_\varphi = 2 \cdot 5,95^2 \cdot 1,47 \cdot 10^4 + 2 \cdot 2,25^2 \cdot 1,72 \cdot 10^4 = 120,1 \cdot 10^4 \text{ т/м},$$

$$C_\varphi = 3 \left[1 + \frac{2 \cdot 14 + 3 \cdot 6}{1 \cdot 14 \cdot 6} \right] \sqrt{\frac{7,6}{2,0}} = 10,3 \text{ кг/см}^3,$$

$$C_x = 0,7 \cdot 3 \left[1 + \frac{2 \cdot 14 + 6}{1 \cdot 14 \cdot 6} \right] \sqrt{\frac{7,6}{2,0}} = 6,1 \text{ кг/см}^3,$$

$$C_\psi = 1,5 C_x = 1,5 \cdot 6,1 = 9,0 \text{ кг/см}^3.$$

Величину k_x определяем по формуле (17)

$$k_x = \frac{1}{\frac{1}{0,61 \cdot 6 \cdot 14} + \frac{8,8^2 \cdot 12}{1,03 \cdot 14 \cdot 6^3} + \frac{1}{6,4}} = 2,03 \cdot 10^4 \text{ т/м}$$

Определяем амплитуды по формулам (20), (21), (22):

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{2,03 \cdot 10^4}{39,04}} = 23 \text{ сек}^{-1},$$

$$A_x = \frac{0,12 \cdot 2 \cdot 9,6 + 22,4}{2,03 \cdot 10^4} \frac{8}{\sqrt{\left(1 - \frac{31,4^2}{23,02^2}\right)^2 \cdot 8^2 + \frac{31,4^2}{23,02^2}}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,42 \text{ мм} > 0,2 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\psi} = \sqrt{\frac{120,1 \cdot 10^4}{660,8 \left[1 + \frac{120,1 \cdot 10^4 \cdot 12}{9 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 6 \cdot 14^2 + 6^2}\right]}} = 41 \text{ сек}^{-1} < 1,3 \cdot 31,4 = 49 \text{ сек}^{-1}.$$

Таким образом, размеры фундамента выбраны неудовлетворительными. Необходимо уменьшить размеры сечений элементов поперечных рам и подошвы фундамента, чтобы увеличить расхождение λ_x и λ_{ψ} и уменьшить коэффициент. Предпочтительнее увеличить размеры до необходимых пределов. Т.о. увеличиваем ширину подошвы фундамента на 2 м и высоту сечения стоек поперечных рам на 0,3 м. Расчёты дают удовлетворительные результаты:
 $\lambda_x = 35 \text{ сек}^{-1}$, $A_x = 0,18 < 0,2 \text{ мм}$.
 $\lambda_{\psi} = 60 > 1,5 \cdot 31,4 \text{ сек}^{-1}$.

Литература

1. Савинов О.А. Фундаменты под машины. Основы проектирования. Л. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1955