УДК 69.04:624.042.8 DOI: 10.33622/0869-7019.2022.01.39-45

Расчет отдельно стоящей фундаментной плиты на нагрузки от промышленного оборудования

Юрий Тихонович ЧЕРНОВ, доктор технических наук, профессор, e-mail: chernovyut@mgsu.ru

Евгений Евгеньевич ПАРАМОНОВ, аспирант, e-mail: evg.paramonov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Фундаментные плиты конечных размеров получили широкое распространение в промышленном строительстве. На такие конструкции устанавливают достаточно разнообразное промышленное оборудование. Существует необходимость более детально рассмотреть и уточнить методики расчета подобных конструкций. Возможность установки оборудования на отдельные плиты или непосредственно на полы позволяет значительно экономить материалы и повысить универсальность промышленных зданий. Изложены рекомендации по расчету фундаментных плит на динамические нагрузки от промышленного оборудования. Показан пример расчета отдельно стоящей фундаментной плиты под инерционный грохот тяжелого типа. Расчеты выполнялись методом конечных элементов. Решение дифференциальных уравнений движения системы с конечным числом степеней свободы строится в виде разложения по формам собственных колебаний системы. Приведены расчет нагрузок от грохота, последовательность подбора оптимальных виброизоляторов. Даны основные зависимости для расчета подобных систем в переходных (пускоостановочных) режимах. Подробно изложены параметры расчетной схемы и особенности приложения нагрузок. На основе рекомендаций и указанных выше методов реализован комплекс программ на высокоуровневом языке программирования python, расчеты в котором позволяют учитывать особенности работы оборудования в переходных и стационарных режимах, виброизоляцию, а также различные виды динамической нагрузки. Изложенный материал дает возможность с достаточной степенью точности проводить расчеты подобных конструкций. Результаты расчетов показывают, что возможна установка оборудования тяжелого типа на отдельные плиты с учетом ограничений, приведенных в статье, и, как следствие, на жесткие подстилающие слои полов промышленных зданий.*

Ключевые слова: *фундаментная плита, промышленное оборудование, динамические нагрузки, активная виброизоляция, метод конечных элементов, метод разложения по собственным формам колебаний.*

CALCULATION OF A FREE-STANDING FOUNDATION PLATE FOR LOADS FROM INDUSTRIAL EQUIPMENT

Jury T. CHERNOV, e-mail: chernovyut@mgsu.ru

Evgeniy E. PARAMONOV, e-mail: evg.paramonov@yandex.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *Foundation slabs of finite sizes are widely used in industrial construction. Quite a variety of industrial equipment is installed on such structures. There is a need for a more detailed consideration and clarification of methods for calculating such structures. The possibility of equipment installation on separate plates or directly on the floors makes it possible to get significant savings in materials and increases the universality of industrial buildings. The article presents recommendations for the calculation of foundation slabs for dynamic loads from industrial equipment. An example of calculating a free-standing foundation plate for an inertial heavy-type screen is given. The calculations were performed by the finite element method. The solution of differential equations of motion of a system with a finite number of degrees of freedom is constructed in the form of an expansion according to the forms of natural oscillations of the system. The calculation of the loads from the screen, the sequence of selection of optimal vibration isolators are given. The main dependencies for the calculation of such systems in transient modes are given. The parameters of the design scheme and the features of the application of loads are described in detail. Based on the existing recommendations and the above methods, a set of programs has been implemented in the high-level python programming language, calculations in which allow taking into account the features of equipment operation in transient and stationary modes, vibration isolation, as well as various types of dynamic loads. The presented material makes it possible to perform calculations of such structures with a sufficient degree of accuracy. The results of calculations show that it is possible to install heavy-type equipment on separate slabs, taking into account the restrictions given in the article, and, as a result, on the rigid underlying layers of the floors of industrial buildings.*

Key words: *foundation plate, industrial equipment, dynamic loads, active vibration isolation, finite element method, method of decomposition by eigenforms of vibrations.*

© ЧЕРНОВ Ю. Т., ПАРАМОНОВ Е. Е., 2022

Введение

Расчет прочности и экономичности конструкций фундаментов машин относится к одной из важных областей строительного проектирования. Изучению этой проблемы посвящен достаточно большой объем отечественной литературы [1—3]. Однако суще-

ствуют вопросы, требующие дополнительных исследований в этой области, например возможность установки оборудования на легкие отдельные фундаментные плиты или непосредственно на полы промышленных зданий. Это важно и актуально для практики. Несомненно, установка оборудования на отдельные плиты и полы невозможна без тщательного исследования и расчетного обоснования принятых проектных решений. Уровни вибраций конструкций фундамента и оборудования сравниваются с допустимым уровнем, регламентируемым действующими нормативными документами, такими как СП 26.13330.2012 «СНиП 2.02.05-87 Фундаменты машин с динамическими нагрузками» (изменение № 1) [4].

Установка оборудования первой и второй категорий динамичности на подобные конструкции возможна без дополнительных систем виброизоляции. Когда речь заходит об установке более тяжелого оборудования (грохоты, молоты, прессы и т. п.) выбор систем виброизоляции особенно важен при расчете и проектировании тонких отдельных плит и полов промышленных зданий [5, 6], так как устройство виброизоляции позволяет устанавливать на фундаментные плиты более разнообразное оборудование. Виброизоляция важна также в связи с внедрением новых, в том числе чувствительных к вибрациям, машин и механизмов и принятием повышенных требований к их эксплуатации (пассивная виброизоляция) [7].

В статье рассматривается расчет тонких плит конечных размеров на динамические нагрузки от промышленного оборудования [8, 9]. Отметим, что плиты конечных размеров широко распространены в промышленном строительстве и представляют собой материалоемкие конструкции. Они обладают невысокой стоимостью, просты в изготовлении, легки в монтаже, перемонтаже или переустройстве. На такие плиты устанавливают различное промышленное оборудование, а именно станки, вентиляторы, насосы, штампы, грохоты, нетяжелые молоты.

Приводится пример расчета фундаментной плиты под инерционный грохот тяжелого типа. Грохоты (машины с периодической нагрузкой) широко применяются на заводах горнообогатительной промышленности. Расчет конструкций на действие периодической нагрузки от оборудования [3, 10, 11] сложный и в общем виде должен учитывать взаимовлияние фундамента и грунта основания. Проведенные исследования [1, 12] показывают, что осадки плит при действии динамических нагрузок и определенных уровнях ускорений колебаний могут становиться незатухающими. Также при расчете учитывалось действие нагрузки в переходных режимах [13, 14]. Современные расчеты несущих конструкций проводятся с помощью численных методов [15—17], поэтому в статье уделено особое внимание описанию расчетной схемы, а также сбору и особенностям приложения нагрузки. В целом тематика исследования достаточно обширна и представлена в отечественной и зарубежной литературе и периодических изданиях.

Материалы и методы

Плиты на упругом основании (грунте) рассчитывают методом конечных элементов в плоском приближении. Для описания напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в виде пластин используются соотношения теории пластин Кирхгофа—Лява. Это допущение принято исходя из соотношения минимального размера плиты в плане к толщине. Для учета упругого основания матрица жесткости конечного элемента дополняется матрицей жесткости упругого основания [15].

На основе результатов многочисленных экспериментов и их анализа в качестве основной модели для практических расчетов фундаментов принята наиболее простая модель, основанная на пропорциональной зависимости между реакцией основания и смещением. Отметим также, что перед устройством фундамента под машины с динамическими нагрузками основание необходимо тщательно подготовить и уплотнить. Все вышесказанное позволяет нам принять в расчетах модель с одним коэффициентом постели (Винклера—Фусса).

Существует достаточно обширная область исследований, связанная с оценкой влияния вибраций на свойства грунтов и осадки фундаментов. Влияние интенсивности сотрясений грунта на осадку зданий и сооружений не вполне ясно. Виброползучесть и, как следствие, появление незатухающих осадок может стать причиной серьезных аварий. Для исключения динамических осадок фундаментов под оборудование воспользуемся рекомендациями О. А. Савинова [1]. Предельно допустимыми можно считать вибрации с ускорениями в слабых грунтах до 15 см/с^2, в плотных — до 30 см/с^2.

Решение системы уравнений движения, как системы с конечным числом степеней свободы при динамических воздействиях, строится методом разложения по формам собственных колебаний [3]. Уравнение движения системы конечных элементов записывается в виде:

$$\mathrm{M}\ddot{y} + \mathrm{D}\dot{y} + \mathrm{K}y = Q, \qquad (1)$$

где M — матрица масс; D — матрица демпфирования; K — матрица жесткости; Q — вектор внешней узловой нагрузки;

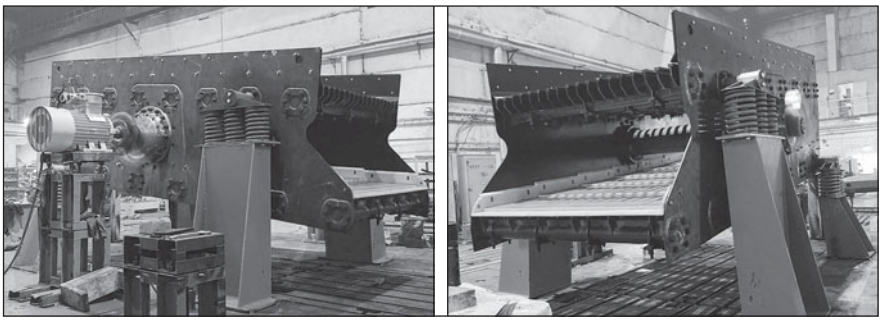


Рис. 1. ***Общий вид установки***

y, $\dot{y}$, $\ddot{y}$ — векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений.

Решение уравнения (1) представим следующим образом:

$$y = \Phi a, \qquad (2)$$

где Φ — матрица нормированных собственных векторов.

Подставив (2) в (1) и умножив слева на транспонированную матрицу Φ', получим:

$$\ddot{a} + \mathrm{D}^* \dot{a} + \mathrm{K}^* a = b, \qquad (3)$$

где K^* — диагональная матрица собственных значений; $\mathrm{D}^* = \Phi'\mathrm{D}\Phi$; $b = \Phi' Q$ — вектор, определяемый при разложении в ряд по собственным формам вектора нагрузки.

Отметим, что собственные векторы определяются не единственным образом, а с точностью до некоторого постоянного сомножителя N_r. Чаще всего эти множители выбираются таким образом, чтобы матрица $\Phi'\mathrm{K}\Phi$ была единичной:

$$N_r = \pm\sqrt{Y_r' M Y_r}, \qquad (4)$$

где Y_r — нормированный собственный вектор r-й формы колебаний; Y_r' — транспонированный собственный вектор r-й формы колебаний.

Обобщенная проблема поиска собственных значений решается методом Арнольди с неявным перезапуском [18], выбор этого метода обоснован большой размерностью исходных матриц.

При диагональной матрице демпфирования $\mathrm{D}^* = \mathrm{D}_d$ уравнение (3) распадается на n независимых уравнений относительно главных координат a_r:

$$\ddot{a}_r + d_r \dot{a}_r + p_r^2 a_r = b_r \qquad (5)$$
$$(r = 1, 2, ..., n).$$

Решения уравнений (5) строятся методами прямого интегрирования или при нулевых начальных условиях записываются в форме интеграла Дюамеля:

$$a_r(t) = \frac{1}{p_r^*}\int_0^t b_r(\tau) e^{-\frac{d_r}{2}(t-\tau)} \times \qquad (6)$$
$$\times \sin p_r^*(t-\tau) d\tau \quad (r = 1, 2, ..., n),$$

где $p_r^* = \sqrt{p_r^2 - \left(\frac{d_r}{4}\right)^2}$ — частота свободных колебаний, соответствующая r-й форме.

Интеграл (6) вычисляется методом Рунге—Кутта четвертого порядка [19]. Получив вектор нормальных координат, подставим его в выражение (2) и вычислим вектор перемещений.

Определив перемещения, можно достаточно просто выполнить расчет напряжений [15], что позволяет найти напряженно-деформированное состояние фундаментных плит при действии динамических нагрузок от промышленного оборудования.

На основе указанных выше выкладок реализован комплекс программ на высокоуровневом языке программирования python.

Рассмотрим расчет плиты конечных размеров на динамические нагрузки от промышленного оборудования на примере инерционного грохота тяжелого типа (ГИТ-52). Общий вид установки показан на *рис. 1*. Исходными данными для расчета служат технические характеристики оборудования, приведенные ниже.

Технические характеристики грохота

Кинематические параметры

Амплитуда колебаний короба . . . . . 5—8 мм

Частота вынужденных колебаний . . . . . 12,16±0,25 с$^{-1}$

Электродвигатель привода

Мощность . . . . . 18,5 кВт

Частота вращения . . . . . 730 мин$^{-1}$

Габаритные размеры движущейся части грохота:

длина . . . . . 4320 мм

ширина . . . . . 2664 мм

высота . . . . . 1500 мм

Масса движущейся части грохота с просеивающими поверхностями . . . . . 5560 кг

Максимальная масса сыпучего материала. . . . . 2500 кг

Угол наклона короба . . . . . 10—30°

Количество опор на грохоте . . 4 шт.

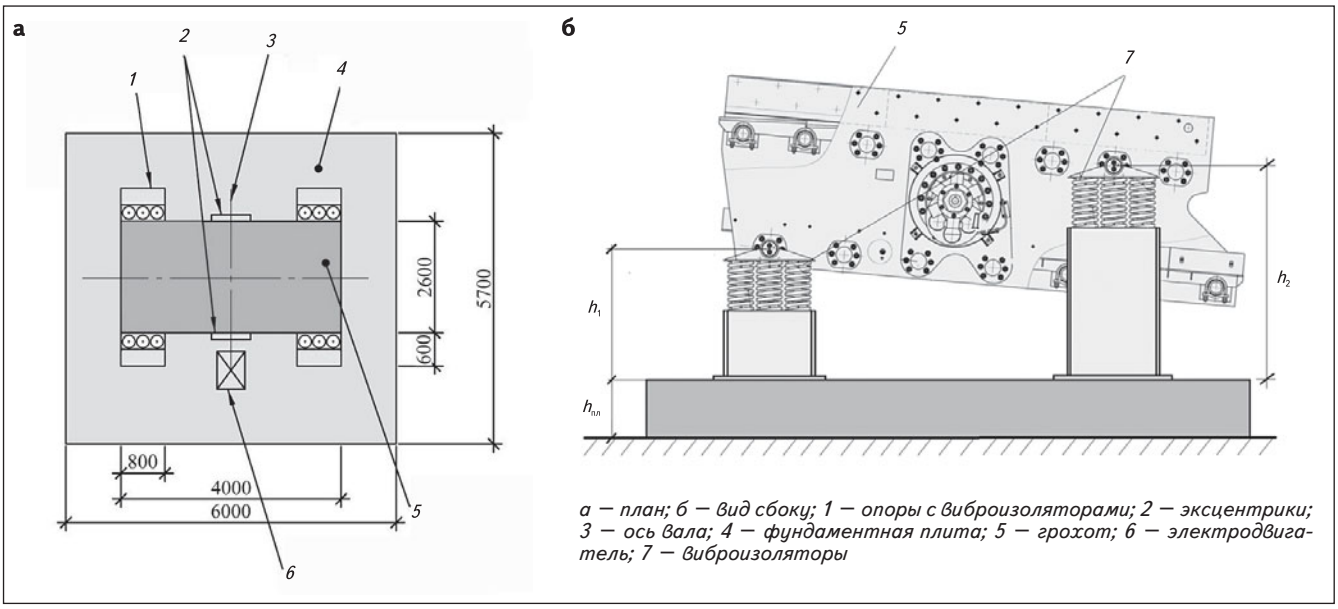
Количество пружин в опоре . . . 3 шт.

Установка расположена на железобетонной плите, изготовленной из бетона В30. Размеры плиты 6×5,7×0,2h м. Коэффициент постели основания равен 25 000 кН/м^3. Общая компоновка элементов грохота дана на *рис. 2*.

В общем случае периодическая нагрузка определяется как центробежная сила, приложенная в центре масс движущихся частей. Амплитудное значение P_0 периодической силы находят в соответствии с нормами и рекомендациями [20] по формуле

$$P_0 = me\omega^2, \qquad (7)$$

где m — полная масса движущихся частей (в грохотах масса коробов и 25 % массы обрабатываемого материала); e — относительный эксцентриситет центра движущихся масс, для грохота равен 0,2a_0, a_0 — амплитуда колебаний короба в соответствующем направлении (в первом приближении примем 7 мм); ω — угловая частота вращения, $\omega = \pi N/30$, N — частота вращения главного вала, мин$^{-1}$;



а — план; б — вид сбоку; 1 — опоры с виброизоляторами; 2 — эксцентрики; 3 — ось вала; 4 — фундаментная плита; 5 — грохот; 6 — электродвигатель; 7 — виброизоляторы

Рис. 2. ***Схема установки грохота***

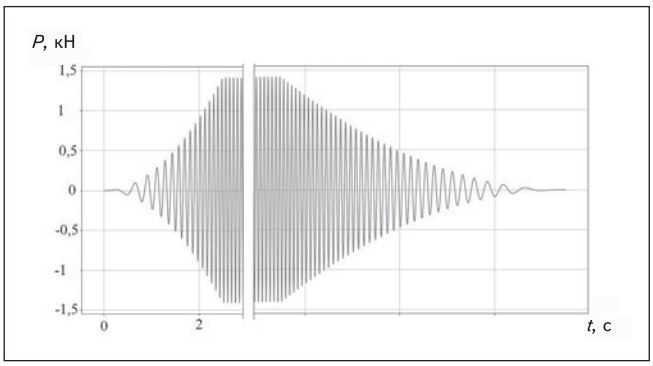
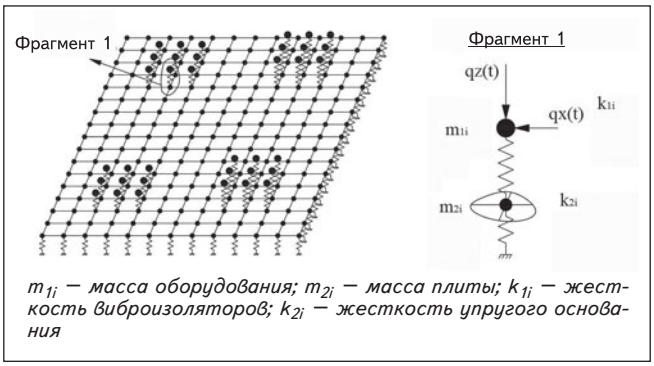


Рис. 3. ***График периодической нагрузки в режимах пуска и остановки машины***



m_{1i} — масса оборудования; m_{2i} — масса плиты; k_{1i} — жесткость виброизоляторов; k_{2i} — жесткость упругого основания

Рис. 4. ***Модель отдельно стоящей фундаментной плиты с установленным на нее грохотом***

$$P_0 = (5{,}56 + 0{,}25 \cdot 2{,}5) \cdot 0{,}2 \times$$

$$\times 0{,}007\left(\frac{\pi 730}{30}\right)^2 = 50{,}6 \text{ кН}.$$

Для учета работы грохота в переходных режимах внешняя нагрузка задается следующими зависимостями:

- *в режиме пуска*

$$q(t) = P_0\left(\frac{at}{\omega}\right)^2 \sin\left(\frac{\omega^2}{2a} + \frac{at^2}{2}\right);$$

- *в режиме остановки*

$$q(t) = P_0\left(\omega - \frac{b(t-t_0)^2}{\omega^2}\right) \times$$

$$\times \sin\left(\omega t - \frac{b(t-t_0)^2}{2}\right),$$

где t_0 — время начала остановки; a, b — коэффициенты, характеризующие скорость изменения нагрузки в переходных режимах, рад/с^2.

График изменения нагрузки представлен на *рис. 3*.

Грохоты относятся к категории машин с высокой виброактивностью и поэтому их устанавливают на виброизоляторы. Максимальный эффект гашения достигается при настройке гасителя на частоту вынужденных колебаний. Если частота вынужденных колебаний превышает частоты собственных колебаний системы, то в переходных режимах наибольшие перемещения возникают в околорезонансных зонах. Увеличение перемещений в этих зонах определяет в большой степени эффективность принятой системы виброизоляции.

В соответствии с руководством [21] при виброизоляции машин с периодической возмущающей нагрузкой необходимо, чтобы соблюдалось отношение

$$\frac{\omega_0}{\omega_z} \geqslant 4, \qquad \textbf{(8)}$$

где ω_0 и ω_z — круговые частоты вынужденных колебаний и собственных колебаний грохота соответственно.

Необходимую величину общих (суммарных) жесткостей всех виброизоляторов находят по формуле

$$k_z = m\omega_z^2. \qquad \textbf{(9)}$$

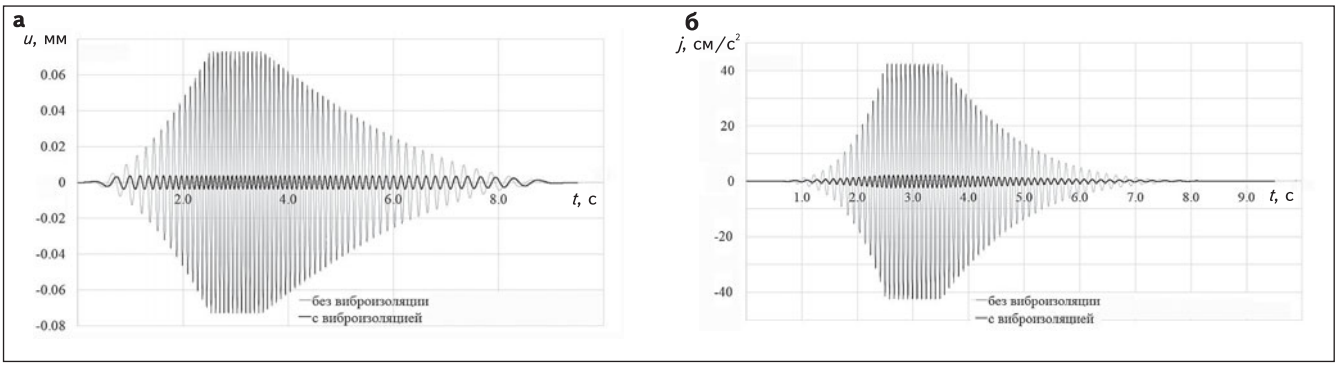


Рис. 5. ***Перемещения (а) и ускорения (б) плиты толщиной 0,2 м с учетом виброизоляции грохота и без учета***

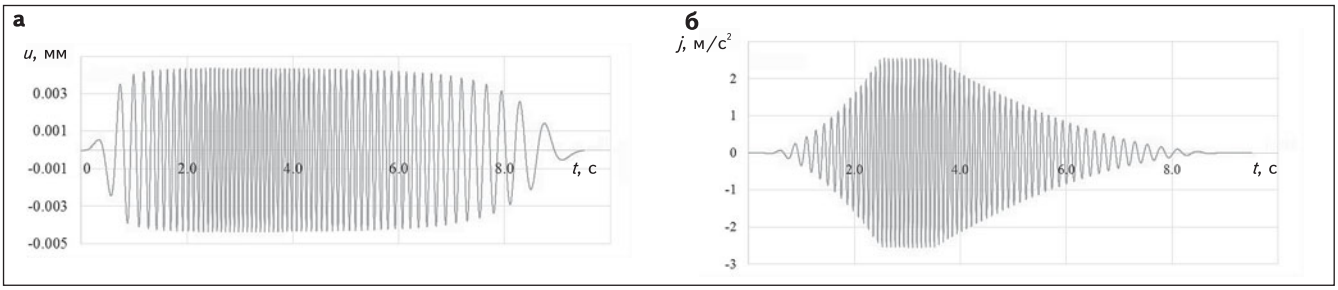


Рис. 6. ***Перемещения (а) и ускорения (б) плиты толщиной 0,15 м с учетом виброизоляции грохота***

Зная круговую частоту вынужденных колебаний и используя соотношения (8) и (9), вычислим жесткость виброизоляторов. Она равна 2259 кН/м. Учитывая, что грохот ГИТ-52 устанавливается на комплект из 12 пружин, жесткость одной пружины в вертикальном направлении составляет 188,25 кН/м.

Расчетная схема *(рис. 4)* строится с помощью дискретизации пространства конечными элементами, используется конечный элемент плиты на упругом основании. Для описания напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов в виде пластин применяют соотношения теории пластин Кирхгофа—Лява. Это допущение принято исходя из соотношения минимального размера плиты в плане к толщине.

Учет виброизоляции выполнен путем введения в схему специальных конечных элементов, обладающих жесткостью в соответствующих направлениях, равной жесткости виброизоляции (пружин). Матрица масс рассчитывается с учетом дополнительной массы от установленного на плиту оборудования.

Результаты расчета фундаментных плит совместно с оборудованием

Вариант расчета	Амплитуда		
	колебаний, мм	ускорений, см/с²	изгибающих моментов, кН·м
Плита толщиной 0,2 м:			
с виброизоляцией	$3{,}75 \cdot 10^{-3}$	2,18	1,514
без виброизоляции	$7{,}29 \cdot 10^{-2}$ (0,073 < 0,1)	42,6	1,779
Плита толщиной 0,15 м, с виброизоляцией	$4{,}38 \cdot 10^{-3}$	2,54	1,444

Масса грохота распределена равномерно между опорными точками и сосредоточена в местах расположения опорных конструкций на высоте непосредственного крепления грохота к виброизоляторам в соответствии с указанными техническими характеристиками и схемой установки оборудования.

Нагрузка прикладывается в точке крепления грохота к виброизоляции в вертикальном и горизонтальном направлениях, что позволяет учитывать дополнительные изгибающие моменты, возникающие от этих составляющих периодической нагрузки. При наиболее распространенной, но менее точной, схеме расчета виброизолированных объектов основание считается жестким, что позволяет на первом этапе рассчитывать только колебания оборудования, а далее, при расчете опорной конструкции (плиты), использовать реакции пружин виброизоляции в качестве нагрузки.

Результаты исследования

Результаты расчетов плит толщиной 0,2 и 0,15 м приведены в *таблице* и на *рис. 5, 6*.

Начальная осадка пружин виброизоляции составляет 3,5 см (при общей высоте пружины 40 см). Амплитуда колебания пружин — 1,02 мм. Амплитуды колебаний и ускорений в виброизолированной и невиброизолированной системах отличаются в 20 раз, что говорит о значительной эффективности виброизоляции.

Внутренние усилия незначительны, решающим критерием при проектировании подобных конструкций будет амплитуда колебаний (нормируемая величина), которая не должна превышать для машин с аналогичными характеристиками 0,1 мм. Частота основного тона плиты составляет 177,25 рад/с (28 Гц), что превышает частоту вынужденных колебаний грохота 76,45 рад/с (12 Гц). Колебания плиты и оборудования происходят в благоприятном, дорезонансном, режиме и пиковое увеличение амплитуд колебаний отсутствует.

Выводы

1. Приведенный алгоритм позволяет рассчитывать плиты конечных размеров с установленным на них виброактивным оборудованием, определять уровни колебаний плит при достаточно произвольных динамических воздействиях, в том числе при нагрузке, возбуждаемой оборудованием в эксплуатационных и переходных режимах.

2. Рассмотренная схема дает возможность учитывать пружинную виброизоляцию и податливость опорной конструкции, а также взаимное влияние областей приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние плиты.

3. На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что даже тяжелое виброактивное оборудование с правильно подобранной системой виброизоляции и соответствующим расчетным обоснованием может устанавливаться на тонкие фундаментные плиты, а также непосредственно на полы промышленных зданий.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *Савинов О. А.* Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Л. : Стройиздат, 1979. 346 с.
1. Savinov O. A. *Sovremennye konstrukscii fundamentov pod mashiny i ih raschet* [Modern designs of foundations for machines and their calculation]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1979. 346 p. (In Russian).
2. *Пятецкий В. М., Александров Б. К., Савинов О. А.* Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование. М. : Стройиздат, 1993. 415 с.
2. Pyateckyi V. M., Aleksandrov B. K., Savinov O. A. *Sovremennye fundamenty mashin i ih avtomatizirovannoe proektirovanie* [Modern machine foundations and their computer-aided design]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993. 415 p. (In Russian).
3. *Чернов Ю. Т.* Вибрации строительных конструкций. Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям. М. : АСВ, 2011. 383 с.
3. Chernov U. T. *Vibracii stroitelniyh konstrukcyi. Analiticheskie metody rascheta. Osnovy proektirovaniya i normirovaniya vibracyi stroitelnyh konstrukcyi, podvergauch' ihsya ekspluatacionnim dinamicheskim vozdeistviyam* [Vibration of building structures. Analytical calculation methods. Fundamentals of design and regulation of vibrations of building structures exposed to operational dynamic influences]. Moscow, ASV Publ., 2011. 383 p. (In Russian).
4. Bounds W. L., Wong S. S. K. Comparison of foundation design specifications for vibratory machines [Сравнение требований по проектированию фундаментов машин с периодической нагрузкой]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2016, no. 21(3). DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000284.
5. *Чернов Ю. Т., Зебилила М. К.* К расчету систем виброизоляции с демпферами вязкого трения // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 2. С. 34–38.
5. Chernov J. T., Zebilila M. K. To the calculation of vibration isolation systems with viscous friction dampers. *Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, 2018, vol. 2, pp. 34–38. (In Russian).
6. Niu B., Olhoff N. Minimization of vibration power transmission from rotating machinery to a flexible supporting plate [Минимизация предающихся вибраций от машин с вращающимися частями на прогибы опорных плит]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2014, no. 14(3). DOI: 10.1142/S0219455413500685.
7. Peukert B. W., Archenti A. Dynamic interaction between precision machine tools and their foundations [Динамическое взаимодействие между станками и их фундаментами]. *International Journal of Automation Technology*, 2020, no. 14(3), pp. 386–398. DOI: 10.20965/IJAT.2020.P0386.
8. Whitman R. V., Richart Jr. F. E. Design procedures for dynamically loaded foundations [Проектирование фундаментов на динамические нагрузки]. *Paper presented at the Geotechnical Special Publication*, 2002, no. 118(II), pp. 1218–1242.
9. Raja Sekhar P., Reddy E. R., Haritha Reddy B., Saibaba Reddy E. Dynamic analysis of foundation subjected to machine induced vibrations [Динамический расчет фундамента на нагрузки от оборудования]. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2020, no. 29(3 Special Issue), pp. 1693–1703.
10. Bhattacharya M. Deliberations on foundation design

methods for rotating machinery [Обзор методов проектирования фундаментов для машин с вращающимися частями]. *Paper presented at the MFPT 2019*: Where Theory Meets Practice, 2019.

11. Ali O. S., Mahamid M. Effect of soil-foundation interaction on the dynamic response of a four-cylinder compressor foundation [Учет влияния основания на динамический отклик фундамента четырехцилиндрового компрессора]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2018, no. 23(3). DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000380.
12. Aleksandrovych V. A., Havryliuk O. V. Investigation of the influence of dynamic loads of industrial equipment on the occurrence of prolonged yielding of their foundation soils [Исследование влияния динамических нагрузок от промышленного оборудования на возникновение длительных осадок грунтов основания]. *Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1021(1). DOI: 10.1088/1757-899X/1021/1/012010.
13. Elvin A. A., Elvin N. G. Structures subjected to startup and shutdown of rotating machinery [Конструкции при воздействии пуска и остановки машин с вращающимися частями]. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2015, no. 57(1), pp. 38–46. DOI: 10.17159/2309-8775/2015/v57n1a4.
14. *Коренев Б. Г., Рабинович И. М.* Динамический расчет зданий и сооружений (Справочник проектировщика). М. : Стройиздат, 1984. 303 с.
14. Korenev B. G., Rabinovich I. M. *Dinamicheskyi raschet zdaniy i soorughenyi (Spravochnik proectirovch'ika)* [Dynamic calculation of buildings and structures (Designer's Guide)]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 303 p. (In Russian).
15. *Секулович М.* Метод конечных элементов / пер. с серб. Ю. Н. Зуева, под ред. В. Ш. Барбакадзе. М. : Стройиздат, 1993. 660 с.
15. Seculovich M. *Metod konechnyh elementov* [Finite of element method] Perevod s serb. U. N. Zuyeva, pod red. V. Sh. Barbakadze. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993, 660 p. (In Russian).
16. Bathe K. *Computational fluid and solid mechanics* [Вычислительная механика жидкости и твердого тела]. 2003, pp. 1–2443. DOI: 10.1016/B978-0-08-044046-0.X5000-3.
17. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. *The finite element method for solid and structural mechanics* [Метод конечных элементов для объемного моделирования в строительной механике]. Seventh edition, 2013, pp. 1–624. DOI: 10.1016/C2009-0-26332-X.
18. Lehoucq R. B., Sorensen D. C., Yang C. *ARPACK users guide: Solution of large scale eigenvalue problems by implicitly restarted arnoldi methods* [Руководство пользователя ARPACK. Решение крупномасштабных задач на собственные значения неявным перезапуском методом Арнольди]. SIAM, Philadelphia, PA, 1998.
19. *Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.* Численные методы. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.
19. Bahvalov N. S., Jhidkov N. P., Kobelkov G. M. *Chislennye metody* [Numerical Methods]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2008. 636 p. (In Russian).
20. Пособие по проектированию конструкций зданий, испытывающих динамические воздействия / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 1986.
20. *Posobie po proektirovaniyu konstrukcyi zdaniy, ispytyvaush'ih dinamicheskie vozdeistviya* [A manual for the design of structures of buildings experiencing dynamic effects]. Moscow, CNIISK im. V. A. Koucherenko Publ., 1986. 229 p. (In Russian).
21. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования. М. : Стройиздат, 1972. 157 с.
21. *Rukovodstvo po proektirovaniyu vibroizolyacii mashin i oborudovaniya* [Guidelines for the design of vibration isolation of machinery and equipment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 157 p. (In Russian).

Для цитирования: *Чернов Ю. Т., Парамонов Е. Е.* Расчет отдельно стоящей фундаментной плиты на нагрузки от промышленного оборудования // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 1. С. 39–45. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.01.39-45.

For citation: Chernov Ju. T., Paramonov E. E. Calculation Of A Free-Standing Foundation Plate for Loads from Industrial Equipment. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 1, pp. 39–45. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2022.01.39-45.

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА eLIBRARY.RU

Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ULRICHSWEB™ GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: **www.pgs1923.ru**