

**КИРИЧЕК ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой землеустройства, строительства автодорог и геодезии Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры, действительный член Академии строительства Украины, член-корреспондент Международной инженерной академии, член ISSMGE.

Основные направления деятельности: экспериментальные и теоретические исследования работы фундаментов и оснований под действием динамических и статических нагрузок. Разработка новых конструкций фундаментов под машины с динамическими нагрузками. Разработка и совершенствование методов динамического и статического расчета оснований и фундаментов. Исследование динамических характеристик грунтов. Натурные испытания фундаментов турбоагрегатов, изучение влияния их температурных деформаций на динамику фундаментов. Конструктивные методы снижения вибрации строительных конструкций

Автор более 150 научных работ.

E-mail: yakirichuk@gmail.com

УДК 624.042.7:624.131.55

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННЫХ МАССИВНО-ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Ключевые слова: вибрации фундаментов, динамические нагрузки, комбинированные массивно-плитные фундаменты, динамический расчет.

Рассмотрен предложенный автором новый тип фундаментов под машины с динамическими нагрузками, состоящий из заглубленного массивного тела и присоединенных тонких горизонтальных плит. Выполнены расчеты комбинированных массивно-плитных фундаментов под действием динамических нагрузок методом конечных элементов. Разработаны аналитические решения колебаний таких фундаментов под машины с вращающимися и возвратно-поступательно движущимися частями. Проведены исследования взаимодействия массивно-плитных фундаментов с грунтом на крупномасштабных моделях. Показано, что эффективность массивно-плитных фундаментов выше, чем обычных массивных фундаментов для использования под турбоагрегаты, компрессоры, вентиляторы, центрифуги и т.п.

Розглянуто запропонований автором новий тип фундаментів під машини з динамічними навантаженнями, що складається із заглибленого масивного тіла та приєднаних тонких горизонтальних плит. Виконано розрахунки комбінованих масивно-плитних фундаментів під дією динамічних навантажень методом скінчених елементів. Отримані аналітичні рішення для коливань таких фундаментів під машини з частинами, що обертаються. Проведено дослідження взаємодії масивно-плитних фундаментів із ґрунтом на великомасштабних моделях. Показано, що ефективність масивно-плитних фундаментів вище, ніж звичайних масивних фундаментів для використання під турбоагрегати, компресори, вентилятори, центрифуги і т.п.

A new type of foundation under machines with dynamic loading is presented. The combined massive and plate foundation consist of deepened rigid solid mass and attached thin horizontal plates. Finite element analysis of the combined massive and plate foundation under machines with periodic loading is conducted. The analytical method of dynamic analysis of combined massive plate foundations under impact, rotating and reciprocal machines under dynamic loadings is applied. Experimental investigation of the combined massive and plate foundation interaction with a soil base was performed on large-scale models in the open ground. It was shown that the combined massive and plate foundations are much more efficient compared to conventional block-type foundations under dynamic machines, such as turbo-pumps, compressors, fans, centrifuges, etc.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Мощные машины с вращающимися и движущимися возвратно поступательно частями нуждаются в фундаментах, способных гасить большие динамические нагрузки и возникающие вибрации. Такие фундаменты должны быть способными передавать динамическую нагрузку на основание без значительных вибраций. В промышленном строительстве используются различные типы фундаментов в зависимости от вида машин и динамических нагрузок. Под машины с низкочастотными динамическими нагрузками широко применяются массивные фундаменты, динамические характеристики которых зависят от их массы и площади подошвы [1]. Поскольку существенно изменять размеры и массу фундаментов не представляется возможным, то и динамические характеристики этих фундаментов, такие как амплитуда вынужденных колебаний и частота собственных колебаний не удается обеспечивать в заданном диапазоне из-за близости рабочей и резонансной частоты. Массивные фундаменты имеют очень большую массу, в результате

чего их собственная частота невысокая и находится в узкой зоне, присущей низкочастотным машинам. В результате, невзирая на большую массу, такие фундаменты зачастую обладают высокими вибрациями, снизить которые проблематично традиционным путем. Гораздо более эффективными в таких случаях являются плитные фундаменты [2], они обладают лучшими динамическими характеристиками, однако их применение сдерживается высокой гибкостью плит и невозможностью монтажа тяжелых машин на тонких плитах.

Для машин с низкочастотными динамическими нагрузками предложен новый вид фундаментов, который назван «комбинированный массивно-плитный фундамент» состоящий из заглубленных жестких рам или массивов или стен и горизонтальных тонких плит на разном уровне [3]. Динамические характеристики таких фундаментов зависят от расположения, количества, площади и толщины плит. Таким образом, в процессе проектирования имеется возможность в зависимости от этих параметров обеспечивать нужные значения динамических характеристик фундаментов. Собственная частота комбинированных массивно-плитных фундаментов в зависимости от их конструктивных параметров может находиться в широком диапазоне частот, как показали предварительные расчеты методом конечных элементов (рис.1), она значительно выше рабочей частоты, Следовательно, уровень низкочастотных вибраций таких фундаментов невысокий и значительно меньше, чем массивных фундаментов [4].

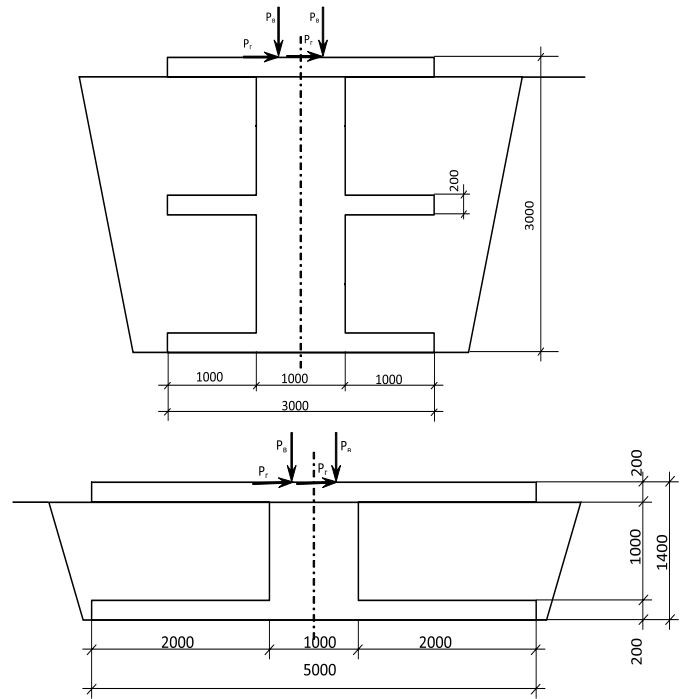


Рис.1. Схема комбинированного массивно-плитного фундамента.

2. ИСПЫТАНИЯ КРУПНО-МАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ И ОПЫТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ.

Для изучения динамических характеристик комбинированных массивно-плитных фундаментов проведены динамические испытания крупно-масштабных моделей и опытных фундаментов на полигоне и в натуральных условиях. Такие исследования позволили оценить эффективность комбинированных фундаментов с точки зрения способности воспринимать динамические нагрузки, определить основные зависимости параметров фундамента и характеристик его колебаний, а также уточнить предпосылки динамического расчета фундаментов.

Испытываемые фундаменты состояли из тонких железобетонных горизонтальных плит, расположенных в грунте, объединенных между собой массивом или стержневой конструкцией. Колебания опытных фундаментов возбуждались горизонтальной и вертикальной периодической силой вибратором в диапазоне частот от 8 до 56 Гц.

Испытания выполнены в опытном котловане на территории научно-исследовательского полигона в г.Днепропетровске. Инженерно-геологические условия на опытной площадке: с поверхности залегает почвенно-растительный слой мощностью 0,4м – 0,9м. Ниже – макропористые лессовые суглинки твердой консистенции толщиной слоя 1м – 4м, ниже макропористые суглинки 4,5м – 9м, подстилаемые лессами от твердой до пла-

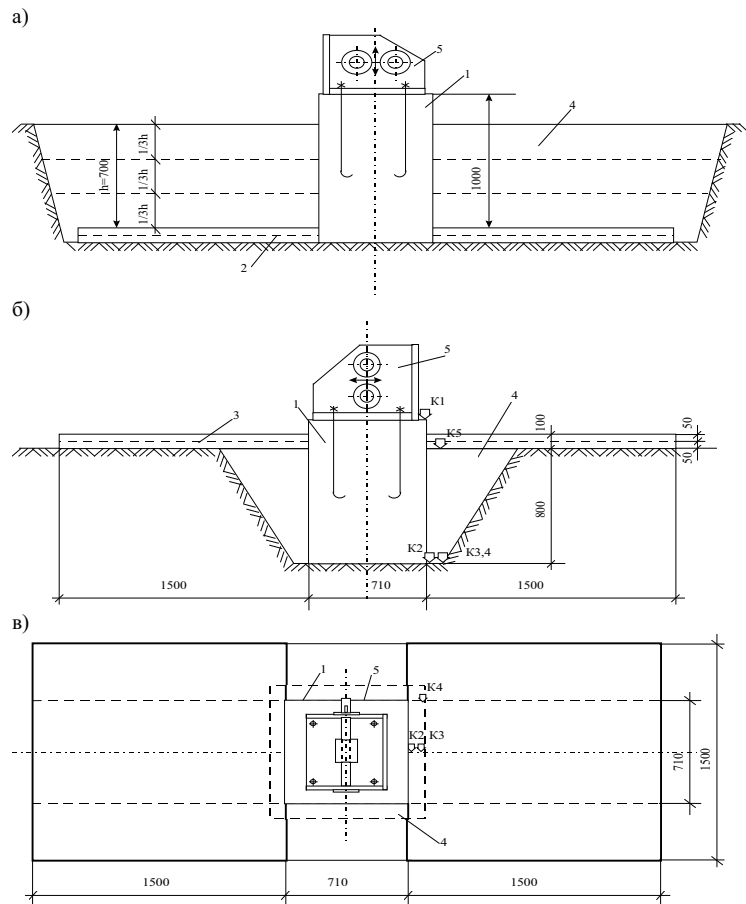


Рис.2. Экспериментальный фундамент: а – фундамент с нижним расположением плиты; б – фундамент с верхним расположением плиты; в – план фундамента и установки; 1 – массивная часть фундамента; 2 – нижняя плита; 3 – верхняя плита; 4 – обратная засыпка; 5 – вибратор.

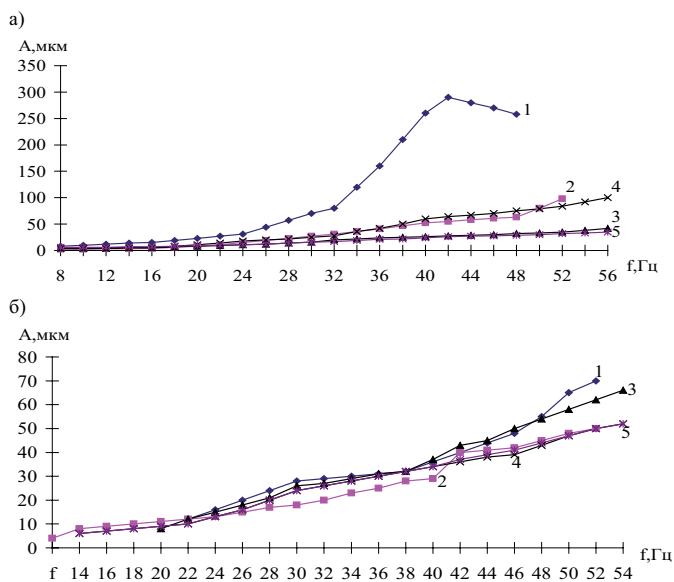


Рис.3. Амплитудно-частотные характеристики: а – горизонтальных колебаний, б – вертикальных колебаний комбинированных массивно-плитных фундаментов с верхним расположением плит; 1 – без плит; 2 – при площади плиты $F = 2,13\text{м}^2$ и толщине $h = 0,05\text{м}$; 3 – $F = 4,5\text{м}^2$ и $h = 0,05\text{м}$; 4 – $F = 2,13\text{м}^2$ и $h = 0,1\text{м}$; 5 – $F = 4,5\text{м}^2$ и $h = 0,1\text{м}$.

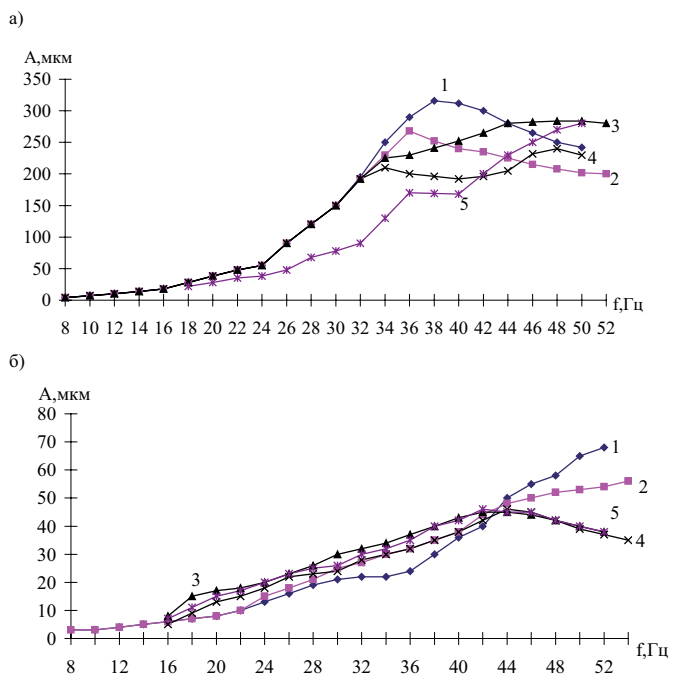


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики: а – горизонтальных колебаний, б – вертикальных колебаний комбинированных массивно-плитных фундаментов с нижним расположением плит; 1 – без плит; 2 – при площади плиты $F = 2,13\text{м}^2$ и толщине $h = 0,05\text{м}$; 3 – $F = 4,5\text{м}^2$ и $h = 0,05\text{м}$; 4 – $F = 2,13\text{м}^2$ и $h = 0,1\text{м}$; 5 – $F = 4,5\text{м}^2$ и $h = 0,1\text{м}$.

стичной консистенции мощностью 3,5м – 6м. Глубина опытного котлована составляла 1,8м. В основании моделей фундаментов характеристики твердых макропористых суглинков следующие: $\gamma = 19,7\text{кН/м}^3$; $w = 0,22$; $e = 0,85$; $E = 10\text{МПа}$; $C = 0,031\text{МПа}$; $\varphi = 2$ град.

Экспериментальный фундамент состоял из железобетонного массива с площадью подошвы $0,5\text{м}^2$, высотой 1м и плит толщиной 5 и 10см. Площадь плит составляла $2,13\text{м}^2$ и $4,5\text{м}^2$. Величина инерционной нагрузки при частоте 50Гц достигала значений от 12,7 до 25,4кН. Полученные амплитудно-частотные характеристики фундаментов с верхним и нижним расположением плит приведены на рисунках 3 и 4.

Как видно из сравнения АЧХ фундаментов, плита, расположенная на поверхности грунта, способствует значительному снижению горизонтальных колебаний фундамента, особенно в зоне средних и высоких частот. Двукратное увеличение площади плиты способствует снижению интенсивности колебаний фундамента практически в два раза. Повышение же толщины плиты с 50 до 100 мм на уровне колебаний фундамента практически не сказывается, свидетельствуя о том, что толщина плиты в принятом диапазоне практически не влияет на горизонтальные колебания.

На основании проведенных исследований можно заключить, что увеличение площади верхней плиты комбинированного массивно-плитного фундамента способствует существенному снижению уровня горизонтальных колебаний, а изменение ее толщины не сказывается на параметрах колебаний. Размеры плиты, расположенной по подошве фундаментов, меньше влияют на горизонтальные колебания фундамента, чем при верхнем ее расположении. Наименьшей интенсивностью колебаний обладает фундамент с плитой максимальной толщины и ширины. Сравнение амплитудно-частотных характеристик с различными параметрами плит позволяют оценить их влияние на колебания массивно-плитных фундаментов. Так можно отметить, что уровень вибрации фундамента возможно уменьшить вдвое при соответствующем увеличении площади плиты. Причем проявляющийся эффект уменьшения уровня колебаний от верхней плиты больше при горизонтальных колебаниях, а нижней плиты – при вертикальных колебаниях.

Тонкая плита на поверхности основания может существенно снизить вибрации массивного фундамента. Рисунки 5 и 6 демонстрируют результаты динамических испытаний таких крупномасштабных моделей.

Амплитудно-частотные характеристики горизонтальных колебаний бетонного кубического массива с ребром 1м возможно существенно изменить после присоединения тонкой плиты, расположенной на поверхности грунта. Так первую резонансную частоту удалось повысить на 42-64%, а высокочастотные вибрации снизить в 3 – 4 раза.

Вибрации тонкой плиты, присоединенной к массиву, быстро снижаются по мере удаления от него. На рис.7 показаны результаты замеров вибраций вдоль плиты крупномасштабной модели. Такой же характер быстрого снижения вибрации плиты по мере удаления от массивного фундамента демонстрируют замеры вибрации на реальном оборудовании, установленном на площадке тепловой электростанции (рис 8).

Выполненный анализ методом конечных элементов и результаты крупномасштабных испытаний позволяют

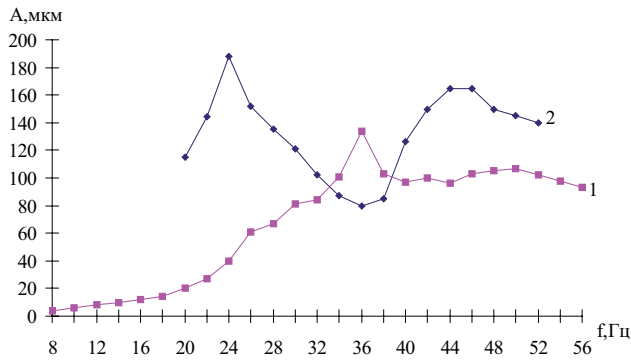


Рис.5. Амплитудно-частотные характеристики горизонтальных колебаний фундаментов: 1 – плита 8 м²; 2 – без плиты.

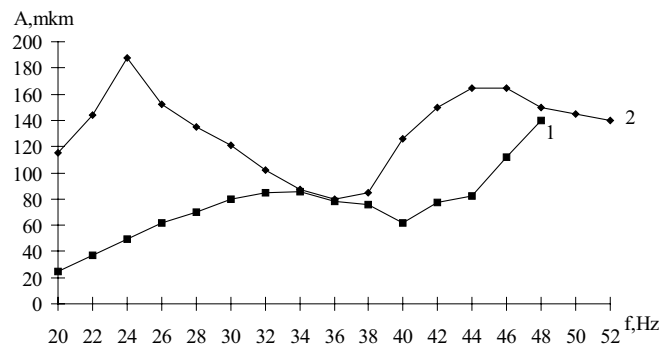


Рис.6. Амплитудно-частотные характеристики горизонтальных колебаний фундамента: 1 – плита 12 м²; 2 – без плиты.

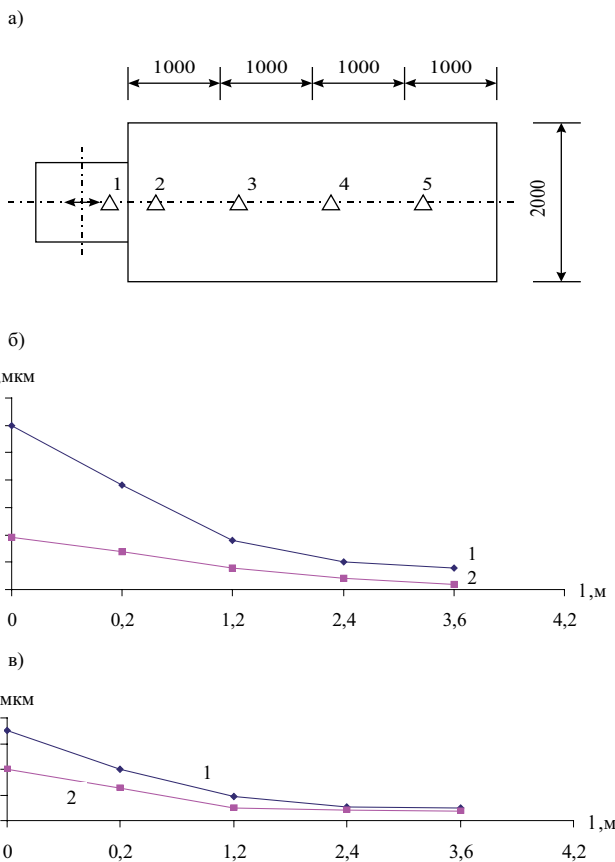


Рис.7. Зависимость амплитуд колебаний плиты от расстояния до массивного фундамента: а – схема фундамента; б – вертикальные перемещения фундамента; в – горизонтальные перемещения фундамента; где 1 – перемещения при частоте возмущающей силы 40 Гц; 2 – перемещения при частоте возмущающей силы 20 Гц.

заключить, что комбинированные массивно-плитные фундаменты имеют существенное преимущество над широко применяемыми в строительстве массивными фундаментами под машины с динамическими нагрузками. Применение новых фундаментов позволяет добиться гораздо более низкого уровня вибрации в диапазоне частот от 9 до 30 Гц. Присоединение тонкой железобе-

тонной плиты к массивному фундаменту может вызвать снижение уровня его вибрации в два – три раза в результате значительного повышения резонансной частоты колебаний.

3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

При выборе расчетной схемы комбинированного массивно-плитного фундамента в данной работе предложены два варианта расчетных схем. При рассмотрении вертикальных колебаний комбинированных массивно-плитных фундаментов массив моделируется сосредоточенной массой на упругом основании, плиты – пластиной или балкой. Тогда мы имеем дело с хорошо изученными в механике задачами о колебаниях балок и пластин с сосредоточенными массами [1], что дает возможность использовать для решения соответствующих задач интегральные преобразования, ряды Фурье, методы осреднения [5]. При исследовании горизонтальных колебаний комбинированных массивно-плитных фундаментов используются простые модели с сосредоточенными параметрами или полосы с включениями. Это позволяет применять развитые в теории упругости асимптотические методы [6] и методы интегральных преобразований.

Аналитическое решение для горизонтально-вращательных колебаний массивно-плитного фундамента (рис.9) под действием горизонтальной периодической силы может быть получено из дифференциального уравнения перемещений (1):

$$m \ddot{x} + (K_x + K_{xn}) \cdot x - [K_x h_1 - (-1)^k K_{xn} h_2] \varphi = P_x(t); \quad (1)$$

$$\theta \ddot{\varphi} + (K_\theta + K_x h_1^2 + (-1)^k K_{xn} h_2^2 - Q h_1) \varphi + (K_{xn} h_2 - K_x h_1) x = M_v [P_v(t)],$$

где: m- масса блока;

K_x, K_{xn} – коэффициенты жесткости основания массивного блока и плит при сдвиге;

K_θ - коэффициенты жесткости основания массивного блока при упругом неравномерном сжатии.

Решение уравнения для амплитуды вынужденных колебаний имеет вид:

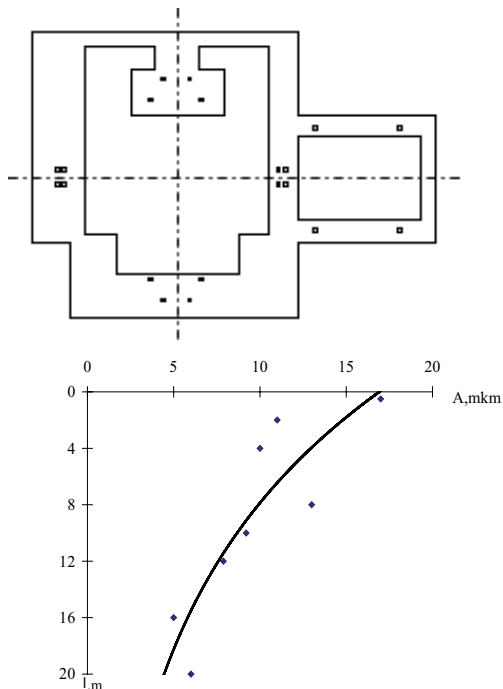


Рис.8. Изменения амплитуды горизонтальных колебаний вдоль железобетонной плиты пола.

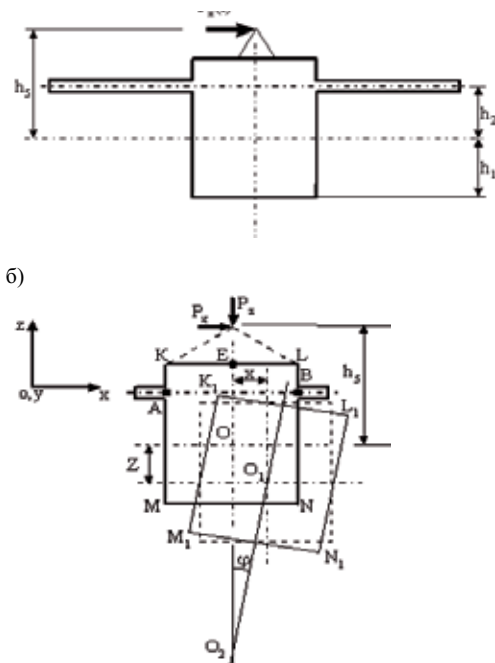


Рис.9 Расчетная схема горизонтально-вращательных перемещений массивно-плитного фундамента.

$$A_x = \frac{P}{\alpha} \left[1 + \frac{\alpha h_5 + \varepsilon}{\alpha \gamma - \beta \varepsilon} (\beta + h_5 \alpha) \right],$$

где:

$$K_x + K_{xII} - m\omega^2 = \alpha; \tag{2}$$

$$K_x h_1 - (-1)^k K_{xII} h_2 = \beta;$$

$$K_\phi + K_x h_1^2 + (-1)^k K_{xII} h_2^2 - Qh_1 - \theta\omega^2 = \gamma;$$

$$K_x h_1 - K_{xII} h_2 = \varepsilon.$$

Значение собственных частот фундаментов определяется из выражения:

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(A \pm \sqrt{A^2 - 4B} \right)}, \tag{3}$$

где: $A = \frac{K_x + K_{xII}}{m} + \frac{K_\phi - Qh_1 + K_x h_1^2 + (-1)^k K_{xII} h_2^2}{\theta}$;

$$B = \frac{\left[2(-1)^k K_x K_{xII} h_1^2 + (K_x + K_{xII}) (K_\phi - Qh_1) \right]}{\theta \cdot m}.$$

Полученные выражения показывают удовлетворительное соответствие с данными экспериментальных исследований.

ВЫВОДЫ:

Разработанные новые комбинированные массивно-плитные фундаменты, состоящие из жестких массивов и заглубленных тонких горизонтальных плит, имеют преимущества перед широко распространенными массивными фундаментами. Это позволяет рекомендовать их использование под турбонасосы, компрессоры, вентиляторы, центрифуги и т.п. Как показывают выполненный анализ методом конечных элементов и проведение крупномасштабных испытаний моделей, эти фундаменты обладают значительно более высокими собственными частотами и, следовательно, более низким уровнем вибрации. Горизонтальная тонкая железобетонная плита, расположенная на поверхности грунта, оказывает благоприятное влияние на вибрации, снижая, как правило, интенсивность колебаний массивных фундаментов. Для большинства расчетных моделей получены аналитические решения, показывающие удовлетворительное соответствие с результатами экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barkan D. Dynamics of bases and foundation. New York, McGraw – Hill Company, inc, 1962. 434 p.
2. Савинов О.А., Фундаменты под машины. Л.-М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1955. – 292 с.
3. Киричек Ю.А. Конструктивные решения комбинированных массивно-плитных фундаментов под машины с динамическими нагрузками // Сб. научн. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА. –1998. – Вып.5. – Часть 2. – С. 16-21.
4. Киричек Ю.А. Анализ взаимодействия комбинированных массивно-плитных фундаментов с основанием методом конечных элементов // Сб. научн. тр. «Материаловедение, строительство и машиностроение». –Днепропетровск: ПГАСА.- 1999. – Вып.8, часть 2. – С. 37-43.
5. Андрианов И.В., Лесничая В.А., Маневич Л.И. Метод усреднения в статике и динамике ребристых оболочек. М. : Наука, 1985. – 221 с.
6. Маневич Л.И., Павленко А.В., Коблик С. Г. Асимптотические методы в теории упругости ортотропного тела. – Киев - Донецк: Вища школа. – 1982. – 152 с.