

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499>

УДК 624.13

Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости

Докт. техн. наук., проф. С. В. Босаков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Рассмотрена задача расчета кольцевой плиты на сваях на упругом основании при условии нахождения части плиты в одной плоскости. Подобная задача возникает в практике при расчете свайно-плитного фундамента дымовых труб ТЭЦ. Расчет выполняется способом Б. Н. Жемочкина – смешанным методом строительной механики, где за неизвестные принимаются усилия в разрезанных связях Б. Н. Жемочкина на контакте плиты и упругого основания, линейные и угловые перемещения введенного защемления на плите, пружинах, которыми моделируются сваи, и неизвестные усилия, вызывающие перемещения части кольцевой плиты в одной плоскости. Известными считаются внешние вертикальная сила, момент. Сформирована в общем виде система линейных алгебраических уравнений для решения поставленной задачи. Получены результаты для кольцевого свайно-плитного фундамента дымовой трубы. Приводятся графики распределения контактных напряжений, перемещений для нескольких сечений фундаментной плиты, усилий в сваях и внешней нагрузки, вызывающей перемещения части плиты в одной плоскости. Полученные результаты могут быть заложены в нормативные документы Республики Беларусь и Российской Федерации.

Ключевые слова: кольцевая плита, свая, способ Б. Н. Жемочкина, упругое основание, контактные напряжения

Для цитирования: Босаков, С. В. Расчет кольцевого свайно-плитного фундамента при условии нахождения части плиты в одной плоскости / С. В. Босаков // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 6. С. 495–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499>

Calculation of Ring Pile-Slab Foundation Under Condition of Part of the Slab in the Same Plane

S. V. Bosakov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The problem of calculating a ring slab on piles on an elastic foundation is considered, provided that a part of the slab is in the same plane. A similar problem arises in practice when calculating the pile-slab foundation of chimneys of a thermal power plant. The calculation is performed using the method of B. N. Zhemochkin – a mixed method of structural mechanics, where the unknown forces in the cut connections of B. N. Zhemochkin at the contact of the slab and the elastic base, the linear and angular displacements of the introduced pinching on the slab, the springs that simulate the piles and the unknown forces that cause movement of part of the annular slab in one plane. The external vertical force and moment are considered as known. A system of linear algebraic equations has been formed in a general form to solve the problem. The results are obtained for a circular pile-slab foundation of a chimney. Graphs are presented of the distribution of contact stresses, displacements for several sections of the foundation slab, forces in piles and external loads that cause movement of a part of the slab in one plane. The results obtained can be included in the regulatory documents of the Republic of Belarus and the Russian Federation.

Keywords: ring slab, pile, method of B. N. Zhemochkin, elastic foundation, contact stresses

For citation: Bosakov S. V. (2023) Calculation of Ring Pile-Slab Foundation Under Condition of Part of the Slab in the Same Plane. *Science and Technique*. 22 (6), 495–499. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-495-499> (in Russian)

Адрес для переписки

Босаков Сергей Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-93-04
sevibo@yahoo.com

Address for correspondence

Bosakov Siarhei V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-93-04
sevibo@yahoo.com

Введение

При расчетах плитных и плитно-свайных фундаментов высотных сооружений на эксплуатационные нагрузки, очевидно, точки плиты, где опираются колонны, диафрагмы жесткости, стены вследствие большой жесткости надфундаментного строения примерно находятся в одной плоскости. В отечественной научной литературе на это впервые обратила внимание Т. А. Маликова [1]. Расчеты многоэтажных зданий методом конечных элементов на программных комплексах подтвердили справедливость этого утверждения [2, 3]. В работе [4] было использовано такое предположение при расчете металлической базы колонны двутаврового поперечного сечения. В монографии [5] рассматривается плоский вариант нахождения точек фундаментной балки в одной плоскости. Различные аспекты расчета свайно-плитных и плитных фундаментов многоэтажных зданий приводятся в работах [6–9].

Ниже предлагается линейно-упругий расчет свайно-плитного кольцевого фундамента при условии, что часть точек фундаментной плиты по окружности лежит в одной плоскости. Практическим аналогом рассматриваемой задачи является кольцевой фундамент дымовой трубы ТЭЦ. Расчет выполняется способом Б. Н. Жемочкина [10] в полярной системе координат.

Постановка задачи

Рассмотрим кольцевую плиту, лежащую без трения в контактной зоне, на упругом основании. Разобьем ее концентрическими окружностями и радиально расходящимися лучами на участки Б. Н. Жемочкина. В центре каждого участка поставим жесткую вертикальную связь, через которую осуществляется контакт плиты с упругим основанием. Будем считать, что по краям каждого среднего участка находятся пружины вертикальной жесткостью R , которыми моделируются вертикальные сваи. Также допустим, что центры средних участков Б. Н. Жемочкина находятся в одной плоскости. Определим их уравнением

$$W(r, \theta) = W_0 + \theta_x r \sin[\theta] + \theta_y r \cos[\theta], \quad (1)$$

где θ_x, θ_y – углы поворота плоскости окружности, в которой находятся центры средних участков Б. Н. Жемочкина.

Также к центрам средних участков приложена неизвестная внешняя нагрузка Y_b , которая вызывает вертикальные перемещения точек окружности. На ней расположены центры средних участков, лежащие в одной плоскости (рис. 1). Равнодействующую внешней нагрузки известны и равны Z и M_y .

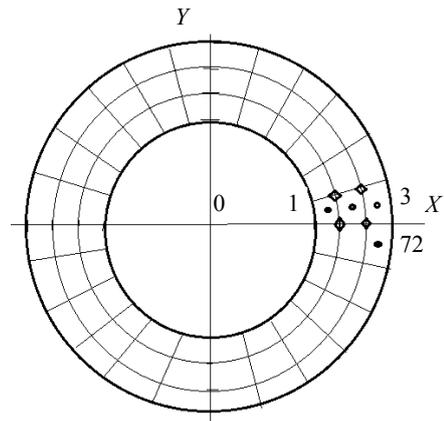


Рис. 1. Разбивка кольцевой плиты на участки Б. Н. Жемочкина

Fig. 1. Breaking out the ring slab to the plots of B. N. Zhemochkin

Поставленную задачу решаем смешанным методом строительной механики [11], вводя защемление в точке внутренней окружности плиты (рис. 2), разрезав все связи Б. Н. Жемочкина и пружины, моделирующие сваи.

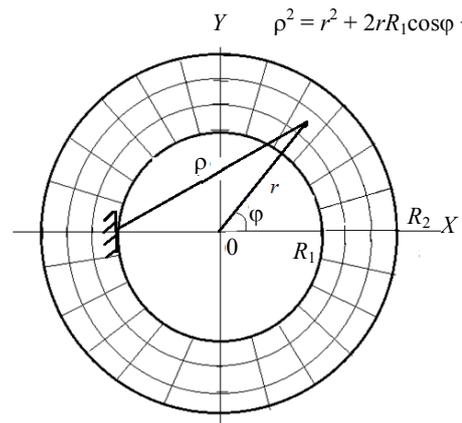


Рис. 2. Основная система смешанного метода для решения задачи

Fig. 2. Basic mixed method system to solve the problem

При применении способа Б. Н. Жемочкина необходимо иметь выражения для определения перемещений поверхности упругого основания

от действия единичной силы, распределенной по участку Б. Н. Жемочкина, и прогибы кольцевой плиты с защемленной нормалью от различно приложенной сосредоточенной силы. Перемещения упругого основания от действия единичной силы, распределенной по участку в полярных координатах, имеют довольно сложный вид даже для полупространства и здесь не приводятся.

Прогибы кольцевой плиты с защемленной нормалью (рис. 2) найдены методом Ритца [12] при представлении их функцией, удовлетворяющей граничным условиям по перемещениям:

$$W(r, \varphi) = (r^2 + 2rR_1 \cos \varphi + R_1^2) \times (A_0 + A_1 \cos \varphi + B_1 \sin \varphi), \quad (1)$$

где коэффициенты A_0 , A_1 , B_1 зависят от размеров и жесткости кольцевой плиты, места приложения и величины внешней нагрузки.

При принятой разбивке плиты на участки Б. Н. Жемочкина (рис. 1) за неизвестные принимаются:

- 72 усилия в связях Б. Н. Жемочкина;
- 48 усилий в сваях-пружинах;

- 24 внешние узловые нагрузки;
- 6 неизвестных линейных и угловых перемещений введенного защемления и уравнения плоскости окружности, на которой находятся внешние узловые силы (табл. 1).

Структура системы линейных алгебраических уравнений для решения рассматриваемой задачи приведена на рис. 3.

Уравнение плоскости, в которой находятся 24 точки плиты, к которой приложены внешние неизвестные силы Y_k , выражаются через усилия в связях Б. Н. Жемочкина в следующем виде:

$$W(r_i, \varphi_i) = \frac{1 - \nu_0^2}{\pi E_0} \sum_{k=1}^{72} F_{i,k} X_k, \quad (2)$$

где $F_{i,k}$ – функция для определения вертикальных перемещений точки i поверхности упругого основания от единичной силы, распределенной по участку Б. Н. Жемочкина с номером k ; зависит от вида упругого основания, некоторые функции можно найти в [13]; E_0 , ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона упругого основания.

Таблица 1

Усилия в связях Б. Н. Жемочкина	Три перемещения	Усилия в пружинах	Неизвестные силы	Три перемещения	
Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от усилий в этих связях (72 неизвестных, 72 уравнений)	Перемещения от введенного защемления (3)	Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от усилий в пружинах (48)	Взаимные перемещения концов разрезанных связей Б. Н. Жемочкина от неизвестных усилий (24)	Перемещения плоскости окружности загрузки (3)	Свободные члены 0
Уравнения равновесия (3 уравнений)	0			0	0
Перемещения точек вершин свай от усилий в связях Б. Н. Жемочкина (48 уравнений)		Перемещения точек вершин свай от усилий в разрезанных пружинах (48 уравнений)	Перемещения точек вершин свай от неизвестных усилий (48 уравнений)	0	0
Перемещения точек окружности плиты, лежащих в одной плоскости (24 уравнений)	0	0	0		0
Уравнения равновесия для внешних неизвестных сил, действующих по окружности (3 уравнения)	0	0			Z 0 M _y

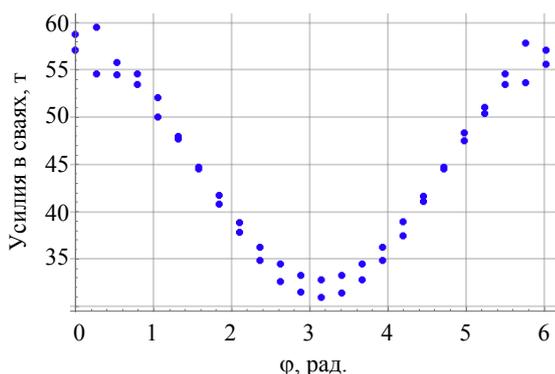


Рис. 3. Распределение усилий в сваях по окружности
Fig. 3. Distribution of forces in piles around the circumference

Пример расчета для кольцевой пластинки с параметрами:

$$R_1 = 6 \text{ м}; R_2 = 9 \text{ м}; E_0 = 3000 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}; \nu_0 = 0,35.$$

Плита из бетона $C^{25/30}$ толщиной 1,5 м.
Внешние нагрузки $Z = 3827 \text{ т}; M = 5747 \text{ тм}$.
Результаты расчета приводятся на рис. 4–7.

Из рис. 4 следует, что все сваи сжаты, причем наиболее сжаты сваи при $\varphi \approx 0$, наименее при $\varphi \approx \pi$, причем при малых углах более нагружен наружный ряд свай, при $\varphi \approx \pi$ – внутренний ряд свай.

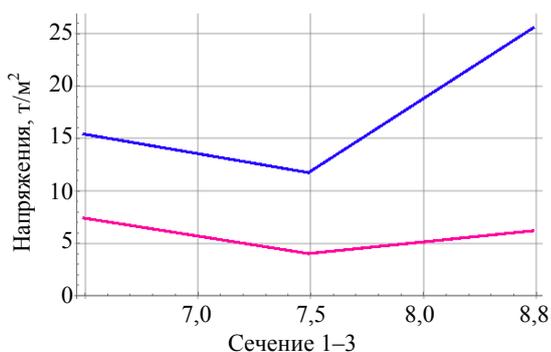


Рис. 4. Распределение контактных напряжений по двум сечениям (красный цвет – сечение 34–36)

Fig. 4. Contact stress distribution along two sections (red color – section 34–36)

Контактные напряжения увеличиваются к краям кольцевой плиты (рис. 4), что соответствует известным зонам концентрации напряжений [5].

Вертикальные перемещения увеличиваются или уменьшаются к наружному краю кольцевой плиты в зависимости от величины угла φ (рис. 5, 6).

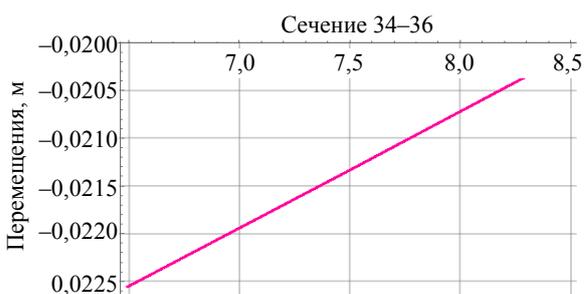
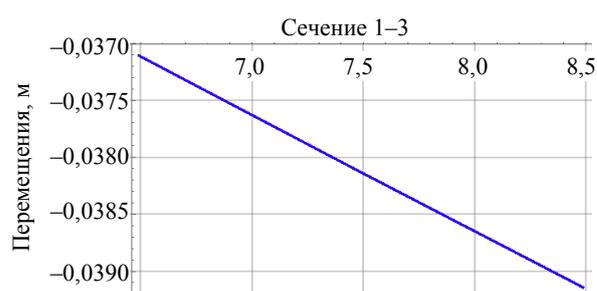


Рис. 5. Распределение вертикальных перемещений по двум сечениям

Fig. 5. Distribution of vertical movements along two sections

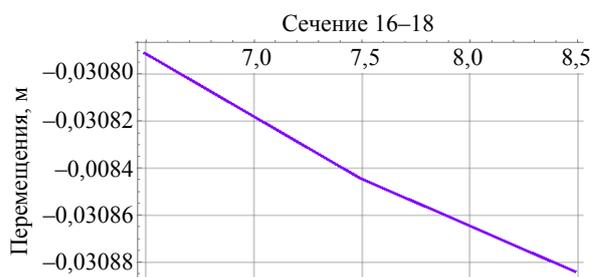


Рис. 6. Распределение вертикальных перемещений по сечению 16–18

Fig. 6. Distribution of vertical movements along the section 16–18

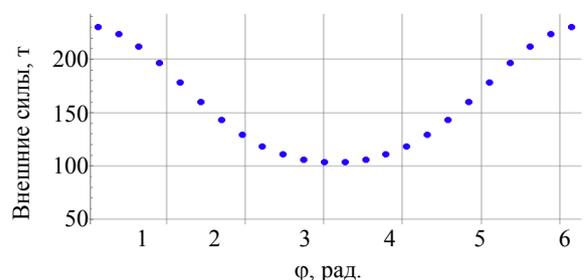


Рис. 7. Распределение и величины сил, вызывающие перемещения окружности нагружения плиты в одной плоскости

Fig. 7. Distribution and magnitude of forces, causing movement of the loading slab circumference in one plane

Из рис. 7 видно, что наибольшая внешняя нагрузка приложена к окружности нагружения при углах $\varphi \approx 0$ и наименьшая при $\varphi \approx \pi$.

ВЫВОДЫ

1. Впервые предложен способ Б. Н. Жемочкина для линейно-упругого расчета свайно-плитного кольцевого фундамента на произвольном упругом основании при условии нахождения части плиты в одной плоскости.

2. Результаты расчета по распределению контактных напряжений, вертикальных перемещений и усилий в сваях логично согласуются с направлением действия внешних момента и осесимметрично приложенной вертикальной силы.

ЛИТЕРАТУРА

- Маликова, Т. А. Анализ натуральных осадок плитных и коробчатых фундаментов многоэтажных зданий / Т. А. Маликова // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1972. № 2. С. 17–21.
- Ривкин, С. А. Расчет фундаментов с учетом работы надфундаментных конструкций и неупругих деформаций грунта и железобетона / С. А. Ривкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1969. № 6. С. 14–17.
- Улицкий, В. М. Геотехническое сопровождение реконструкции городов / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин. М.: АСВ, 1999. 327 с.
- Босаков, С. В. Контактная задача для пластинки при условии ограничений на ее некоторые перемещения / С. В. Босаков, Ю. Н. Котов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. Т. 303, № 4. С. 54–58. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.54.58>.
- Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.
- Poulos, H. G. Piled Raft Foundations for Tall Blding / H. G. Poulos, J. C. Small, H. Chow // Geot. Eng. J. 2011. Vol. 42, No 2. P. 78–84.
- Самородов, А. Н. Особенности расчета, проектирования и оценки эффективности комбинированных свайных и плитных фундаментов многоэтажных зданий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 6. С. 17–20.
- Особенности конструирования плитных и плитно-свайных фундаментов под каркасные и крупнопанельные многоэтажные здания / П. В. Шведовский, П. С. Пойта, Д. Н. Клебанюк, Д. Н. Сливка // Вестник БрГТУ. 2018. № 1. С. 58–64.
- Шулятьев, О. А. Основания и фундаменты высотных зданий / О. А. Шулятьев. М.: АСВ, 2016. 292 с.
- Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. М.: Стройиздат, 1962. 239 с.
- Ржаницын, А. Р. Строительная механика / А. Р. Ржаницын. М.: Высш. шк., 1991. 439 с.
- Михлин, С. Г. Прямые методы в математической физике / С. Г. Михлин. М. – Л.: Гостехтеориздат, 1950. 458 с.
- Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. Минск: БНТУ, 2002. 128 с.

Поступила 22.05.2023

Подписана в печать 25.07.2023

Опубликована онлайн 30.11.2023

REFERENCES

- Malikova T. A. (1972) Analysis of Natural Settlements of Slab and Box Foundations of Multistory Buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 9 (2), 99–104. <https://doi.org/10.1007/bf01702896>.
- Rivkin S. A. (1969) Design of Foundations Taking Into Account the Superstructure Behavior and Inelastic Deformations of Soil and Reinforced Concrete. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (6), 402–406. <https://doi.org/10.1007/bf01838274>.
- Ulitsky V. M., Shashkin A. G. (1999) *Geotechnical Support of Urban Reconstruction*. Moscow, ASV Publ. 327 (in Russian).
- Bosakov S. V., Kotov Yu. N. (2022) Contact Problem for a Plate Subject to Restrictions on Its Certain Displacements. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschyot Sooruzheniy = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 303 (4), 54–58. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.1.54.58> (in Russian).
- Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A., Solomin V. I. (1984) *Calculation of Structures on an Elastic Base*. Moscow, Stroizdat Publ. 679 (in Russian).
- Poulos H. G., Small J. C., Chow H. (2011) Piled Raft Foundations for Tall Blding. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 42 (2), 78–84.
- Samorodov A. N. (2017) Combined Pile and Slab Foundations of Multistory Buildings: Calculation, Design, and Evaluation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54 (6), 395–401. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9486-4>.
- Shvedovsky P. V., Poita P. S., Klebanyuk D. N., Slivka D. N. (2018) Design Features of Slab and Pile Foundations for Frame and Large-Panel Multi-Storey Buildings. *Vestnik Brestskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Brest State Technical University*, (1), 58–64 (in Russian).
- Shulyatyev O. A. (2016) *Bases and Foundations of High-rise Buildings*. Moscow, ASV Publ. 292 (in Russian).
- Zhemochkin B. N., Sinityn A. P. (1962) *Practical Methods for Calculating Foundation Beams and Slabs on an Elastic Base*. Moscow, Stroizdat Publ. 239 (in Russian).
- Rzhanitsyn A. R. (1991) *Structural Mechbaics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 439 (in Russian).
- Mikhlin S. G. (1950) *Direct Methods in Mathematical Physics*. Moscow – Leningrad: Gostekhtheorizdat Publ. 458 (in Russian).
- Bosakov S. V. (2002) *Static Calculations of Plates on an Elastic Base*. Minsk, Belarusian National Technical University. 128 (in Russian).

Received: 22.05.2023

Accepted: 25.07.2023

Published online: 30.11.2023