

*Р.А. Тимченко, д.т.н., профессор
А.В. Богатынский, аспирант
Криворожский национальный университет*

РАСЧЁТ КРУГЛОГО ФУНДАМЕНТА НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Рассмотрен расчёт плитного фундамента башенного сооружения на подрабатываемых территориях.

Ключевые слова: *круглый фундамент, основание, кривизна, грунт.*

*Р.О. Тімченко, д.т.н., професор
А.В. Богатинський, аспірант
Криворізький національний університет*

РОЗРАХУНОК КРУГЛОГО ФУНДАМЕНТУ НА ПІДРОБЛЮВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Розглянуто розрахунок плитного фундаменту баштової споруди на підроблюваних територіях.

Ключові слова: *круглий фундамент, основа, кривизна, ґрунт.*

*R.O. Timchenko, doctor of sciences, professor
A.V. Bogatynskiy, graduate student
Kryvyi Rih National University*

THE CALCULATION OF THE ROUND FOUNDATION ON THE UNDERMINED TERRITORIES

The calculation of the slab foundation of the tower constructions on the undermined territories is describet in the article.

Keywords: *round foundation, basis, curvature, ground.*

Введение. Круглые симметричные в плане фундаментные плиты обычно применяются для сооружений башенного типа (высоких сооружений малой площади в плане – радио- и телебашен, водонапорных башен, башен и градирен, дымовых труб, высотных жилых и административных зданий с центральными ядрами жёсткости и др.) [1].

Нагрузки от сооружений на железобетонную плиту передаются через различные оболочки вращения или отдельные опоры, расположенные, как правило, осесимметрично. Наибольшее распространение получила конструкция круглой плиты, на которую опирается оболочка вращения (коническая или цилиндрическая).

Обзор последних источников исследований и публикаций. Ввиду относительно большого внешнего изгибающего момента от действия ветра, фундаменты сооружений башенного типа могут иметь большие размеры в плане, чтобы обеспечить допустимые осадки и крены (отдельные конструкции фундаментных плит достигают в диаметре 100 м и более). Фундаменты в форме круглых сплошных плит могут быть применены для сооружений высотой 100 – 150 м.

Существует несколько теоретических моделей, описывающих нелинейные деформации основания. При использовании нелинейных моделей для решения практических задач проблемой является определение не только входящих в уравнения состояния материальных констант, но и установление вида уравнений состояния.

Контактные модели применяются для определения напряжений на контакте оснований и фундаментов. Одна из таких моделей расчёта нелинейной деформируемости грунтов создана С.Н. Клепиковым [2].

Достоинством модели коэффициента жёсткости являются её относительная простота и возможность учёта при определении контактных эпюр специфических свойств грунта (например, просадочных). Такого рода задачи расчёта сооружений на прочность и деформативность заставляют искать пути теоретического описания взаимодействия сооружений с основанием с целью определения напряжённо-деформированного состояния системы «основание – фундамент – верхнее строение» во всём диапазоне нагрузок и воздействий, что дает возможность полнее использовать свойства грунтов и конструкций и достовернее выполнять инженерные расчёты.

Расчёты сооружений с учётом деформируемости оснований выполняются обычно в линейной постановке. Однако сейчас линейная теория расчёта начинает себя исчерпывать и решать новые задачи, выдвигаемые практикой строительства, на основе ее положений становится всё труднее или просто невозможно. Особенно это относится к расчетам сооружений, проектируемых для строительства в сложных инженерно-геологических условиях (структурно-неустойчивые, просадочные грунты, подрабатываемые, закарстованные и оползневые территории).

В подобных условиях воздействия в виде смещений и изменения жёсткости основания проявляются, как правило, в период эксплуатации сооружения, что приводит к перераспределению контактных напряжений вплоть до отрыва грунта от подошвы фундаментов и нарушения его прочности на отдельных участках. При этом внешняя нагрузка остаётся неизменной, и в общий объём эпюр контактных напряжений на любой стадии деформирования основания не меняется. Существенно также влияние длительных деформаций, возникающих при смещениях основания.

Использование контактной модели грунта может помочь решить задачи в нелинейной постановке с учётом системы «основание – фундамент – сооружение». Достоинством модели коэффициента жёсткости являются её относительная простота и возможность учёта при определении контактных эпюр специфических свойств грунта (например, просадочных).

В механике грунтов в зависимости от характера исследуемых задач используются различные расчетные модели грунта. При этом приходится, естественно, прибегать к известному упрощению свойств и рассматривать идеализированные среды, обладающие лишь некоторыми решающими для данного круга задач свойствами реальных грунтов [3].

При изучении одних вопросов некоторые факторы принимаются в качестве основных, при изучении других – эти факторы не учитываются, а за основные принимаются совершенно иные.

Правильность выбора основных факторов (определяющая ценность построенной на них теории) проверяется соответствующими объективными экспериментами и натурными наблюдениями.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Довольно актуальным для Кривого Рога есть вопрос о строительстве на подрабатываемых территориях, в частности о строительстве промышленных объектов, одними из которых являются сооружения башенного типа. Достаточно сложным является вопрос о расчёте круглых фундаментов с учётом влияния подработок.

Основной материал и результаты. При выборе модели основания для расчёта сооружений следует иметь в виду, что на характер напряжённо-деформируемого состояния системы «основание – сооружение» влияет большое число физических факторов, точная количественная оценка которых весьма затруднительна. Неизбежны погрешности в определении деформативных свойств грунтов, в аналитическом описании деформирования элементов железобетонных и других конструкций с увеличением нагрузки и длительности её действия, при назначении нагрузок и т.п. Эти обстоятельства предопределяют приближённость решения контактных задач для сооружений на деформируемом основании и делают неоправданным применение чрезмерно сложных моделей основания.

Исходя из действительных механических свойств грунтов, представляется целесообразным, оставляя для грунта расчетную модель в виде той или иной разновидности сплошной среды, использовать при решении контактных задач параметры, характеризующие жёсткость основания в зоне контакта с сооружением. В качестве таких параметров принимаются коэффициенты или функции жёсткости основания. По физическому смыслу коэффициент жёсткости поверхности основания в какой-либо фиксированной точке выражает собой усилие, требуемое для единичного перемещения единицы поверхности в данной точке.

Поведение основания под нагрузкой целиком определяется его коэффициентами жёсткости. В общем случае коэффициент жёсткости зависит от физических свойств грунта, размеров и форм подошвы фундамента, неоднородности и распределительных свойств грунта, величины и времени действия нагрузки, характера нагружения (простое или сложное) по оценки С.Н. Клепикова, однако, по мнению В.Г. Шаповала [4], коэффициент жёсткости не зависит от распределительных свойств грунта. Для определения коэффициентов жёсткости необходимо знать перемещения основания от нагрузки. Тогда коэффициент жёсткости K для заданной нагрузки в рассматриваемый момент времени может быть представлен в виде следующей интегральной зависимости

$$K = p / \delta, \quad (1)$$

где p – нагрузка, приложенная к поверхности основания, kH ; δ – перемещение поверхности основания, м.

Остановимся на общих положениях по оценке жёсткости основания при вертикальных перемещениях. В этом случае достаточно найти осадки основания от воздействия размеров распределённой нагрузки p_m , равной среднему значению давлений под подошвой фундамента и расположенной в пределах площади контакта фундамента с основанием. Коэффициенты жесткости, характеризующие сопротивление поверхности грунта сжатию в различных точках основания, определяются по формуле (1). Если нагрузка на отдельных участках основания может существенно отличаться от p_m , что, как правило, наблюдается при значительной неоднородности грунтов и смещениях земной поверхности, необходимо располагать значениями K при различных нагрузках p . В условиях длительного протекания осадок может быть необходимо также значение K для различных моментов времени. Таким образом, коэффициенты жёсткости определяются, исходя из ожидаемых осадок основания под нагрузкой. При этом подсчёт осадок может быть выполнен любым методом, которым располагает механика грунтов [5].

Поскольку коэффициенты жёсткости зависят не только от физических свойств грунта, но и от размеров и формы загруженной площади, а также от других факторов, их следует рассматривать как некоторые обобщённые характеристики основания, используемые для решения контактных задач. Главная задача состоит в том, чтобы разработать для определения коэффициентов жёсткости такие методы, которые правильно отражали бы влияние важнейших факторов и включали достаточно устойчивые показатели механических свойств грунта, получаемые в результате инженерно-геологических изысканий.

Такую модель основания можно назвать моделью переменного коэффициента жёсткости, имея в виду, что она моделирует лишь контактные условия, а не грунтовую толщу. При построении методов решения контактных задач, базирующихся на названной модели, формально принимается, что осадка поверхности основания происходят только в точках приложения нагрузки, т.е. не учитываются распределительные свойства грунта. В действительности же эффект распределительной способности грунта легко учитывается путем соответствующего подбора закона изменения коэффициента жесткости под подошвой сооружения. Модель переменного коэффициента жесткости обладает весьма большой гибкостью в смысле возможности отражения действительных свойств грунтов и обеспечивает вполне достаточную для приложений точность решения контактных задач для сооружений на деформируемом основании. Частным случаем модели переменного коэффициента жёсткости является хорошо известная винклеровская модель упругого основания. Эта модель обладает

свойством линейной упругости и её коэффициент жёсткости, называемый коэффициентом постели или коэффициентом пропорциональности, принимается постоянным в плане сооружения и зависящим только от вида грунта, что служит причиной справедливой критики. Основы описанной модели разработаны С.Н. Клепиковым[2].

Достоинствами модели коэффициента жёсткости являются её относительная простота и возможность учёта при определении контактных эпюр специфических свойств грунта, а основным недостатком является невозможность прогноза напряжённо-деформированного состояния по глубине основания.

Рассмотрим расчёт перемещений и определим расчетные значения отпора грунта под подошвой круглой фундаментной плиты сооружения башенного типа при воздействии радиусообразных деформаций I-IV групп.

Радиус фундамента составляет 5,0 м. Согласно сведениям работы [6], заменим круглую форму подошвы фундамента равновеликой квадратной со стороной квадрата

$$l_{\phi} = b_{\phi} = \sqrt{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \sqrt{\frac{3,14 \cdot 10^2}{4}} = 8,86 \text{ м.} \quad (2)$$

Высота массива грунта между подошвой фундамента и коренными породами $d = 0,4 \text{ м}$, его физико-механические характеристики $E = 20 \text{ МПа}$, $\varphi^H = 30^\circ$, $c^H = 20 \text{ кПа}$, $\gamma^H = 26,5 \text{ кН/м}^3$, $\mu = 0,30$, коэффициент жёсткости основания $c = 13220 \text{ кН/м}^3$, нормативные нагрузки на уровне подошвы фундамента $N^H = 4100 \text{ кН}$, $W^H = 1320 \text{ кН}\cdot\text{м}$, расчётные нагрузки $N^P = 4510 \text{ кН}$, $W^P = 1452 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Учитывая, что сооружение башенного типа запроектировано по жёсткой конструктивной схеме, расчёт фундаментной плиты на криволинейно-деформируемом основании выполняется в зависимости от значения коэффициента η [7]

$$\eta = \frac{16 \cdot N \cdot R}{n_{\kappa} \cdot m_{\kappa} \cdot c \cdot b_{\phi} \cdot l_{\phi}^3}, \quad (3)$$

где N – равнодействующая всех вертикальных нагрузок на основание, кН ; R – ожидаемый радиус кривизны земной поверхности, м ; l_{ϕ} – длина фундаментной плиты в плоскости изгиба, м ; b_{ϕ} – ширина фундаментной плиты, м ; c – коэффициент жёсткости основания кН/м^3 ; n_{κ} – коэффициент перегрузки; m_{κ} – коэффициент условий работы.

При ожидаемых деформациях земной поверхности для групп территорий (I, II, III, IV), при кривизне выпуклости и вогнутости, при полном контакте подошвы фундамента с грунтом получены значения отпора грунта по формулам [8]:

$$P_1 = \frac{N}{l_{\phi}} + \frac{n_{\kappa} \cdot m_{\kappa} \cdot c \cdot b_{\phi} \cdot l_{\phi}^2}{16 \cdot R}; \quad P_2 = \frac{N}{l_{\phi}} - \frac{n_{\kappa} \cdot m_{\kappa} \cdot c \cdot b_{\phi} \cdot l_{\phi}^2}{16 \cdot R}. \quad (4)$$

Эпюры отпора грунта для $R_1 = 15 \text{ км}$, $R_2 = 10 \text{ км}$, $R_3 = 5 \text{ км}$, $R_4 = 2 \text{ км}$ при кривизне выпуклости представлены на рис.1, а, при кривизне вогнутости – на рис. 1, б.

При кривизне выпуклости и неполном контакте подошвы фундамента с грунтом для определения эпюры отпора (рис. 1, в) использованы формулы [9]:

$$P = \sqrt[3]{\frac{n_e \cdot m_e \cdot c \cdot b_o \cdot N^2}{2 \cdot R}} ; x = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N \cdot R}{n_e \cdot m_e \cdot c \cdot b_o}} . \quad (5)$$

При кривизне вогнутости и неполном контакте подошвы фундамента с грунтом для определения эпюры отпора (рис. 1, г) фундамента использованы формулы

$$P = \frac{n_k \cdot m_k \cdot c \cdot b_\phi}{2 \cdot R} \cdot \left(\frac{l_\phi^2}{4} - x^2 \right) ; x = \sqrt[3]{\alpha + \beta} + \sqrt[3]{\alpha - \beta} + \frac{l_\phi}{6} , \quad (6)$$

где α и β – величины, определяемые по формулам

$$\alpha = \frac{N \cdot R}{n_e \cdot m_e \cdot c \cdot b_o} - \frac{l_o^3}{27} ; \quad \beta = \sqrt{\frac{N^2 \cdot R^2}{n_e^2 \cdot m_e^2 \cdot c^2 \cdot b_o^2} - \frac{2 \cdot N \cdot l_o^3 \cdot R}{27 \cdot n_e \cdot m_e \cdot c \cdot b_o}} . \quad (7)$$

Значения отпора грунта для схем а и б на рис. 1:

при $R=15 \text{ км}$

$$P_1 = \frac{4510}{8,86} + \frac{1,4}{16} \frac{1}{15000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 562,66 \text{ кН / м} ;$$

$$P_2 = \frac{4510}{8,86} - \frac{1,4}{16} \frac{1}{15000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 455,39 \text{ кН / м} ;$$

при $R = 10 \text{ км}$

$$P_1 = \frac{4510}{8,86} + \frac{1,4}{16} \frac{1}{10000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 589,48 \text{ кН / м} ;$$

$$P_2 = \frac{4510}{8,86} - \frac{1,4}{16} \frac{1}{10000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 428,57 \text{ кН / м} ;$$

при $R = 5 \text{ км}$

$$P_1 = \frac{4510}{8,86} + \frac{1,4}{16} \frac{1}{5000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 669,93 \text{ кН / м} ;$$

$$P_2 = \frac{4510}{8,86} - \frac{1,4}{16} \frac{1}{5000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 348,12 \text{ кН / м} ;$$

при $R = 2 \text{ км}$

$$P_1 = \frac{4510}{8,86} + \frac{1,4}{16} \frac{1}{2000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 911,3 \text{ кН / м} ;$$

$$P_2 = \frac{4510}{8,86} - \frac{1,4}{16} \frac{1}{2000} \frac{13220}{8,86} \frac{8,86^2}{8,86^2} = 106,76 \text{ кН / м} .$$

Значения отпора грунта для схемы в на рис. 1: при $R = 1 \text{ км}$

$$P = \sqrt[3]{\frac{1,4 \cdot 1 \cdot 13220 \cdot 8,86 \cdot 4510^2}{2 \cdot 1000}} = 1185,8 \text{ кН / м} ; x = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 4510 \cdot 1000}{1,4 \cdot 1 \cdot 13220 \cdot 8,86}} = 3,8 \text{ м} .$$

Значения отпора грунта для схемы г на рис. 1: при $R = 1 \text{ км}$

$$P = \frac{1,4 \cdot 1 \cdot 13220 \cdot 8,86}{2 \cdot 1000} \cdot \left(\frac{8,86^2}{4} - 1,56^2 \right) = 1407,8 \text{ кН/м};$$

$$x = \sqrt[3]{1,74 + 46,6} + \sqrt[3]{1,74 - 46,6} + \frac{8,86}{6} = 1,56 \text{ м};$$

$$\alpha = \frac{4510 \cdot 1000}{1,4 \cdot 1 \cdot 13220 \cdot 8,86} - \frac{8,86^3}{27} = 1,74 \text{ м}^3;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{4510^2 \cdot 1000^2}{1,4^2 \cdot 1^2 \cdot 13220^2 \cdot 8,86^2} - \frac{2 \cdot 4510 \cdot 8,86^3 \cdot 1000}{27 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 13220 \cdot 8,86}} = 46,6 \text{ м}^3.$$

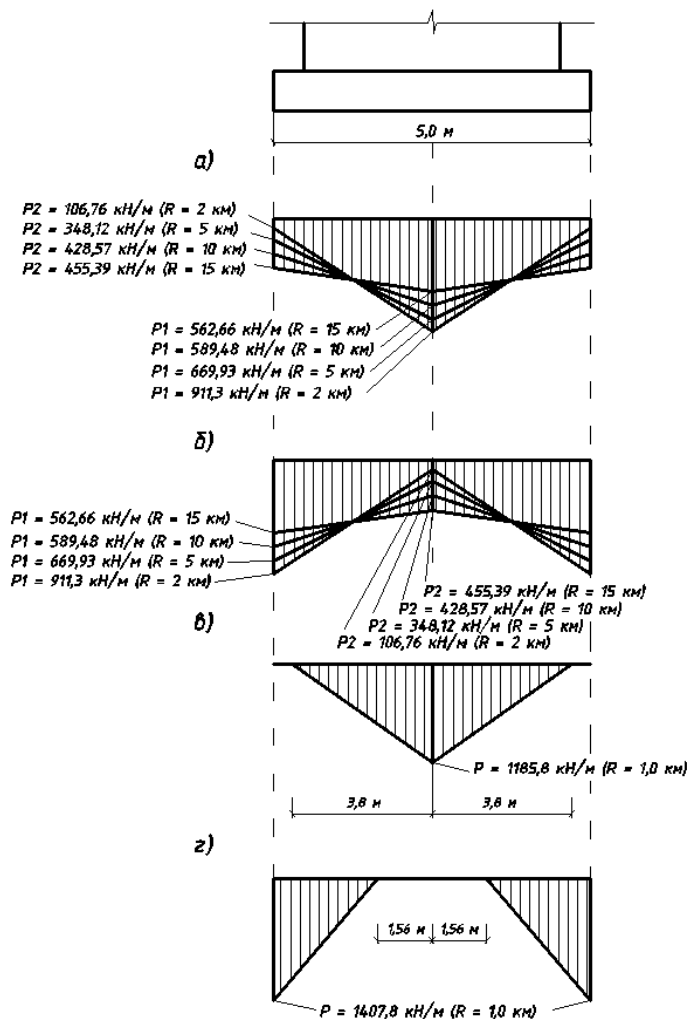


Рис. 1. Этюры взаимодействия фундамента с криволинейно-деформируемым основанием:
 а) при кривизне выпуклости и полном контакте подошвы фундамента с грунтом;
 б) при кривизне вогнутости и полном контакте подошвы фундамента с грунтом;
 в) при кривизне выпуклости и неполном контакте подошвы фундамента с грунтом;
 г) при кривизне вогнутости и неполном контакте подошвы фундамента с грунтом

Усилия в зданиях и сооружениях, рассчитываемых на воздействия деформаций земной поверхности, зависят главным образом от деформационных и прочностных характеристик грунта. Поэтому учёт

взаимодействия основания с конструкциями фундамента является наиболее важным при решении контактной задачи. Воздействия в виде смещений и изменения жёсткости основания, как правило, проявляются во время эксплуатации зданий и сооружений. Это приводит к перераспределению контактных напряжений вплоть до отрыва фундаментов от основания и нарушения прочности грунта на отдельных участках.

Выводы. Особенностью работы зданий в подобных условиях является то, что контактные напряжения изменяются при постоянной внешней нагрузке, но общий объём эпюры контактных напряжений на любой стадии деформирования основания остаётся одним и тем же.

Эпюры, полученные в расчёте, зависят от размеров фундамента, нагрузок на него, жёсткости основания. На форму эпюр влияет форма искривления поверхности земли (кривизна выпуклости или вогнутости) и характер взаимодействия её с фундаментом (полный или неполный контакт).

Литература

1. Тетиор, А.Н. Проектирование и сооружение экономичных конструкций фундаментов / А.Н. Тетиор. – К.: Будівельник, 1975. – 204 с.
2. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
3. Клепиков, С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 103 с.
4. Шаповал, В.Г. Механика грунтов: учебник / В.Г. Шаповал. – Д.: Пороги, 2010. – 168 с.
5. Вялов, С.С. Модифицированная модель нелинейного деформирования связных грунтов / С.С. Вялов, Ж.С. Шаабан // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1994. – № 5. – С. 2 – 6.
6. Кальницкий, А.А. Расчёт и конструирование железобетонных фундаментов гражданских и промышленных зданий и сооружений. учеб. пособие для вузов // А.А. Кальницкий, Л.М. Пешковский. – М.: Высшая школа, 1975. – 261 с.
7. Руководство по проектированию зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. Ч.III. Башенные, транспортные и заглубленные сооружения, трубопроводы / НИИСК Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 211 с.
8. Тимченко, Р.А. Предельные деформационные воздействия для круглых плитных фундаментов / Р.А. Тимченко // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2005. – № 3. – С. 173 – 177.
9. Тимченко, Р.А. Методика расчёта круглых плитных фундаментов в условиях неравномерно-деформируемого основания при сложном нагружении / Р.А. Тимченко. – Кривой Рог: Криворожский технический университет, 2008. – 24 с.

Надійшла до редакції 02.10.2013
© Р.О. Тімченко, А.В. Богатинський