

Длительная эксплуатация жестких фундаментов с учетом нелинейности и реологии деформирования основания

М.В. Берлинов, М.Н. Берлинова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье предложен новый подход к методу расчета жесткого фундамента на нелинейно и неравновесно деформируемом полупространстве с учетом переменной во времени внешней нагрузки. Нелинейность и реологию деформирования предлагается учитывать на основе современной феноменологической теории с помощью интегрального метода последовательных итераций, позволяющего учитывать переменный во времени режим внешней нагрузки, характерный для стадии строительства и эксплуатации конструкций. Представлен алгоритм численного решения поставленной задачи в условиях режимного действия внешних нагрузок с помощью метода интегральных оценок на основе шагового метода и последовательных приближений.

Ключевые слова: жесткий фундамент, деформация основания, режимные нагрузки, реология деформирования, интегральный метод, феноменологическая теория.

Вопросы снижения материалоемкости при заданной прочности и долговечности строительных конструкций является важной задачей строительной отрасли. Построение методов расчета строительных конструкций, наиболее полно учитывающих реальную работу материалов под действием внешних сил, может дать существенную экономию при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений [1-3].

Большинство существующих в настоящее время методов расчета строительных конструкций, включая основания и фундаменты [4], исходят из упругой работы материалов [5] и предположения о том, что нагрузка, действующая на конструкцию, считается статической, т.е. неизменяемой во времени.

В практической деятельности нагрузки, прикладываемые к основаниям и фундаментам, не постоянны, они изменяются как в период строительства, так и во время эксплуатации зданий и сооружений, причем во время строительства нагрузка, прилагаемая к фундаментам, является постепенно увеличивающейся [6, 7]. С достаточной степенью приближения режим ее

изменения во времени можно определить, как монотонно возрастающий [4, 8].

В процессе эксплуатации зданий постоянная нагрузка является в основном неизменяемой, а временная в процессе эксплуатации – переменной. Исключения представляют собой здания, подвергающиеся реконструкции, когда и временная и постоянная могут увеличиваться от нулевого значения до максимального и наоборот, из этого следует, что суммарная нагрузка изменяется как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения в течение всего периода строительства и эксплуатации здания, причем этот фактор будет тем существеннее, чем выше соотношение между временной и постоянной нагрузками [9-11].

Этот вопрос является достаточно важным и актуальным применительно к зданиям, где все конструкции и особенно основания и фундаменты работают в режиме, который характеризуется цикличностью приложения внешней нагрузки и обусловлен периодичностью загрузки и разгрузки [12], например, монолитные здания, некоторая категория промышленных зданий и сооружений для хранения различных материалов, имеющих специфическое функциональное применение.

Упомянутые здания отличаются от других зданий и сооружений высоким удельным значением полезной нагрузки, что иногда вызывает трехкратное увеличение нагрузки на основание в пределах от 0,1 до 0,3 МПа [4, 13].

В основу предлагаемого метода расчета жесткого фундамента на грунтовом основании положены следующие основополагающие предпосылки:

- работа материала основания под нагрузкой подчиняется современной феноменологической теории деформирования упруго ползучего тела.
 - грунт основания считается нелинейно-деформируемым.
-

- в основу метода расчета положена дискретная модель, позволяющая получать приемлемые решения с помощью программного обеспечения современных ЭВМ.
- режим изменения внешней нагрузки считается возрастающим по линейному закону.

Рассмотрим процесс загрузки жесткого прямоугольного фундамента сосредоточенной силой, приложенной по оси симметрии и изменяющейся по линейному закону (рис.1):

$$P(t)_{t < t_1} = P\alpha t; \quad (1)$$

$$P(t)_{t < t_1} = P, \quad (2)$$

где: P – максимальное значение силы; α – коэффициент пропорциональности; t – время действия внешней нагрузки.

Предположим, что экспериментальная диаграмма зависимости осадки грунта от действующего давления характеризуется графиком, приведенным на рис. 2, и выражается математической зависимостью [2]:

$$S = \frac{P(t)}{E_0 t} \left(1 + \eta_m \left[\frac{P(t)}{R} \right]^{m_m} \right) + \int_{t_0}^t P(\tau) \left(1 + \eta_n \left[\frac{P(\tau)}{R} \right]^{m_n} \right) \frac{d}{d\tau} C(t, \tau) d\tau, \quad (3)$$

здесь: η_m, m_m, η_n, m_n – соответственно параметры нелинейности упруго-мгновенных и деформаций ползучести; $E_0(t), C(t, \tau)$ – соответственно модуль упруго-мгновенных деформаций и характеристика ползучести, основания; R - предельное давление, воспринимаемое грунтом основания.

При постоянной нагрузке в пределах условно-линейной области, т.е. когда напряжение в грунте не превышает критического давления $P_{нач.кр.}$ допустимо использовать решения, полученные на базе дискретного метода строительной механики, тогда разрешающие уравнения имеют вид:

$$\{\delta\}\{x\} + \{\Delta_p\} + \{y_0\} = 0 \quad (4)$$

$\{x\}$ – матрица неизвестных усилий; $\{\Delta_P\}$ – вектор грузовых членов; $\{y_0\}$ – вектор осадки в основной системе; $\delta = \frac{1-\mu_0^2}{\pi E_0 C} E_{iK}$ – осадка основания под жестким фундаментом.

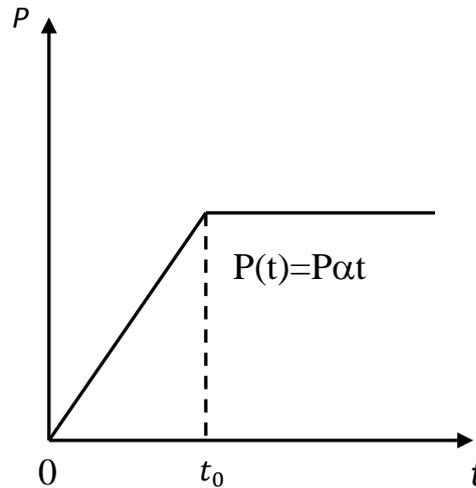


Рис. 1. Режим изменения нагрузки

Нелинейность и неравновесность деформирования предлагается учитывать с помощью касательного модуля деформаций, зависящего от напряженно-деформируемого состояния грунта:

$$\frac{1}{E} = \frac{dS}{dP} \quad (5)$$

или с учетом (3):

$$\frac{1}{E} = \frac{d}{dP} \left\langle \frac{P(t)}{E_0(t)} \left(1 + \eta_m \left[\frac{P(t)}{R} \right]^{m_m} \right) + \int_{t_0}^t P(\tau) \left(1 + \eta_n \left[\frac{P(\tau)}{R} \right]^{m_n} \right) \frac{d}{d\tau} C(t, \tau) d\tau \right\rangle. \quad (6)$$

Совместное рассмотрение выражений (5) и (6) приводит к системе интегро-дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \frac{1 - M_0^2}{\pi C} \frac{d}{dP} \left\langle \frac{P(t)}{E_0(t)} \left(1 + \eta_m \left[\frac{P(t)}{R} \right]^{m_m} \right) + \int_{t_0}^t P(\tau) \left(1 + \eta_n \left[\frac{P(\tau)}{R} \right]^{m_n} \right) \frac{d}{d\tau} C(t, \tau) d\tau \right\rangle F_{iK} \right\} \{x\} + \{\Delta_P(t)\} + \{y_0\} = 0. \quad (7)$$

Решение, которых весьма затруднительно из-за непреодолимых математических трудностей. Однако решение задачи возможно при использовании дискретно-шагового метода, сущность которого заключается

в следующем. Весь период времени изменения внешней нагрузки разбивается на определенное (достаточно малое) количество интервалов, в течение которого на каждом шаге вычисления внешняя сила и процессы ползучести считаются условно фиксированными. Такое предположение приводит к существенным упрощениям в уравнениях (7), и они приобретут следующий вид:

$$\left\{ \frac{1-\mu_0^2}{\pi C} \left\langle \frac{1}{E_0} \left[1 + (1+m_m)\eta_m \left(\frac{P}{R} \right)^{m_m} \right] + C(t, t_0) \left[1 + (1+m_n)\eta_n \left(\frac{P}{R} \right)^{m_n} \right] \right\rangle F_{iK} \right\} \{x\} + \{\Delta_P\} + \{y_0\} = 0. \quad (8)$$

Уравнения (8) являются нелинейными, однако их решение возможно с помощью метода последовательных приближений, заключающегося в последовательном уточнении ординат эпюры опоров, начиная с упругого решения. В результате, после достижения необходимой точности между двумя последними интеграциями получают значение эпюры опоров в данном интервале времени. Затем переходят к следующему интервалу, вновь полагая внешнюю нагрузку и процессы ползучести фиксированными, и так далее, последовательно решая уравнения (8) для каждого момента изменения внешней нагрузки и параметров ползучести основания. Такой метод позволяет проследить изменение реактивного давления грунта не только в пространстве, но и во времени при постепенном изменении внешней нагрузки.

В качестве примера рассмотрим расчет жесткого фундамента на грунтовом нелинейно и неравновесно деформируемом основании. Параметры изменения внешней нагрузки $\alpha = 0,1$; $t_1 = 24$ дн. $t = 365$ дн.; $P = 1,00$ МН.

Характеристики материала основания $\eta_m = 2,5$; $m_m = 4,5$; $\eta_n = 2,6$; $m_n = 4,82$; $E_0(t) = 20$ МПа; $C(t, t_0) = 0,00315$ МПа; $R = 0,35$ МПа; $\mu_0 = 0,3$.
Размеры фундамента $2,2 \times 2,2$ м.

Анализируя эпюры отпоров грунта, показанные на рис. 3, можно сделать следующие выводы.

В результате монотонно возрастающего режима внешней нагрузки, а также вследствие нелинейности и неравновесности деформирования эпюры отпоров грунта в различные моменты загрузки отличаются друг от друга.

В пределах условно-линейной области, т.е. когда давления в основании незначительно превышает $P_{нач.кр.}$, происходит линейный рост напряжений (на рис. 3 кривые 1 и 2 подобны).

Когда под подошвой жесткого фундамента напряжения начинают значительно превышать $P_{нач.кр.}$, т.е. процесс деформирования переходит в нелинейную и неравновесную область (см. рис.2), начинается процесс перераспределения усилий с более нагруженных участков основания на менее нагруженные (кривая 3). Причем это явление начинается в момент, когда под краями фундамента появляются зоны пластического течения грунта.

При дальнейшем увеличении внешней нагрузки, как свидетельствуют эксперименты, эпюры давлений приобретают седлообразное очертание, что подтверждается данными теоретического расчета по предлагаемому методу (кривая 4).

При еще большем увеличении внешней нагрузки, когда в грунте происходит интенсивное развитие зон пластического течения «горбы» седловидной эпюры возрастают по величине и перемещаются к краям фундамента. Это положение, следующее из экспериментальных исследований, также подтверждается теоретическим расчётом (кривая 6).

И наконец, при значении внешней нагрузки, близкой к предельной, эпюра давления приобретает колоколообразное очертание (кривая 5), что также подтверждается экспериментально и соответствует

сформировавшемся под штампом уплотненному ядру в момент наступления предельного равновесия.

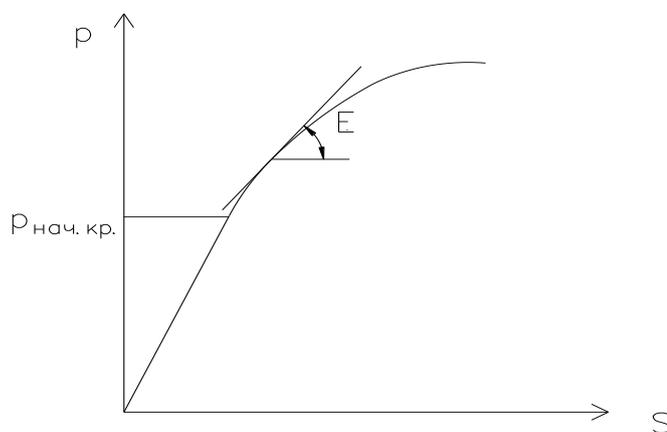


Рис. 2. График зависимости S-P (осадка – давление)

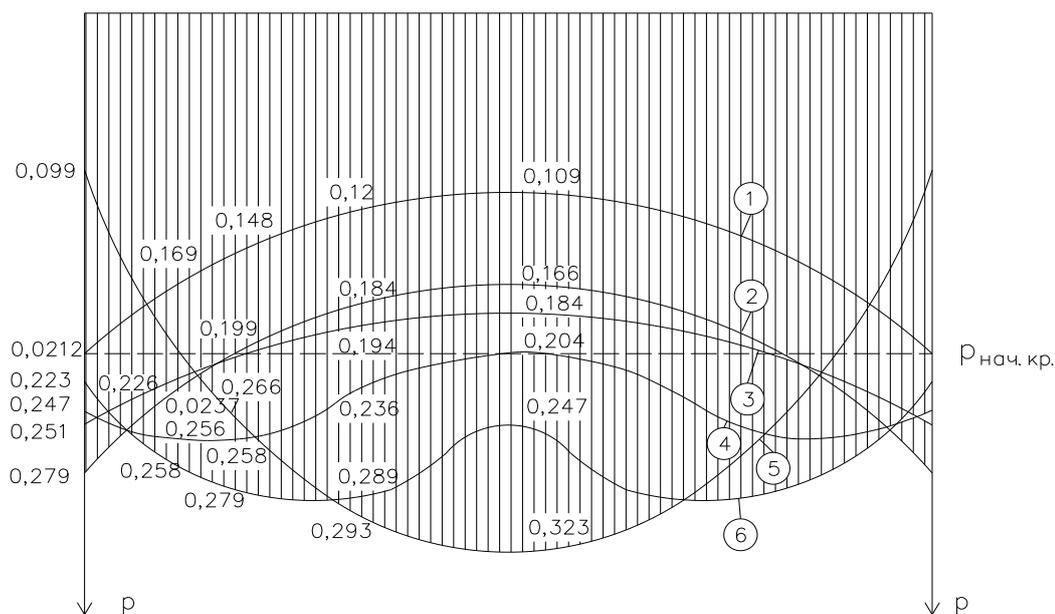


Рис. 3. Трансформация эпюр отпора грунта

Суммируя вышеизложенное, можно заметить, что предлагаемый метод расчета позволяет проследить характер изменения напряженного состояния в процессе увеличения внешней нагрузки, что может позволить выявить дополнительные резервы прочности грунтового основания при строительстве и эксплуатации жестких фундаментов зданий и сооружений.

Предлагаемая методика позволяет получать более экономичные и надежные конструкции, поскольку нелинейные и неравновесные методы расчета дают возможность более полно учитывать реальные свойства материалов, условия и режим эксплуатации. Особенно важными данные факторы могут стать при реконструкции зданий и сооружений, когда изменение как постоянных, так и временных нагрузок может быть весьма значительным, а требования к надежности и эксплуатационной пригодности существенно повышаются.

Таким образом, приведенные выше рассуждения позволяют находить численное решение поставленной задачи в условиях режимного действия внешних нагрузок с помощью метода интегральных оценок на основе шагового метода и последовательных приближений.

Литература

1. Tamrazyan A., Avetisyan L. Comparative analysis of analytical and experimental results of the strength of compressed reinforced concrete columns under special combinations of loads. MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Sciend and Education, IPICSE 2016. 2016. Pp.01029.

2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона, Монография. 2004. 112 с.

3. Король Е.А., Берлинова М.Н. Развитие методов расчёта многослойных ограждающих конструкций с монолитной связью слоёв. Монография. Москва. 2019. 78 с.

4. Берлинов М.В. Основания и фундаменты. Учебник. Издательство «Лань», Санкт-Петербург. 2019. 318 с.

5. Larionov E., Zveryaev E. Stress relaxation of constructions elements. В сборнике: MATEC Web Conferences. 2007. Pp.00101.

6. Попов А.О., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н. Использование аналитических методов при исследовании свайных оснований объектов историко-культурного наследия. Инженерный вестник Дона. 2023. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8736.

7. Макаров Ю.А., Ладоскин М.В. Оценка деформаций фундаментов на неоднородных грунтах в программном комплексе ANSYS WORKBENCH. Инженерный вестник Дона. 2023. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8661.

8. Дёминов П.Д. Оценка вероятности возникновения нормальных трещин в железобетонной балке с вероятностными параметрами, лежащей на стохастической полуплоскости. Железобетонные конструкции. 2023. №3(3). С. 11-19.

9. Курнавина С.О., Грачев А.Н. Критерий образования сквозных трещин при циклическом изгибе железобетонных конструкций. Строительство и реконструкция. 2018. №5(79). С. 24-31.

10. Берлинов М.В., Берлинова М.Н. Длительная эксплуатация железобетонной балки на грунтовом основании с учетом коррозионных повреждений. Железобетонные конструкции. 2023. №1(1). С.19-27.

11. Берлинов М.В., Творогов А.В. Влияние вибрационных нагрузок на эксплуатацию грунтов и фундаментов. Бюллетень строительной техники. 2020. №3 (1027). С. 128-138.

12. Plyichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. Features of geomonitoring in the construction of underground structures in conditions of close urban development. Foundations, foundations and soil mechanics. 1999. No. 4. Pp. 20 -26.

13. Berlinov M., Berlinova M., Tvorogov A. Management of degradation processes and strengthening of soils and foundations of transport structures. E3S Web of Conferences. 2023. V.371. P. 04016.

References

1. Tamrazyan A., Avetisyan L. MATEC Web of Conferences. 5th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Sciend and Education, IPICSE 2016. 2016. Pp.01029.
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetny`e modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Computational Models of Force Resistance of Reinforced Concrete]. Monografiya. 2004. 112 pp.
3. Korol` E.A., Berlinova M.N. Razvitie metodov raschyota mnogoslojny`x ograzhdayushhix konstrukcij s monolitnoj svyaz`yu sloyov [Development of Methods for Calculating Multilayer Enclosing Structures with Monolithic Layer Coupling] Monografiya. Moskva. 2019. 78 pp.
4. Berlinov M.V. Osnovaniya i fundamenty [Bases and Foundations] Uchebnik. Izdatel`stvo «Lan`», Sankt-Peterburg. 2019. 318 pp.
5. Larionov E., Zveryaev E. V sbornike: MATEC Web Conferences. 2007. P.00101.
6. Popov A.O., Sabitov L.S. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2023. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8736.
7. Makarov Yu.A., Ladoshkin M.V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2023. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8661.
8. Dyominov P.D. Zhelezobetonny`e konstrukcii (Rus). 2023. №(3). Pp.11-19.
9. Kurnavina S.O., Grachev A.N. Stroitel`stvo i rekonstrukciya. 2018. №5(79). Pp.24-31.
10. Berlinov M.V., Berlinova M.N. Zhelezobetonny`e konstrukcii. 2023. №1(1). Pp. 19-27.
11. Ilyichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. Features of geomonitring in the construction of underground structures in conditions of close



urban development. Foundations, foundations and soil mechanics. 1999. № 4. Pp. 20 -26.

12. Berlinov M.V., Tvorogov A.V. Byulleten` stroitel`noj tekhniki. 2020. №3 (1027). Pp. 128-138.

13. Berlinov M., Berlinova M., Tvorogov A. E3S Web of Conferences. 2023. V.371. Pp. 04016.