

## ГЕОФИЗИКА GEOPHYSICS

Научная статья

УДК 624.131.7

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-4-14

### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЯ В ПК PLAXIS 3D

Власов Максим Алексеевич, Простов Сергей Михайлович  
Соколов Михаил Валерьевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

\*для корреспонденции: maxsdss@mail.ru



#### Информация о статье

Поступила:

21 октября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

20 ноября 2023 г.

Принята к публикации:

22 ноября 2023 г.

Опубликована:

05 декабря 2023 г.

#### Ключевые слова:

грунтовое основание  
сооружения; напряженно-  
деформированное состояние;  
осадка фундамента; метод  
конечных элементов;  
минимальная погрешность  
расчетов; регрессионная  
зависимость; компьютерная  
математическая модель

#### Аннотация.

Достаточная точность расчета напряженно-деформированного состояния неоднородных грунтовых оснований сооружений, включая применение технологий управления физико-механическими свойствами грунтов, возможна только путем применения программных комплексов, реализуемых методом конечных элементов. На основе анализа результатов прогнозирования осадки сооружений по данным геомеханического моделирования с помощью специализированных программных комплексов Plaxis, ANSYS, FLAC, FEMmodels, GeoSoft, midas GTS, Z-soil и др. поставлена цель обеспечить рациональные параметры подобных моделей. При этом применен критерий минимальной погрешности расчета осадки фундамента в сравнении с эталонным расчетом с использованием модели Мора-Кулона. На базовой модели со штампом единичного размера установлены линейные регрессионные зависимости между поперечными размерами и оптимальной высотой, при которой погрешность геологических расчетов не превышает 5%. Определенные геометрические параметры следует корректировать пропорционально реальной нагрузке на фундамент и обратно пропорционально модулю деформации грунта. Разработанный общий алгоритм определения рациональных параметров геомеханической модели, ориентированный на функциональные особенности программного комплекса Plaxis 3D, включает задание начальных геометрических параметров модели по установленным зависимостям, их последующую корректировку с учетом реальной геометрии фундамента, нагрузки на него и деформационных свойств грунтов, проверку модели на устойчивость.

**Для цитирования:** Власов М.А., Простов С.М., Соколов М.В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК PLAXIS 3D // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 5 (159). С. 4-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-4-14, EDN: YXSEYA

#### Введение.

Одной из основных причин аварийного состояния зданий и сооружений предприятий различных отраслей промышленности является развитие значительных деформаций грунтовых

оснований. Неблагоприятные деформационные процессы возможны при недостаточно детальных инженерно-геологических изысканиях, при существенном влиянии внешних воздействий (подработка, сейсмические явления, влагонасыщение и т.п.) [1]. Грунт состоит из разных частиц, отличных по химическому составу, размеру и прочности – зерен. Пространство между зернами заполнено воздухом и водой. Прослойка грунта между фундаментом и основанием испытывает сильное давление на сжатие. В результате такого сжатия грунт равномерно уплотняется и здание дает осадку. На степень осадки влияет неоднородность грунта, различное содержание в нем воды и пор, наличие примесей, неравномерная деформация, глубина промерзания, химические процессы в грунте [2]. Это может повлечь за собой проседание сооружения, образование перекосов, разрушение кладки и локальное или масштабное выпучивание. Главная причина появления осадки – это **уплотнение грунта основания** под весом здания [3]. Уплотнение происходит за счет сокращения свободного пространства между частицами. Сжатие грунта возникает при некоторых условиях, оказывающих на него воздействие, при этом деформации в грунте, вызванные весом конструкции, должны превышать деформации от собственного веса [4].

Для аналитического расчета осадки фундамента применяют метод послойного суммирования по формуле из СП 22.13330:

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i} h_i}{E_i} \quad (1)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент, равный 0,8;  $\sigma_{zp,i}$  – среднее значение вертикального нормального напряжения (далее – вертикальное напряжение) от внешней нагрузки в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;  $E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа.

Аналитические геомеханические расчеты возможны только для весьма упрощенных моделей грунтовых оснований, т.к. не позволяют в достаточной мере учесть структурно-текстурную неоднородность, выявленную методами геофизического мониторинга [5]. Достаточная точность геомеханических расчетов, включающих определение напряжений и деформаций в неоднородной грунтовой толще, возможна только с использованием математических моделей, реализуемых в программных продуктах. Особую значимость компьютерное геомеханическое моделирование приобретает при обосновании параметров управления свойствами неустойчивых грунтов (осушение, тампонаж, упрочнение и т.п.) [6-8].

В настоящее время в мировой практике строительства прочно закрепился метод конечных элементов (МКЭ) как основной метод, применяющийся для расчета строительных конструкций. Одновременно с самим методом развивались и средства вычислений, а также средства программного обеспечения, без которых невозможна реализация МКЭ [9]. МКЭ позволяет учитывать следующие факторы: природное напряженное состояние; сложные напластования грунтов; изменение деформационных и прочностных свойств грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений; поэтапное приложении внешних нагрузок на исследуемый объект [10]. Кроме того, МКЭ позволяет производить одновременный расчет по двум предельным состояниям с учетом совместной работы системы «основание – фундамент», расчет напряженно-деформированного состояния грунтов с выявлением зон развития пластических деформаций [11]. Так, на основе МКЭ существует несколько специальных программных комплексов, способных решать геотехнические задачи: *Plaxis*, *ANSYS*, *FLAC*, *FEMmodels*, *GeoSoft*, *Midas GTS*, *Z-soil* и др. Наиболее распространенным в мировой практике является программный комплекс (ПК) *Plaxis* [12, 13].

Ввиду широкой распространенности ПК *Plaxis 3D* авторами была поставлена задача оценить возможности его применения для объемного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) неоднородных грунтовых оснований сооружений.

Важным аспектом являются исходные параметры базовой модели, которые должны максимально соответствовать требованиям расчета [14, 15]. Общие параметры модели, в частности физико-механические свойства грунтов и материала фундамента, определяются инженерно-геологическими условиями, назначением, конструктивным решением и техническим оснащением зданий или сооружений. Однако расчетные параметры модели, такие

как геометрические размеры модели, граничные условия в виде ограничений перемещений, а также нагрузки различного вида, должны назначаться в рациональных диапазонах и не искажать результатов моделирования [16]. Диапазоны геометрических параметров модели могут быть получены на основе первичных программных расчетов на базовой модели [17]. Дальнейший анализ направлен на определение зависимостей между результатами моделирования и величинами, определенными классическими методами расчетов фундаментов, принятыми за эталон. Для анализа целесообразно использование эталонного фундамента (штампа) с наиболее благоприятными грунтовыми условиями [18, 19].

#### Методы исследования.

Базовая модель представлена на Рис. 1 и включает в себя следующее:

- железобетонный штамп с условной площадью подошвы  $9 \text{ м}^2$ , установленный на поверхности земли и нагруженный распределенной нагрузкой  $P=1000 \text{ кН/м}^2$ ;
- однородный грунтовый массив, сложенный грунтом с низкими деформационными и прочностными физико-механическими свойствами (Таблица 1);
- граничные условия в виде ограничения на возможные поперечные расширения вдоль боковых граней и возможные вертикальные смещения в нижней части модели.

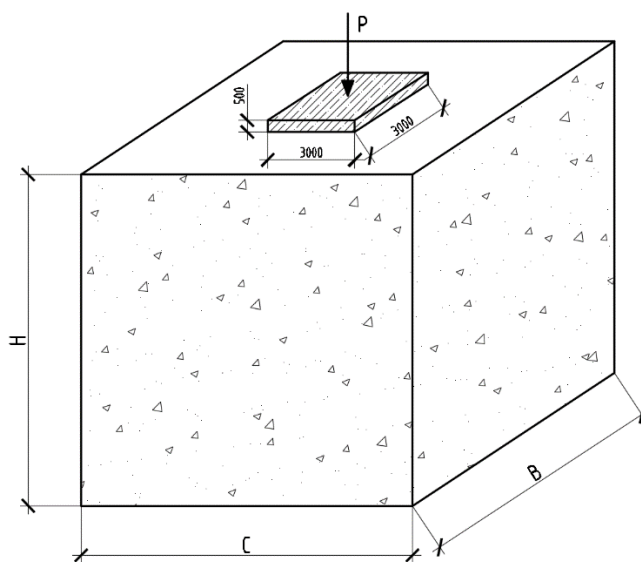


Рис. 1. Базовая модель  
Fig. 1. Basic model

Таблица. 1. Значения физико-механических свойств грунтов и материалов для расчета в ПК Plaxis 3D  
Table. 1. Values of physical and mechanical properties of soils and materials for calculation in PC Plaxis 3D

Характеристики	Грунт основания	Фундаментная плита
Средняя плотность, $\text{кН/м}^3$	19,12	23
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,35	0,15
Модуль деформации $E$ , $\text{кН/м}^2$	27,5	30
Сцепление $C$ , $\text{кН/м}^2$	15	-
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	21	-

Расчет велся в условиях объемной деформации с использованием модели Мора – Кулона [20, 21]. Сущность выполненных расчетов сводилась к определению рационального сочетания геометрических параметров модели (горизонтальных – ширины  $C$ ,  $B$  и вертикального – высоты  $H$ ) при изменениях нагрузки  $P$  для единичных размеров плиты ( $a = 3 \text{ м}$ ).

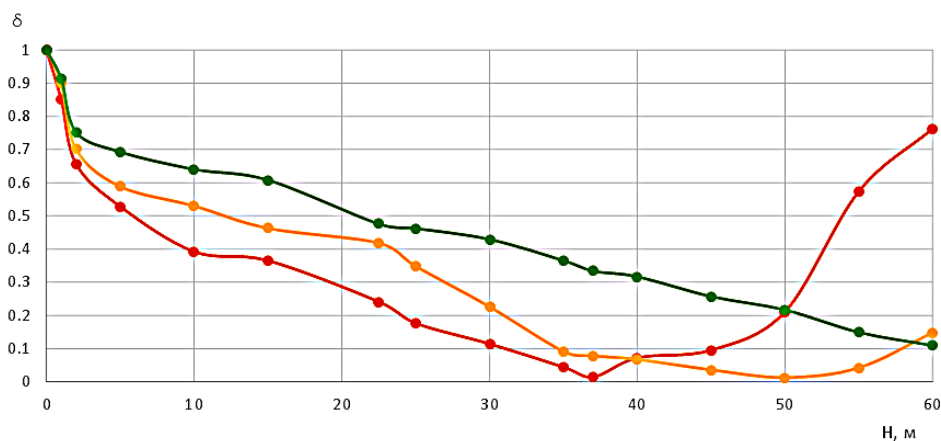


Рис. 2. Зависимости погрешности от приложенной нагрузки:

 $\delta$  от  $H$  ( $C, B = 11$ ), —  $P=1000$  кН/м<sup>2</sup>, —  $P=2000$  кН/м<sup>2</sup>, —  $P=3000$  кН/м<sup>2</sup>

Fig. 2. The dependence of the errors on the applied load:

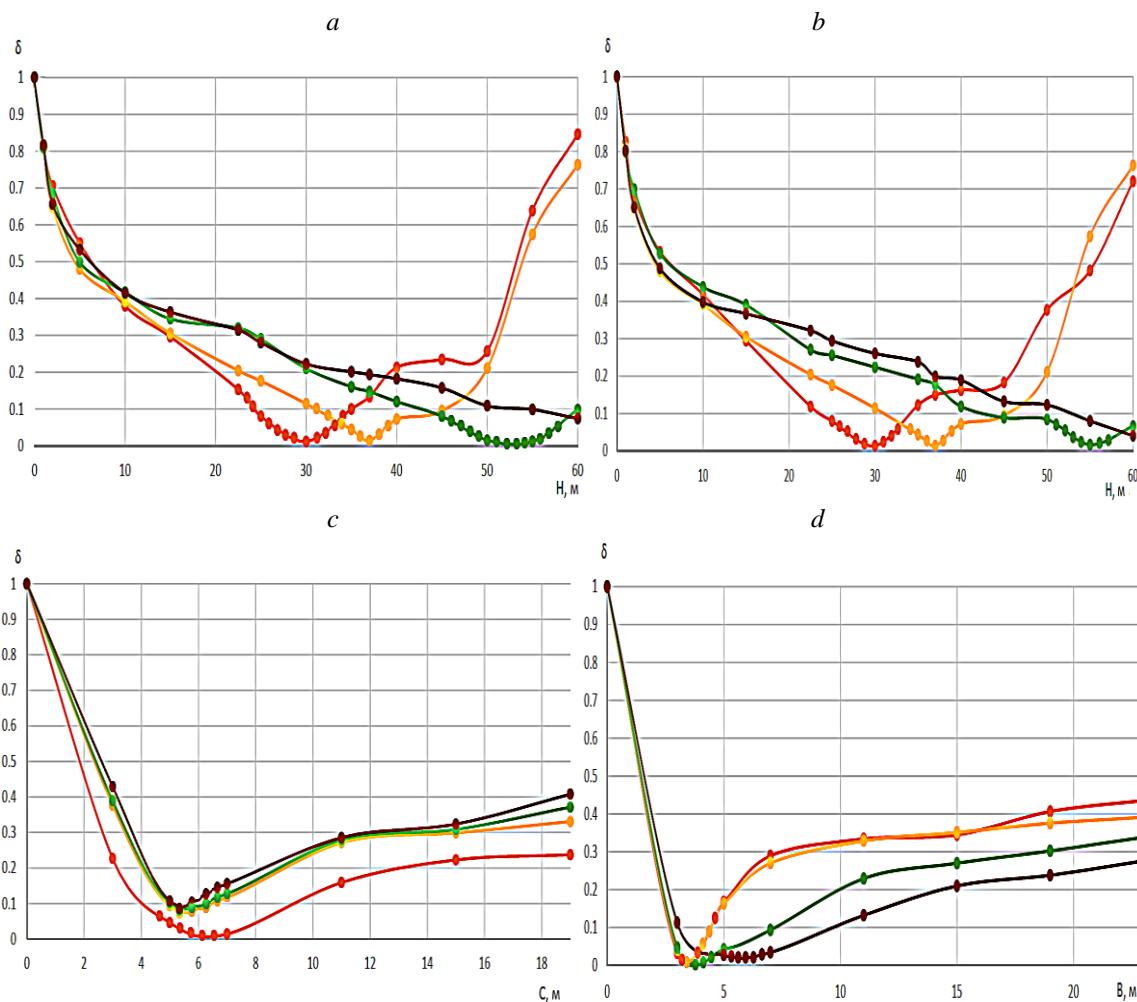
 $\delta$  from  $H$  ( $C, B = 11$ ), —  $P=1000$  kN/m<sup>2</sup>, —  $P=2000$  kN/m<sup>2</sup>, —  $P=3000$  kN/m<sup>2</sup>

Рис. 3. Зависимости погрешности от геометрических параметров модели:

 $\delta$  от  $H$  ( $C=11$ ), —  $B=7$  м, —  $B=11$  м, —  $B=15$  м, —  $B=20$  м (a); $\delta$  от  $H$  ( $B=11$ ), —  $C=7$  м, —  $C=11$  м, —  $C=15$  м, —  $C=20$  м (b); $\delta$  от  $C$  ( $H=30$ ), —  $B=11$  м, —  $B=17$  м, —  $B=19$  м, —  $B=21$  м (c); $\delta$  от  $B$  ( $C=11$ ), —  $H=15$  м, —  $H=20$  м, —  $H=25$  м, —  $H=30$  м (d)

Fig. 3. The dependence of the error on the geometric parameters of the model:

 $\delta$  from  $H$  ( $C=11$ ), —  $B=7$  m, —  $B=11$  m, —  $B=15$  m, —  $B=20$  m (a); $\delta$  from  $H$  ( $B=11$ ), —  $C=7$  m, —  $C=11$  m, —  $C=15$  m, —  $C=20$  m (b); $\delta$  from  $C$  ( $H=30$ ), —  $B=11$  m, —  $B=17$  m, —  $B=19$  m, —  $B=21$  m (c); $\delta$  from  $B$  ( $C=11$ ), —  $H=15$  m, —  $H=20$  m, —  $H=25$  m, —  $H=30$  m (d)

В качестве критерия оптимальности принималась минимальная величина погрешности расчета:

$$\delta = \frac{S_m - S_a}{S_a} \quad (2)$$

где  $S_m$  – осадка грунта, рассчитанная по базовой модели;  $S_a$  – осадка, полученная по результатам аналитического расчета по формуле (1), принимая за эталон.

### Результаты.

На Рис. 2 представлены характерные графики зависимостей погрешности  $\delta$  от глубины модели  $H$  при различных значениях нагрузки  $P$ , из которых следует, что зависимость  $\delta(H)$  имеет минимум, соответствующий рациональному (оптимальному) значению  $H$ .

На Рис. 3 приведены полученные в результате вычислений зависимости погрешности расчета  $\delta$  от геометрических параметров модели  $B$ ,  $C$ ,  $H$ , из которых можно определить рациональные области базовой модели. При увеличении одного из трех параметров ( $B$ ,  $C$ ,  $H$ ) два остальных параметра принимались постоянными. Из графиков следует, что основным влияющим параметром модели является ее глубина  $H$ . Отсюда следует, что параметры  $B$  и  $C$  должны изменяться пропорционально размерам плиты фундамента (штампа), а рациональная глубина модели  $H$  должна определяться по параметрам  $B$ ,  $C$  и  $P$ .

На Рис. 4 представлены зависимости величины  $\delta$  от геометрических параметров модели  $B$ ,  $C$ ,  $H$ , отличных от рациональных. Из этих графиков следует, что при нерациональных параметрах модели погрешность расчетов может превышать 30%, в то время как их рациональные сочетания позволяют снизить  $\delta$  до значений меньше 5%.

В Таблице 2 приведены полученные на основе приведенных расчетов рациональные геометрические параметры базовой модели (при  $a = 3$  м).

Из расчета по формуле (1) следует, что зависимость суммарной осадки  $\Delta S$  от модуля

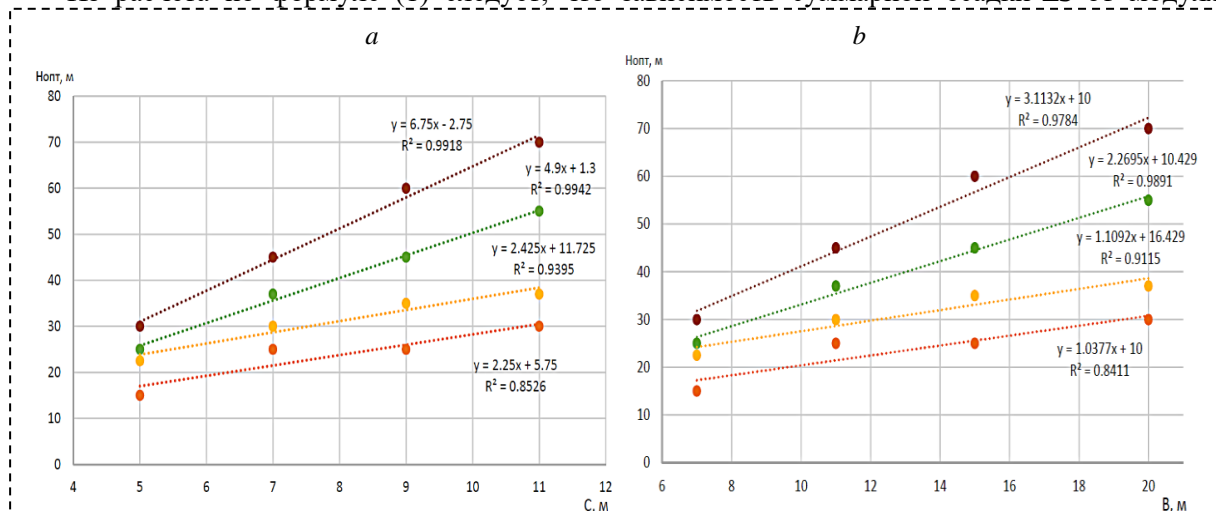


Рис. 5. Регрессионные зависимости оптимальной высоты модели  $H_{OPT}$  от горизонтальных размеров  $B$  и  $C$ :

$H_{OPT}(C, B)$ , —  $B = 7$  м, —  $B = 11$  м, —  $B = 15$  м, —  $B = 20$  м (a);

$H_{OPT}(B, C)$ , —  $C = 5$  м, —  $C = 7$  м, —  $C = 9$  м, —  $C = 11$  м (b)

Fig. 5. Regression dependences of the optimal height of the  $H_{OPT}$  model on the horizontal dimensions  $B$  and  $C$ :

$H_{OPT}(C, B)$ , —  $B = 7$  м, —  $B = 11$  м, —  $B = 15$  м, —  $B = 20$  м (a);

$H_{OPT}(B, C)$ , —  $C = 5$  м, —  $C = 7$  м, —  $C = 9$  м, —  $C = 11$  м (b)

деформации  $E$  и нагрузки  $P$  при одинаковой границе сжимаемой толщи линейная (Рис. 6). Отсюда следует, что геометрические параметры реальной модели следует корректировать по отношению к базовой модели пропорционально  $P$  и обратно пропорционально  $E$ .

Таблица. 2. Значения высоты модели  $H$  в зависимости от горизонтальных размеров  $B$  и  $C$  для базовой модели ( $a = 3$  м)  
 Table. 2. The values of the height of the model  $H$  depending on the horizontal dimensions  $B$  and  $C$  for the base model ( $a = 3$  m)

$C \backslash B$	7	11	15	20
5	15	22.5	25	30
7	25	30	37	45
9	25	35	45	60
11	30	37	55	70

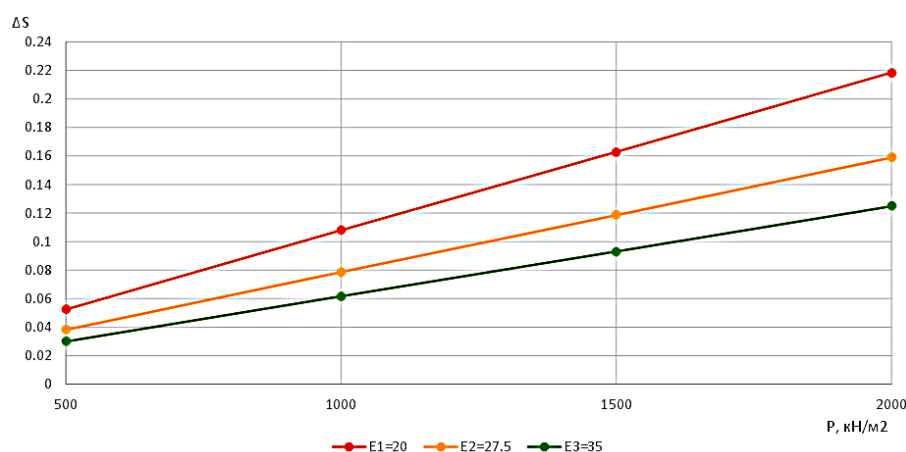


Рис. 6. Регрессионные зависимости оптимальной высоты модели  $H_{\text{ОПТ}}$  от горизонтальных размеров  $B$  и  $C$ :

$\Delta S$  от  $E$ , —  $E=20$  кН/м², —  $E=27,5$  кН/м², —  $E=30$  кН/м²

Fig. 6. Regression dependences of the optimal height of the  $H_{\text{OPT}}$  model on the horizontal dimensions  $B$  and  $C$ :

$\Delta S$  от  $E$ , —  $E=20$  кН/м², —  $E=27,5$  кН/м², —  $E=30$  кН/м²

Обобщение полученных результатов позволило разработать общий алгоритм определения рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания с учетом особенностей программного комплекса *Plaxis* (Рис. 7).

Основные этапы алгоритма состоят в следующем:

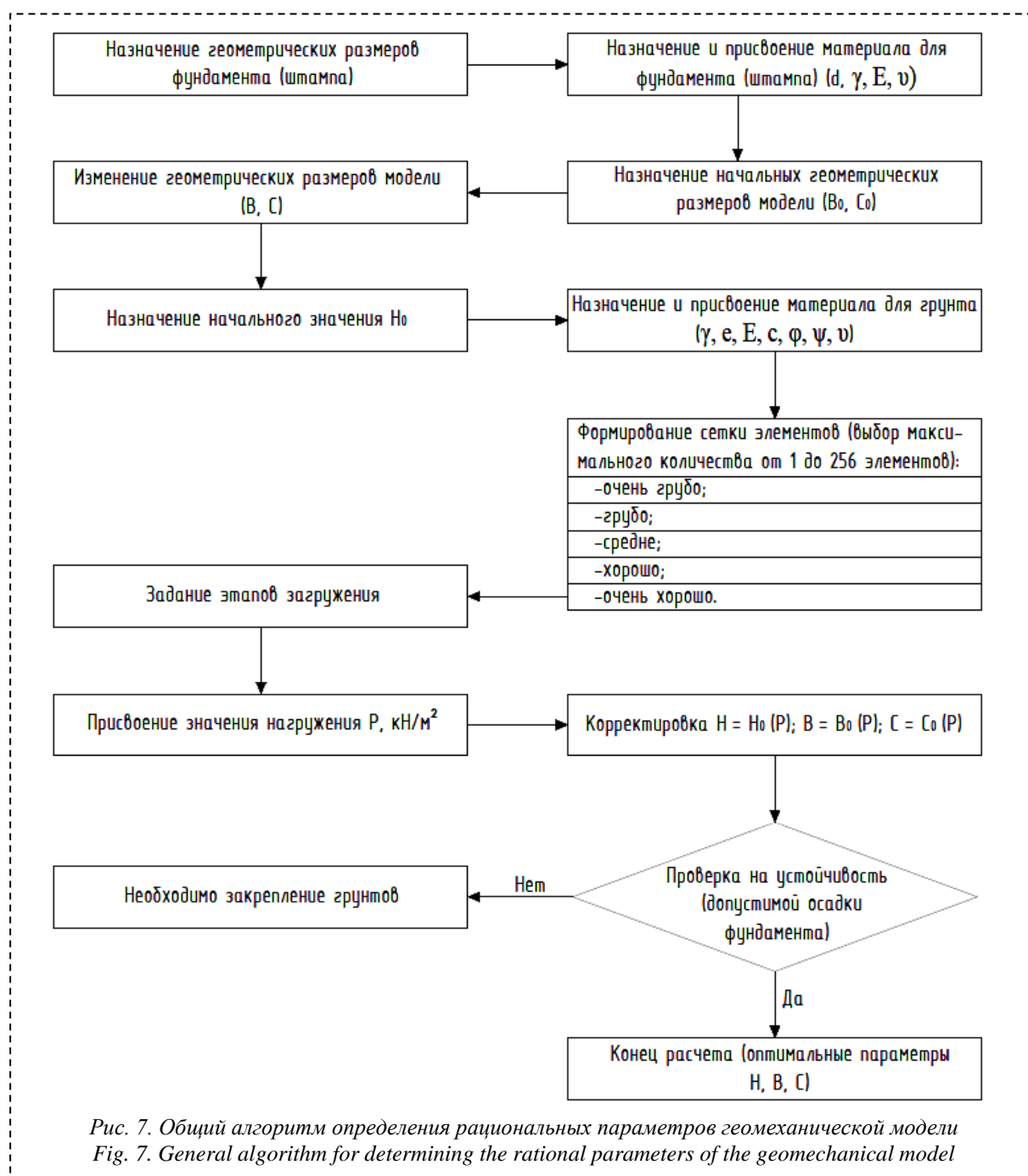
- назначение геометрических и физических параметров фундамента (штампа);
- выбор начальных геометрических параметров модели  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $H_0$ ;
- назначение параметров грунта;
- формирование сетки элементов;
- задание нагрузки на фундамент  $P$ ;
- корректировка начальных значений параметров  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $H_0$ ;
- проверка модели на устойчивость (по допустимой осадке фундамента).

#### Выводы.

1. Основным критерием рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения является минимальная погрешность расчета осадки фундамента в сравнении с эталонным аналитическим расчетом с использованием модели Мора – Кулона. Методом компьютерного эксперимента на базовой объемной модели установлены линейные регрессионные зависимости между поперечными размерами и оптимальной высотой, при которой погрешность геомеханических расчетов не превышает 5%.

2. Разработан общий алгоритм определения рациональных параметров геомеханической модели, отражающий функциональные особенности программного комплекса *Plaxis 3D*, включающий назначение параметров фундамента, выбор начальных геометрических

параметров модели, назначение параметров грунта, формирование сетки элементов, задание нагрузки на фундамент, корректирование параметров модели в соответствии с установленными зависимостями, проверка модели на устойчивость.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов С. М., Герасимов О. В., Никулин Н. Ю. Комплексный геолого-геофизический мониторинг процессов упрочнения грунтов. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. 344 с.
2. Сычкина Е. Н., Офрихтер Я. В., Антипов В. В. Прогноз длительной осадки свай на песчанниках и аргиллитоподобных глинах пермского возраста // Вестник ПНИПУ. 2019. №2 (10). С. 5–13.
3. Тарасов А. А. Совершенствование метода расчета несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах // Вестник ТГАСУ. 2015. №5. С.225–233.
4. Мацеля В. И., Сеелев И. Н., Леконцев А. В., Хафизов Р. Р., Панасенко Н. Н., Синельщиков А. В.,



Яковлев П. В. Сравнительный анализ параметров конечно-элементных моделей грунтов, полученных численными методами // Вестник АГТУ. 2017. №1 (63). С. 23–31.

5. Вартанов А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. Москва : Изд-во «Горная книга», 2013. 548 с.

6. Шулятьев В. П., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. Освоение подземного пространства городов. Москва : Изд-во АСВ, 2017. 510 с.

7. Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства. Москва : Изд-во АСВ, 2019. 218 с.

8. Соколов М. В., Простов С. М., Герасимов О. В. Прогноз геомеханического состояния закрепляемого грунтового основания горнотехнического здания // Вестник ТГАСУ. 2019. №6 (21). С. 199–210.

9. Беляев Е. Н., Бурдонов А. Е., Мурзин Н. В. Прогнозирование и оценка устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении с использованием программных комплексов Geostudio и Plaxis 3D // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. №1. С. 138–158.

10. Tassilov Badaulet, Zhambakina Zhanna. Numerical modeling of the operation of bored injection piles to assess their bearing capacity // Universum: Технические науки. 2021. 2 (83): 32–35.

11. Клевеко В. И., Татьянников Д. А., Драчева Е. О. Сравнение модельных штамповых испытаний и расчетов по методу конечных элементов // Вестник ПНИПУ. 2014. №4. С. 170–179.

12. Мельников Р. В., Порошин О. С. Отличие использования параметров OCR и  $\rho_{\text{ор}}$  при деформировании переуплотненного грунта под нагрузкой в программе Plaxis // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. №2. С. 90–94.

13. Полищук А.И., Самарин Д.Г., Филиппович А.А. Результаты моделирования процессов взаимодействия фундаментов с глинистым грунтом основания // Вестник ТГАСУ. 2013. №1. С. 253–259.

14. Соколова О. В. Подбор параметров грунтовых моделей в программном комплексе Plaxis 2D // Magazine of Civil Engineering. 2014. №4. С. 10–16.

15. Vladimir Glazunov, Stanislav Burlutsky, Rimma Shuvalova, Sergey Zhdanov. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data // Journal of Mining Institute. 2022. 257: 771–782.

16. Строкова Л. А. Анализ чувствительности параметров при численном моделировании поведения грунтов // Известия ТПУ. 2008. №1 (313). С. 64–68.

17. Соколов М. В. Анализ влияния горизонтальной нагрузки на напряженно-деформированное состояние искусственных грунтовых оснований сооружений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №2. С. 5–19.

18. Преснов О. М., Новик Д. Е. Расчет плиты переменной жесткости на упругом основании в различных программных комплексах // Инновации и инвестиции. 2023. №1. С. 187–189.

19. Сычкина Е. Н., Антипов В. В., Офрихтер Я. В. Численные исследования работы забивной сваи на аргиллитоподобных глинах // Вестник МГСУ. 2019. №2 (14). С. 188–198.

20. Полищук А. И., Самарин Д. Г., Филиппович А. А. Оценка несущей способности свай в глинистых грунтах с помощью ПК Plaxis 3D Foundation // Вестник ТГАСУ. 2013. №3. С. 351–359.

21. Калошина С. В., Шаламова Е. А., Безгодов М. А. Особенности инженерных изысканий и геотехнического моделирования объектов в условиях плотной городской застройки // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2016. №3. С. 72–78.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Власов Максим Алексеевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: maxsdss@mail.ru

Простов Сергей Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: psm.kem@mail.ru



Соколов Михаил Валерьевич, кан. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: smv.ad@kuzstu.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Власов Максим Алексеевич – обзор литературы по теме исследования, проведение работы, сбор и анализ данных, написание текста.

Простов Сергей Михайлович – научный менеджмент, анализ данных, выводы.

Соколов Михаил Валерьевич – научный менеджмент, анализ данных, выводы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE GEOMECHANICAL MODEL OF THE SOIL FOUNDATION OF THE STRUCTURE IN THE PLAXIS 3D PC

Maksim A. Vlasov, Sergey M. Prostov,  
Mikhail V. Sokolov

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\*for correspondence: maxsdss@mail.ru



#### Article info

Received:

21 October 2023

Accepted for publication:

20 November 2023

Accepted:

22 November 2023

Published:

05 December 2023

**Keywords:** soil foundation of the structure; stress-strain state; foundation sediment; finite element method; minimum calculation error; regression dependence; computer mathematical model

#### Abstract.

*Sufficient accuracy of calculation of stress-strain state of inhomogeneous soil foundations of structures, including the use of technologies for controlling physical and mechanical properties of soils, is possible only by means of application of software systems implemented by the finite element method. Based on the analysis of the results of forecasting the precipitation of structures according to geomechanical modeling data using specialized software systems Plaxis, ANSYS, FLAC, FEMmodels, GeoSoft, midas GTS, Z-soil, etc., the goal is to provide rational parameters of similar models. The criteria of minimal error of foundation settlement calculation in comparison with the reference calculation using the Mohr-Coulomb model were applied. On the basic model with a stamp of a single size, linear regression dependences between the transverse dimensions and the optimal height are established, at which the error of geological calculations does not exceed 5%. Certain geometric parameters should adjusted proportionally to the real load on the foundation and inversely proportional to the modulus of soil deformation. The developed general algorithm for determining the rational parameters of the geomechanical model, focused on the functional features of the Plaxis 3D software package, includes setting initial geometric parameters of the model according to the established dependencies, their subsequent adjustment taking into account the real geometry of the foundation, the load on it and the deformation properties of soils, checking the model for stability.*

**For citation:** Vlasov M.A., Prostov S.M., Sokolov M.V. Selection of rational parameters of the geomechanical model of the soil foundation of the structure in the PLAXIS 3D PC. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 5(159):4-14. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-4-14, EDN: YXSEYA

## REFERENCES

1. Prostov S.M., Gerasimov O.V., Nikulin N.Yu. Kompleksnyi geologo-geofizicheskii monitoring protsessov uprochneniya gruntov [Comprehensive geological and geophysical monitoring of soil hardening processes]. Tomsk: Tomsk University Press; 2015. 344 p.

2. Sychkina E.N., Ofrihter Ja.V., Antipov V.V. Prognoz dlitel'noj osadki svai na peschanikah i argillitopodobnyh glinah permskogo vozrasta [The forecast of long-term settlement of the pile on sandstones and claystones of the permian age]. *Vestnik PNIPU [Bulletin of PNRPU]*. 2019; 10(2):5–13.
3. Tarasov A.A. Sovershenstvovanie metoda raschjota nesushhej sposobnosti inieekcionnyh svaj v slabych glinistyh gruntah [Improvement of bearing capacity design technique for injection piles in soft clay soils]. *Vestnik TGASU [Bulletin of TSASU]*. 2015; 5:225–233.
4. Macelja V.I., Seelev I.N., Lekoncev A.V., Hafizov R.R., Panasenkov N.N., Sinel'shhi-kov A.V., Jakovlev P.V. Sravnitel'nyj analiz parametrov konechno-jelementnyh modelej gruntov, poluchennyh chislennymi metodami [Comparative analysis of the parameters of finite-element models of soils obtained by numerical methods]. *Vestnik AGTU [Bulletin of AGTU]*. 2017; 63(1):23–31.
5. Vartanov A.Z. Fiziko-tehnicheskij kontrol' i monitoring pri osvoenii podzemnogo prostranstva gorodov [Physical and technical control and monitoring during the development of the underground space of cities]. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House; 2013. 548 p.
6. Shuljat'ev V.P., Mozgacheva O.A., Pospehov V.S. Osvoenie podzemnogo prostranstva gorodov [Development of the underground space of cities]. Moscow: ASV Publishing House; 2017. 510 p.
7. Petruhin V.P., Shuljat'ev O.A., Mozgacheva O.A. Novye sposoby geotekhnicheskogo pro-ektirovaniya i stroitel'stva [New ways of geotechnical design and construction]. Moscow: ASV Publishing House; 2019. 218 p.
8. Sokolov M.V., Prostov S.M., Gerasimov O.V. Prognoz geomechanicheskogo sostojaniya zakrepljaemogo gruntovogo osnovaniya gornotekhnicheskogo zdaniya [Forecast of the geomechanical condition of the pinned soil base of the mining and technical building]. *Vestnik TGASU [Bulletin of TSASU]*. 2019; 21(6):199–210.
9. Beljaev E.N., Burdonov A.E., Murzin N.V. Prognozirovaniye i ocenka ustojchivosti bortov, ustupov razrezov i otkosov otvalov na kamennougol'nom mestorozhdenii s is-pol'zovaniem programmnyh kompleksov Geostudio i Plaxis 3D [Prediction and evaluation of the stability of sides, section lips and slopes in a coal deposits using the Geostudio and Plaxis 3d software complexes]. *Izvestija TulGU. Nauki o Zemle [News of TulsU. Sciences of Earth]*. 2023; 1:138–158.
10. Tassilov Badaulet, Zhambakina Zhanna. Numerical modeling of the operation of bored injection piles to assess their bearing capacity. *Universum: Technical Sciences*. 2021; 83(2):32–35.
11. Kleveko V.I., Tat'jannikov D.A., Dracheva E.O. Sravnenie model'nyh shtampovyh is-pytanij i raschetov po metodu konechnykh jelementov [Comparison of model tests and calculations finite element method]. *Vestnik PNIPU [Bulletin of PNRPU]*. 2014; 4:170–179.
12. Mel'nikov R.V., Poroshin O.S. Otlichie ispol'zovaniya parametrov OCR i pop pri deformirovanii pereuplotnennogo grunta pod nagruzkoj v programme Plaxis [Difference between the use of ocr and pop parameters on deformation of soil compaction under load in Plaxis]. *Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN [Academic Bulletin of Uralniiproekt RAASN]*. 2017; 2:90–94.
13. Polishhuk A.I., Samarin D.G., Filippovich A.A. Rezul'taty modelirovaniya processov vzaimodejstviya fundamentov s glinistym gruntom osnovaniya [Results of modelling processes of interaction of foundations with clay soil]. *Vestnik TGASU [Bulletin of TSASU]*. 2013; 1:253–259.
14. Sokolova O.V. Podbor parametrov gruntovykh modelej v programmnom komplekse Plaxis 2D [The selection of soil models parameters in Plaxis 2D]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014; 4:10–16.
15. Vladimir Glazunov, Stanislav Burlutsky, Rimma Shuvalova, Sergey Zhdanov. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022; 257:771–782.
16. Strokova L.A. Analiz chuvstvitel'nosti parametrov pri chislennom modelirovanii povedeniya gruntov [Parameter sensitivity analysis at numerical modeling of soil behavior]. *Izvestija TPU [Bulletin of TPU]*. 2008; 313(1):64–68.
17. Sokolov M.V. Analiz vlijanija gorizontальной nagruzki na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie iskusstvennyh gruntovykh osnovanij sooruzhenij [Analysis of the influence of horizontal load on the stress-strain state of artificial soil foundations of structures]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass State Technical University]*. 2017; 2:5–19.
18. Presnov O.M., Novik D.E. Raschet plity peremennoj zhestkosti na uprugom osnovanii v razlichnyh programmnyh kompleksah [Calculation of a slab of variable stiffness on an elastic foundation in various software systems]. *Innovacii i investicii [Innovation and investment]*. 2023; 1:187–189.
19. Sychkina E.N., Antipov V.V., Ofrihter Ja.V. Chislennye issledovaniya raboty zabiv-noj svai na argillitopodobnyh glinah [Numerical investigations of work of driven pile on claystones]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*. 2019; 14(2):188–198.
20. Polishhuk A.I., Samarin D.G., Filippovich A.A. Ocenka nesushhej sposobnosti svaj v glinistyh gruntah s pomoshh'ju PK Plaxis 3D Foundation [Assessment of load capacity of piles in clay soil by means of the Plaxis 3D foundation]. *Vestnik TGASU [Bulletin of TSASU]*. 2013; 3:351–359.
21. Kaloshina S.V., Shalamova E.A., Bezgodov M.A. Osobennosti inzhenernykh izyskanij i geotekhnicheskogo modelirovaniya obiektov v uslovijah plotnoj gorodskoj zastrojki [Features of engineering surveys and geotechnical modeling of objects in dense urban areas]. *Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN [Academic Bulletin of Uralniiproekt RAASN]*. 2016; 3:72–78.

---

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

Maksim A. Vlasov, postgraduate, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: maxsdss@mail.ru

Sergey M. Prostov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: psm.kem@mail.ru

Sokolov Mikhail Valeryevich, C. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28), e-mail: smv.ad@kuzstu.ru

*Contribution of the authors:*

Maksim A. Vlasov – review of the literature on the research topic, conducting work, data collection and analysis, writing a text, conclusions.

Sergey M. Prostov – scientific management, data analysis, conclusions.

Mikhail V. Sokolov – scientific management, data analysis, conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

