

# ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ HARDENING SOIL НА ПРИМЕРЕ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Н. МАЛЕЕВА<sup>1,✉</sup>

А.И. ХАРИЧКИН<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

## Аннотация

*Введение.* В статье рассмотрены основные аспекты получения параметров модели Hardening Soil для расчета грунтовых оснований. Эта модель становится все более популярной благодаря своей эффективности при расчете различных конструкций, таких как свайные фундаменты, ограждающие конструкции котлованов и анкерные крепления.

*Цель.* Анализ опыта получения параметров для расчетной модели Hardening Soil на основе лабораторных данных, полученных в результате инженерно-геологических изысканий.

*Материалы и методы.* Производился анализ и обработка результатов лабораторных исследований, проведенных для грунтов Нижегородской области. Лабораторные работы проводились в рамках инженерных изысканий. Для полученных параметров модели Hardening Soil была выполнена оптимизация параметров и калибровка модели в программном комплексе Plaxis, в модуле Soil Test.

*Результаты.* Получен набор расчетных параметров для модели Hardening Soil. Для подтверждения точности и достоверности полученных параметров было проведено сопоставление лабораторных результатов с результатами численного моделирования. Этот этап исследования позволил убедиться в том, что параметры модели Hardening Soil, оптимизированные и откалиброванные, обеспечивают высокую степень соответствия между лабораторными данными и численными расчетами.

*Выводы.* В настоящий момент нет единой принятой методики обработки результатов лабораторных испытаний и статистического анализа. В целом анализ результатов, подбора параметров для реализации расчетной модели остается на экспертном уровне и не регулируется нормативными документами. Дальнейшие исследования в этой области позволят разработать более эффективные методы и подходы, что будет способствовать развитию науки и практики в области геотехники.

**Ключевые слова:** Plaxis, Soil Test, параметры модели Hardening Soil, статистическая обработка, интерпретация лабораторных испытаний

**Для цитирования:** Малеева А.Н., Харичкин А.И. Обработка данных инженерно-геологических изысканий для определения параметров модели Hardening Soil на примере глинистых грунтов Нижегородской области. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;43(4):110–122. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-110-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-110-122)

**Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

**Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.10.2024

Поступила после рецензирования 15.11.2024

Принята к публикации 21.11.2024

## PROCESSING OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEY DATA FOR DETERMINING PARAMETERS OF THE HARDENING SOIL MODEL ON THE EXAMPLE OF CLAY SOILS IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION

A.N. MALEEVA<sup>1,✉</sup>

A.I. KHARICHKIN<sup>1,2</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

<sup>1</sup> Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

**Abstract**

*Introduction.* The paper examines the key aspects of obtaining parameters for the hardening soil model used in the analysis of soil bases. This model is increasingly popular due to its effectiveness in calculating various structures, such as pile foundations, retaining walls, and anchorages.

*Aim.* To analyze the experience of obtaining parameters for the hardening soil model based on laboratory data derived from engineering and geological surveys.

*Materials and methods.* The methodology involved analyzing and processing the results of laboratory studies on soils in the Nizhny Novgorod region. The laboratory tests were performed as part of engineering surveys. The parameters were optimized and the model was calibrated for the obtained parameters of the hardening soil model using the Plaxis software suite, specifically within the Soil Test module.

*Results.* A set of design parameters was obtained for the hardening soil model. A comparison between laboratory results and numerical modeling outcomes was performed to confirm the accuracy and reliability of these parameters. This stage of the study demonstrated that the optimized and calibrated parameters of the hardening soil model provide a high degree of consistency between laboratory data and numerical calculations.

*Conclusions.* Currently, no universally accepted methodology exists for processing the results of laboratory tests and statistical analysis. Overall, the analysis of results and parameter selection for implementing the calculation model remains at an expert level and is not regulated by normative documents. Further research in this area will enable the development of more effective methods and approaches, contributing to advancements in both science and practice in geotechnical engineering.

**Keywords:** Plaxis, Soil Test, hardening soil model parameters, statistical processing, interpretation of laboratory tests

**For citation:** Maleeva A.N., Kharichkin A.I. Processing of engineering and geological survey data for determining parameters of the Hardening Soil model on the example of clay soils in the Nizhny Novgorod region. *Vestnik NIK Stroitel' stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):110–122. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-110-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-110-122)

#### **Authors contribution statement**

All authors made equal contributions to the study and the publication.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 28.10.2024*

*Revised 15.11.2024*

*Accepted 21.11.2024*

## **Введение**

В последние годы набирает популярность использование нелинейных моделей грунта для расчета грунтовых оснований. Благодаря широкому распространению программных комплексов Plaxis и Midas, в которых удобно реализован расчетный комплекс, широкое использование получила модель Hardening Soil (HS).

Модель хорошо себя зарекомендовала при расчете свайных фундаментов, ограждающих конструкций котлованов, анкерных креплений и иных конструкций, в которых преобладают деформации сдвига и образуются пластические зоны, поэтому широко применяется при расчетах оснований на застроенных территориях.

Также модель широко применяется для моделирования напряжений в грунте при строительстве тоннелей и станций метрополитена [1–3]. Применение расчетной модели Hardening Soil позволяет снизить затраты на строительство, обеспечив высокую надежность проекта.

Модель обладает рядом ограничений, например неспособностью учесть явления анизотропии прочности и жесткости, ползучести и длительной прочности, а также данная модель непригодна для моделирования динамических процессов. В отдельных случаях модель может давать завышенные значения прочности [3, 4].

Несмотря на широкое применение модели Hardening Soil, в существующих нормативных документах не регламентируется, какими методами необходимо получать параметры расчетной модели и каким образом проводить обработку лабораторных испытаний. Существуют отдельные методические рекомендации разных групп научного сообщества. Первой попыткой разработки нормативного документа, регламентирующего получение параметров нелинейных моделей, был СТО 36554501-067-2021 «Лабораторное определение параметров нелинейного механического поведения грунтов с объемным и двойным упрочнением» [5], который требует модификации для широкого использования.

В настоящий момент сформулированы отдельные рекомендации, которыми в той или иной степени пользуются специалисты изыскательских организаций. Некоторые вопросы определения необходимых параметров остаются дискуссионными, для их решения необходима совместная работа специалистов – геологов, проектировщиков и геотехников.

## Основная часть

Основные характеристики грунтов, необходимые для реализации расчета по модели HS, получают в результате лабораторных работ в рамках инженерно-геологических изысканий по специальному заданию. Испытания на трехосное сжатие по ГОСТ 12248.3-2020 [4] позволяют получить: модуль деформации при 50% прочности ( $E_{50}^{ref}$ ); модуль разгрузки/повторного нагружения ( $E_{ur}^{ref}$ ); коэффициент поперечной деформации разгрузки/повторного нагружения ( $\nu_{ur}$ ); угол дилатансии ( $\Psi$ ); эффективный угол внутреннего трения ( $\varphi'$ ); эффективное удельное сцепление ( $c'$ ). Расчетные параметры на основе лабораторных испытаний методом трехосного сжатия: коэффициент разрушения ( $R_f$ ); степенной показатель жесткости ( $m$ ).

Испытания на компрессионное сжатие грунтов по ГОСТ 12248.4-2020 [6] и ГОСТ Р 58326-2018 [7] позволяют получить: модуль деформации одометрический ( $E_{eod}$ ); коэффициент переуплотнения (OCR); давление предуплотнения (POP); степенной показатель жесткости ( $m$ ).

Для обсуждения методики получения параметров модели были обработаны данные лабораторных исследований для верхнепермских отложений Нижегородской области. Выделенные инженерно-геологические элементы (ИГЭ) распространены повсеместно, в зависимости от геоморфологических особенностей местности встречаются с глубин от 2 до 10 м, вскрытая мощность отложений до 15 м.

– ИГЭ-8. Суглинок красно-коричневый, твердый, с прослоями суглинка полутвердого, со стяжениями гипса и карбонатов, с редкими включениями дресвы, щебня.

– ИГЭ-9. Глина красно-коричневая, твердая, с прослоями алевритов, глины полутвердой, со стяжениями гипса и карбонатов, с редкими включениями дресвы, щебня.

Одним из основных параметров, используемых для расчета и фигурирующих в задании на лабораторные работы по получению параметров модели, является **опорное давление  $P_{ref}$** .

Опорное давление  $P_{ref}$  не имеет физического смысла и не является характеристикой реального грунта, но используется для реализации математической модели и описывает начальную точку, относительно которой Paxis рассчитывает свойства грунта для корректной работы модели [8].

Для корректного определения параметров жесткости реального грунта необходимо проводить серии опытов при давлениях, характерных для данного инженерно-геологического элемента в природе, также следует учитывать разницу вертикальных и горизонтальных напряжений, действующих в массиве грунта.

Полученные характеристики  $E_{eod}$  и  $E_{50}$  для использования в расчетной модели HS следует пересчитать для опорного давления  $P_{ref} = 100$  кПа с помощью известных формул [9]:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c' \times \cot \varphi'}{P_{ref} + c' \times \cot \varphi'} \right)^m, \quad (1)$$

$$E_{eod} = E_{eod}^{ref} \left( \frac{\sigma_1 + c' \times \cot \varphi'}{P_{ref} + c' \times \cot \varphi'} \right)^m. \quad (2)$$

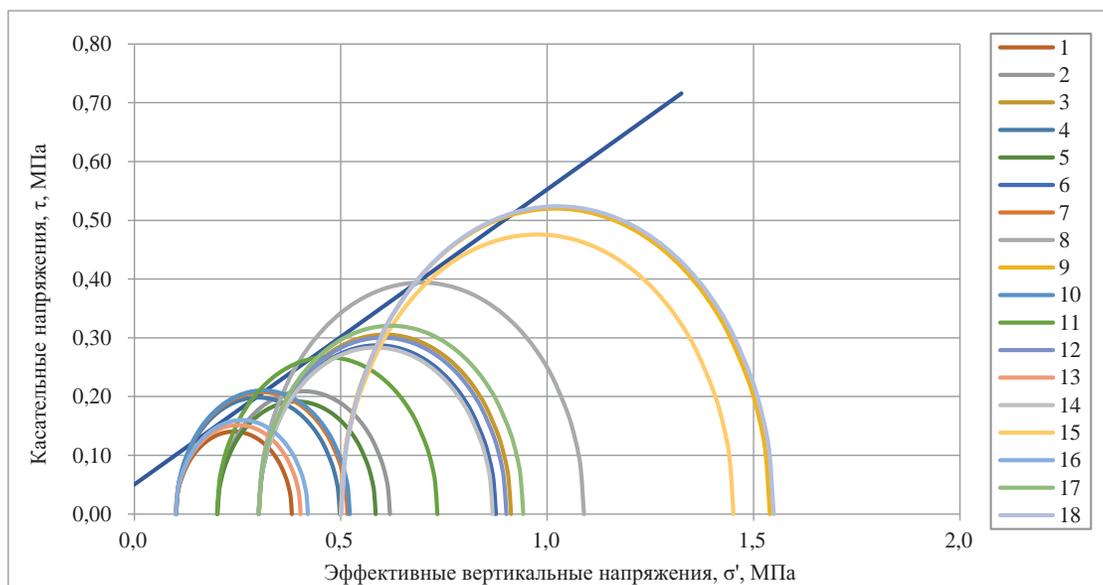
Прочностные параметры грунтов получают в результате консолидированно-дренированных трехосных испытаний. В сложившейся практике инженерно-геологических изысканий принято получать частные значения прочностных характеристик грунтов

для шести образцов выделенного инженерно-геологического элемента в соответствии с действующим ГОСТ 12248.3-2020 [4]. Как правило, в задание для лаборатории передается стандартное значение нагрузок для испытаний в соответствии с ГОСТ 12248.3-2020 [4], учитывающее величину действующих в массиве напряжений, но не охватывающее весь диапазон целиком. Затем, в результате статистической обработки данных для одного ИГЭ по ГОСТ 20522-2012 [10], получается нормативное значение характеристик, используемое в дальнейших расчетах.

Для определения параметров, отражающих характеристики всего инженерно-геологического элемента, рационально использовать серию из 18 испытаний в диапазоне напряжений, охватывающих все действующие в массиве напряжения. Совместная обработка всех испытаний позволяет получить более точные значения прочностных характеристик для выделенного ИГЭ.

Привычный для наших нормативных документов метод обработки результатов испытаний, отраженный в лабораторных протоколах (рис. 1), не позволяет проводить статистическую обработку результатов по явным статистическим критериям для набора образцов, что в конечном счете отражается на содержании инженерно-геологического отчета по результатам изысканий.

Наиболее удобным в данном случае методом обработки можно считать метод построения  $q - p$  диаграммы (рис. 2), где  $q$  – девиатор напряжений, а  $p$  – средние эффективные напряжения обжатия образца [11]. Данный метод позволяет провести статистический анализ в рамках одного инженерно-геологического элемента и получить значения прочностных характеристик, отражающее характеристики элемента целиком. Прочностные характеристики, полученные двумя описанными способами для ИГЭ-8 и ИГЭ-9, приведены в табл. 1.



**Рис. 1.** Классический вариант построения кругов Мора для определения прочностных характеристик  
**Fig. 1.** Classical method for constructing Mohr circles to determine strength characteristics

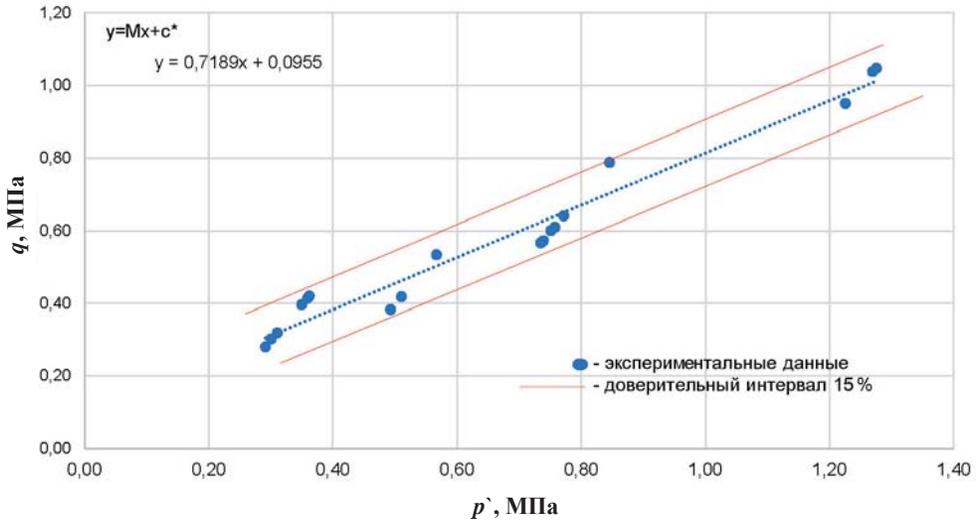


Рис. 2. Обработка результатов трехосных испытаний методом  $q - p$  диаграммы  
 Fig. 2. Processing results of triaxial tests using  $q - p$  diagram method

Таблица 1

**Варианты прочностных характеристик, полученных двумя способами обработки лабораторных испытаний**

Table 1

**Variants of strength characteristics obtained by two methods of processing laboratory tests**

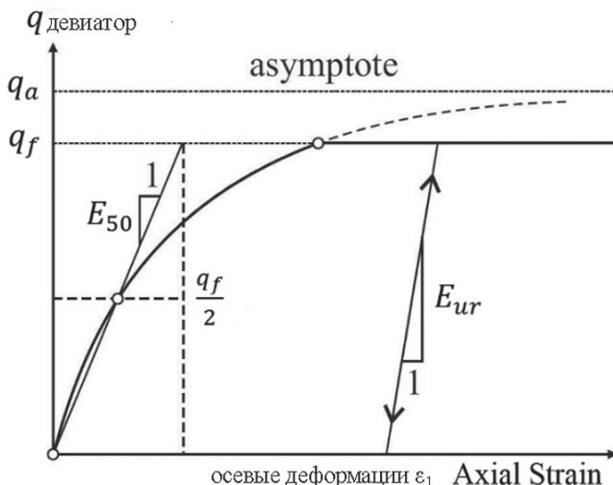
ИГЭ	ИГЭ-8		ИГЭ-9	
	1	2	1	2
Вариант обработки	1	2	1	2
угол внутреннего трения, $\varphi$ , град.	26	26	22	23
удельное сцепление, $c$ , кПа	56	50	61	54

Расчет искомых параметров осуществляется по формулам (3), (4) [11]:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{3 \times M}{6 + M}\right), \tag{3}$$

$$c = c^* \frac{3 - \sin(\varphi)}{6 \times \cos(c)}. \tag{4}$$

Характер работы грунта, описываемый этой моделью, представлен на рис. 3, где  $q_a$  – асимптотическое значение для гиперболической функции, описывающей поведение грунта. Поскольку в грунтах пластические деформации конечны и при определенной деформации наступает разрушение, дополнительно вводится линия разрушения ( $q_p$ ). Несовершенство лабораторного оборудования и методические ограничения не позволяют корректно опытным путем определять параметр  $E_i$  в начальной части гиперболической зависимости, поэтому для корректной работы модели используется значение  $E_{50}$  – жесткость при 50% прочности. При разгрузке используется классический закон Гука [12].



**Рис. 3.** Гиперболическая зависимость между напряжениями и деформациями при первичном нагружении грунта в стандартном дренированном испытании на трехосное сжатие [13]

**Fig. 3.** Hyperbolic relationship between stresses and strains during initial loading of soil in standard drained triaxial compression tests [13]

Определение параметров жесткости: секущий модуль  $E_{50}$ , определение модуля разгрузки/повторного нагружения  $E_{ur}$  осуществляется в соответствии с нормативным документом ГОСТ 12248.3-2020 [4, п. 9.10], определяется по формуле:

$$E_{50} = \frac{q_{\max}}{2(\epsilon_1)_{50}}, \tag{5}$$

где  $q_{\max}$  – максимальный девиатор напряжений при разрушении образца, что соответствует  $q_f$  – условию прочности, сформулированному Кулоном. В ряде случаев испытание завершается при условии достижения 15%-ной вертикальной деформации, когда полноценное разрушение еще не достигнуто.

Существует другой метод определения модуля  $E_{50}$ , не описываемый российскими нормативными документами (рис. 4). Обработка результатов трехосного сжатия с помощью построения диаграммы в координатах  $(\epsilon_1, \epsilon_1/q)$  [14]. Такой метод позволяет получить не только значение для модуля  $E_{50}$ , но и значение  $R_f$ , а также асимптотическое значение девиатора  $q_a$ .

Различия определение модуля  $E_{50}$  двумя методами составляют 5% для ИГЭ-8 и 7% для ИГЭ-9.

Для корректного задания значения  $E_{ur}$  для расчета в модели HS испытания необходимо выполнить в области давлений до давления предуплотнения. Единой рекомендации по выбору точки разгрузки нет. В вопросе выбора диапазона точки разгрузки следует опираться исключительно на предполагаемые изменения давления в зависимости от решаемой задачи. Использование характеристики модуля разгрузки целесообразно для расчетов, связанных с устойчивостью стенок котлована и устойчивостью тоннелей метро. В общем случае, когда для решения конкретной задачи не требуется точное определение модуля разгрузки/повторного нагружения, можно использовать классическое соотношение для модели HS  $E_{ur} = 3 \times E_{50}$ .

Анализ результатов, представленных в работе Ю.В. Сигуты [15], наглядно показывает, что некорректно проводить определение модуля  $E_{50}$  и  $E_{ur}$  из одного испытания ввиду

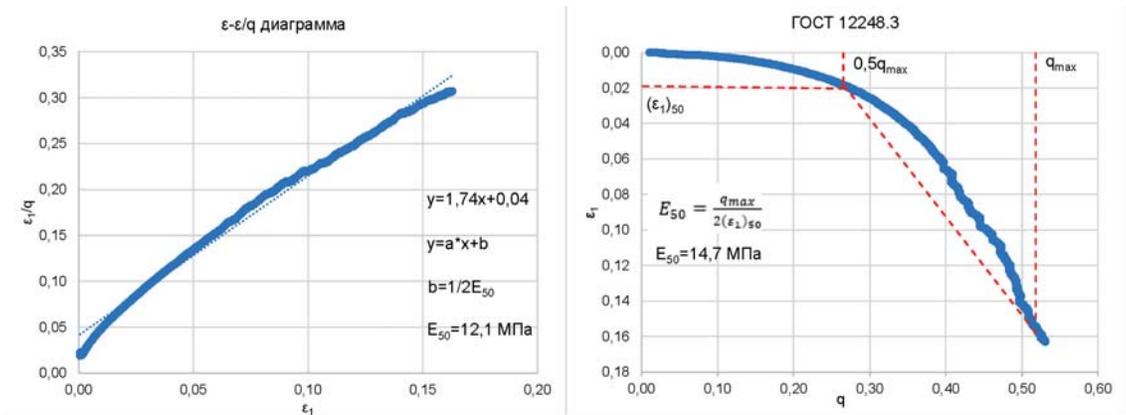


Рис. 4. Варианты определения модуля деформации  $E_{50}$   
 Fig. 4. Variants for determining the modulus of deformation  $E_{50}$

существенного различия в поведении грунта. Разница для значений модуля  $E_{50}$  составила более 10%.

Следующий важный параметр в модели HS – параметр  $m$ , который используется для описания зависимости параметров жесткости ( $E_{50}^{ref}$ ,  $E_{oed}$ ) от давления, может быть получен как при комплексной обработке результатов компрессионных испытаний, так и испытаний на трехосное сжатие (без разгрузки).

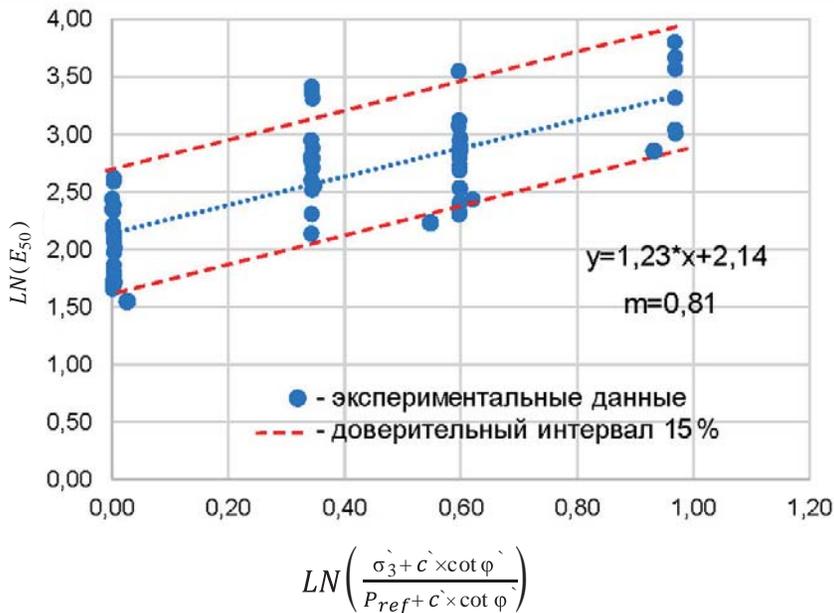
Для определения степенного параметра по результатам трехосных испытаний удобно строить график в координатах  $\left( \frac{\sigma_3 + c \cdot \cot \varphi}{P_{ref} + c \cdot \cot \varphi} \right) - LN(E_{50})$  (рис. 5).

Угловой коэффициент линейной аппроксимации будет соответствовать степенному коэффициенту  $m$ . В данном случае также рационально проводить статистическую обработку результатов и отбраковывать значения модуля деформации, не укладывающиеся в 30%-ную погрешность, в соответствии с ГОСТ 20522-2012 [10].

Для использования в расчетной модели параметр  $m$  так же, как и ведущий модуль жесткости, стоит выбирать исходя из решаемой задачи: ведущими процессами в массиве грунта является сжатие или сдвиг [16]. Различия параметра  $m$  для выделенных инженерно-геологических элементов приведены в табл. 2.

Параметры переуплотнения являются одними из самых важных параметров модели, так как позволяют описать начальные условия ненарушенного массива грунта, а именно, верно установить соотношение между действующими горизонтальными и вертикальными напряжениями.

Параметры переуплотнения в расчетной модели задаются двумя параметрами: POP – величина исторической нагрузки, OCR – коэффициент переуплотнения. Отличие использования двух этих параметров заключается в возможности изменения параметров переуплотнения по глубине. При использовании параметра OCR переуплотнение грунта считается постоянным по глубине, а при применении параметра POP коэффициент переуплотнения будет изменяться с глубиной. Существенно сказываться на результате это будет при увеличении мощности ИГЭ [17]. Лабораторные исследования по определению параметров переуплотнения



**Рис. 5.** Графический результат статистической обработки результатов испытаний трехосного сжатия для расчета значения параметра *m*  
**Fig. 5.** Graphical results of statistical processing of triaxial compression test results for calculating the value of parameter *m*

Таблица 2

**Значение параметра *m* по результатам обработки лабораторных испытаний**

Table 2

**Value of the parameter *m* based on laboratory test processing results**

№ инженерно-геологического элемента	ИГЭ-8	ИГЭ-9
Параметр <i>m</i> по результатам обработки испытаний методом компрессионного сжатия	0,76	0,86
Параметр <i>m</i> по результатам обработки испытаний методом трехосного сжатия	0,85	0,81

проводятся в соответствии с методикой по ГОСТ Р 58326-2018 [7] и не могут в полной мере отразить изменения определяемых параметров по глубине.

Следующим шагом после обработки лабораторных данных является процесс оптимизации полученных параметров модели грунта в программном комплексе Plaxis, в модуле Soil Test. При этом можно задавать диапазоны изменения параметров грунта на основе статистических данных. Оптимизация параметров модели – процесс корректировки результатов обработки лабораторных данных для наилучшего математического описания поведения грунта.

На этапе обработки лабораторных данных результаты должны учитывать качество проведенных испытаний, желательно для применения в последующем моделировании использовать образцы высокого качества. Оценку качества образцов можно проводить по изменению коэффициента пористости в соответствии с СТО 36554501-067-2021 [5].

Для выделенных инженерно-геологических элементов была проведена оптимизация параметров модели, полученных в результате обработки лабораторных данных. Результат оптимизации приведен в табл. 3.

Моделирование лабораторных испытаний в виртуальной лаборатории Soil Test и сравнение с лабораторными данными показывают хорошую сходимость результатов (рис. 6).

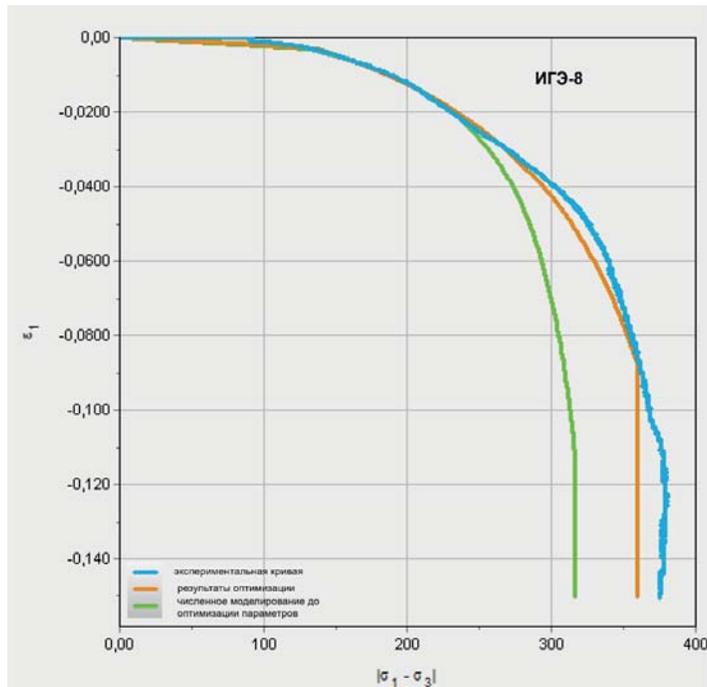
Таблица 3

**Параметры исследуемых грунтов для реализации расчетной модели HS в программном комплексе Plaxis и результаты оптимизации**

Table 3

**Parameters of studied soils for implementing the HS calculation model in Plaxis software suite and optimization results**

Параметры модели HS	Значение параметров модели по результатам лабораторных испытаний		Значение параметров модели после оптимизации параметров	
	ИГЭ-8	ИГЭ-9	ИГЭ-8	ИГЭ-9
$E_{50}^{ref}$ , кПа	10560	9110	7585	8019
$E_{ur}^{ref}$ , кПа	44 500	58 600	53 790	36 280
$m$ , д. е.	0,85	0,98	0,81	0,92
$c'$ , кПа	50	54	55,5	45,2
$\varphi'$ , град.	26	25	27	26



**Рис. 6.** Результаты оптимизации параметров модели HS в модуле Soil Test  
**Fig. 6.** Results of optimizing HS model parameters in the Soil Test module

## Заключение

В заключение следует подчеркнуть, что определение параметров модели грунта – ключевой этап в процессе проектирования и строительства. Это позволяет обеспечить надежность и безопасность конструкций, а также оптимизировать затраты на строительство.

В статье были рассмотрены основные методы определения параметров для реализации расчетной модели HS. Были обозначены дискуссионные вопросы, а также предложены возможные варианты получения параметров модели и их статистической обработки. Существующие стандарты не содержат прямых рекомендаций по постановке экспериментов и нуждаются в доработке для широкого использования. Поэтому для получения более точных результатов рекомендуется использовать комплексный подход, сочетающий различные методы и учитывающий особенности конкретного участка строительства. Такой подход позволит учесть все факторы, влияющие на поведение грунта, и обеспечит более надежные и обоснованные расчеты.

Параметры, необходимые для реализации расчетной модели, могут быть получены при проведении стандартных лабораторных испытаний с незначительными отклонениями от существующих нормативных документов. Однако наиболее важным аспектом является обработка полученных лабораторных данных, которая должна осуществляться специалистами в области геотехники, обладающими знаниями как в сфере механики грунтов, так и в проектировании.

На сегодня основными дискуссионными вопросами остаются методы статистической обработки полученных результатов. Статистическую обработку можно проводить на различных этапах для каждого определяемого параметра. В целом анализ результатов подбора параметров для реализации расчетной модели остается на экспертном уровне и не регулируется нормативными документами.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на разработку новых стандартов определения параметров модели грунта с учетом геологических особенностей. Данное исследование представляет собой важный шаг в направлении разработки точных и надежных методов определения параметров для расчетных моделей Hardening Soil.

## Список литературы

1. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. Влияние математической модели поведения грунта под нагрузкой на моделирование воздействия строительства метрополитена на окружающую застройку. Транспортное строительство. 2017;(10):12–15.
2. Меркулова А.Д., Зубарев В.С. Hardening Soil: практический опыт применения результатов инженерно-геотехнических изысканий. Метро и тоннели. 2021;(3):34–37.
3. Шарафутдинов Р.Ф., Исаев О.Н., Закатов Д.С. Анализ методов моделирования влияния проходки тоннеля на деформации грунтового массива. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023;(2):12–19.
4. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. Москва: Стандартинформ; 2020.
5. СТО 36554501-067-2021. Лабораторное определение параметров нелинейного механического поведения грунтов с объемным и двойным упрочнением. Москва: АО «НИЦ «Строительство»; 2021.
6. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. Москва: Стандартинформ; 2020.
7. ГОСТ Р 58326-2018. Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения. Москва: Стандартинформ; 2018.

8. *Тер-Мартиросян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю.* Методика определения параметров модели упрочняющегося грунта Hardening Soil. Москва: МИСИ – МГСУ; 2024.
9. *Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G.* The hardening soil model: Formulation and verification. In: *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Routledge; 2019, pp. 281–296. <https://doi.org/10.1201/9781315138206-27>
10. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Москва: Стандартинформ; 2013.
11. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. Москва: Недра; 1987.
12. *Wu J.T.H., Tung S.C.-Y.* Determination of Model Parameters for the Hardening Soil Model. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2020;7(1):55–68. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00085-8>
13. *Мирный А.Ю., Будожкина К.А., Шишкина В.В.* Статистический анализ параметров модели Hardening soil для грунтов Московского региона. *Геотехника*. 2017;(4):58–64.
14. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). *Engineering and Design: Settlement Analysis (EM 1110-1-1904)*. Washington, DC: Department of the Army, Office of the Chief Engineer; 1990.
15. *Сигута Ю.В.* Определение параметров для модели Hardening Soil: практика. ГеоИнфо [интернет]. 2020. Режим доступа: <https://geoinfo.ru/product/siguta-yurij-vasilevich/opredelenie-parametrov-dlya-modeli-hardening-soil-praktika-42444.shtml> [дата доступа: 19.09.24].
16. *Алексеев А.В., Иовлев Г.А.* Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(4):75–87. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87>
17. *Труфанов А.Н., Шулятьев О.А., Ростовцев А.В., Габсалимов Г.У.* Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт-Петербурга. *Инженерные изыскания*. 2014;(11):32–39.
18. *Мельников Р.В., Сагитова Р.Х.* Калибровка параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний в программе SoilTest. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2016;(3):79–83.
19. СП 22.13330.2016. Основание зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>
20. *Тер-Мартиросян А.З., Мирный А.Ю.* Анализ статистической изменчивости параметров модели Hardening Soil. В: *Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения*. Материалы науч.-практ. конф., Москва, 13–14 апреля 2017 г. Москва: Геомаркетинг; 2017, с. 192–197.

## References

1. *Konyukhov D.S., Kazachenko S.A.* The influence of a mathematical model of soil behavior under load on modeling the impact of subway construction on the surrounding buildings. *Transport construction*. 2017;(10):12–15. (In Russian).
2. *Merkulova A.D., Zubarev V.S.* Hardening Soil: practical experience in applying the results of geotechnical engineering surveys. *Metro i tonneli = Metro and tunnels*. 2021;(3):34–37. (In Russian).
3. *Sharafutdinov R.F., Isaev O.N., Zakatov D.S.* Analysis of methods for modeling the effect of tunnel tunneling on deformations of the soil massif. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2023;(2):12–19. (In Russian).
4. State Standard 12248.3-2020. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
5. STO 36554501-067-2021. Laboratory determination of parameters of nonlinear mechanical behavior of soils with volumetric and double hardening. Moscow: JSC Research Center of Construction; 2021. (In Russian).
6. State Standard 12248.4-2020. Soils. Determination of deformation parameters by compression testing. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
7. State Standard R 58326-2018. Soils. Laboratory method for determining the overconsolidation characteristics. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
8. *Ter-Martirosyan A.Z., Angelo G.O., Ermoshina L.Y.* Methodology for determining the parameters of the Hardening Soil model. Moscow: MISS – MGSU; 2024. (In Russian).
9. *Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G.* The hardening soil model: Formulation and verification. In: *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Routledge; 2019, pp. 281–296. <https://doi.org/10.1201/9781315138206-27>

10. State Standard 20522-2012. Soils. Methods of statistical treatment of test results. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. (In Russian).
11. Fadeev A.B. The finite element method in geomechanics. Moscow: Nedra Publ.; 1987. (In Russian).
12. Wu J.T.H., Tung S.C.-Y. Determination of Model Parameters for the Hardening Soil Model. Transportation Infrastructure Geotechnology. 2020;7(1):55–68. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00085-8>
13. Mirny A.Yu., Budoshkina K.A., Shishkina V.V. Statistical analysis of parameters of the Hardening soil model for soils of the Moscow region. Geotechnics. 2017;(4):58–64. (In Russian).
14. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Engineering and Design: Settlement Analysis (EM 1110-1-1904). Washington, DC: Department of the Army, Office of the Chief Engineer; 1990.
15. Siguta Yu.V. Determination of parameters for the Hardening Soil model: practice. GeolInfo [internet]. 2020. Available at: <https://geoinfo.ru/product/siguta-yurij-vasilevich/opredelenie-parametrov-dlya-modeli-hardening-soil-praktika-42444.shtml> (accessed: 19 September 2024). (In Russian).
16. Alekseev A.V., Iovlev G.A. Adjustment of hardening soil model to engineering geological conditions of Saint-Petersburg. Mining information and analytical bulletin. 2019;(4):75–87. (In Russian). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87>
17. Trufanov A.N. Shulyat'ev O.A., Rostovtsev A.V., Gabsalyamov G.U. Methods for determination of soil overconsolidation parameters and their practical use in the conditions of St. Petersburg. Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys. 2014;(11):32–39. (In Russian).
18. Melnikov R.V., Sagitova R.H. Calibration of the parameters of the Hardening Soil model based on the results of laboratory tests in the SoilTest program. Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN. 2016;(3):79–83. (In Russian).
19. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83\* [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>. (In Russian).
20. Ter-Martirosyan A.Z., Mirny A.Yu. Analysis of statistical variability of parameters of the Hardening Soil model. In: Engineering and geological problems of our time and methods of their solution. Materialy nauch.-prakt. konf., Moscow, 13–14 April 2017. Moscow: Geomarketing Publ.; 2017, pp. 192–197. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Анна Николаевна Малеева** , главный специалист лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты (№ 18), НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: [gruntlab18@gmail.com](mailto:gruntlab18@gmail.com)

**Anna N. Maleeva** , Chief Specialist, Laboratory of Mechanics of Hazardous Natural and Technogenic Processes and Development of Engineering Protection Methods (No. 18), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: [gruntlab18@gmail.com](mailto:gruntlab18@gmail.com)

**Андрей Игоревич Харичкин**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты (№ 18), НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ; Москва

e-mail: [andrei.kharichkin@gmail.ru](mailto:andrei.kharichkin@gmail.ru)

**Andrey I. Kharichkin**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Mechanics of Hazardous Natural and Technogenic Processes and Development of Engineering Protection Methods (No 18), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: [andrei.kharichkin@gmail.ru](mailto:andrei.kharichkin@gmail.ru)

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author