

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА  
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)  
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)  
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)  
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей  
международной научной конференции,  
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией  
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;  
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2018

*Редакционная коллегия:*

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ** [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА  
ДЛЯ РАСЧЁТА ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ПО МОДЕЛИ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ГРУНТА**

*В.В. Артемёнок, А.П. Кремнёв, Н.Н. Вишняков*  
Полоцкий государственный университет, Беларусь  
email: vika.artemenok2018@mail.ru

*Рассматривается проблема определения физико-механических характеристик грунта для расчета в программе Plaxis по модели упрочняющегося грунта (HardeningSoil). Описана методика определения всех характеристик. Были определены как стандартные характеристики, описанные в ГОСТ, так и дополнительные характеристики, методик определения которых в действующих нормативах нет.*

*Ключевые слова: расчётная модель, грунтовые основания, характеристики грунта, модель упрочняющегося грунта.*

**DETERMINATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL  
FOR THE CALCULATION OF FOUNDATIONS AND FOUNDATIONS ACCORDING  
TO THE MODEL OF HARDENING SOIL**

*V. Artemyonok, A. Kremnev, N. Vishnyakov*  
Polotsk State University, Belarus  
email: vika.artemenok2018@mail.ru

*The paper considers the problem of determining the physical and mechanical characteristics of the soil for calculation in the Plaxis program using the model of hardening soil. A technique for determining all characteristics is described. Both the standard characteristics described in the GOST and additional characteristics were determined, and there are no methods for determining them in the current standards.*

*Keywords: design model, soil bases, soil characteristics, model of hardening soil.*

В настоящее время для расчёта оснований фундаментов все больше применяются различные программные комплексы. Использование программных комплексов позволяет уменьшить трудоемкость расчетов и повысить их точность за счет более сложных расчетных моделей поведения грунта. Одним из таких широко применяемых комплексов является расчетный комплекс Plaxis. Он позволяет проводить широкий круг расчетов в области геотехники. Его особенностью является наличие различных моделей грунта, позволяющих с различной степенью адекватности описывать его работу. В PLAXIS есть возможность проводить расчёт в следующих моделях грунта: Мора-Кулона (Mohr-Coulomb (MC)), линейно-упругой (LinearElastic (LE)), упругопластической с упрочнением (HardeningSoil (HS)) и упругопластической с упрочнением при малых деформациях (HardeningSmallSoil (HSS)). При ручном счёте в основном используют модель Мора-Кулона, для которой необходимо 4 параметра, представленные в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры линейно-упругой идеально пластической модели Мора-Кулона

Символ	Название	Размерность
$E_0$	Модуль упругости	кН/м <sup>2</sup>
$\nu$	Число Пуассона	-
$C$	Сцепление	кН/м <sup>2</sup>
$\phi$	Угол внутреннего трения	град

Широкое использование модели Мора-Кулона обеспечивается, главным образом, за счет относительно небольшой сложности, что позволяет проводить расчеты в том числе и вручную [1]. Использование более сложных моделей грунта возможно только с использованием ЭВМ. Одной из таких моделей, все более часто применяемой, является упруго-пластическая модель HardeningSoil. Она представляет собой усовершенствованную модель поведения грунта под нагрузкой [1–3]. Особенность данной модели в том, что кроме определения стандартных характеристик грунта, используемой в классической модели Мора-Кулона, необходимо определение дополнительных характеристик (табл. 2).

Таблица 2. – Перечень параметров грунта для модели PLAXISHardeningSoil

Символ	Название	Единица измерения
$E_{50}$	Секущий модуль деформации	кН/м <sup>2</sup>
$G$	Модуль сдвига	
$K$	Модуль объёмной деформации	
$\nu$	Число Пуассона	-
$k_0$	Коэффициент бокового давления грунта	-
$p^{ref}$	Опорный уровень напряжений, $p^{ref} = 100$	кН/м <sup>2</sup>
$c$	Эффективное сцепление из трёхосных испытаний	
$\phi$	Эффективный угол внутреннего трения из трёхосных испытаний	град
$\psi$	Угол дилатансии	

Задачей данной работы было определение характеристик модели упрочняющегося грунта для песков мелких, отобранных на площадке строительства «МФК Газпром» в Минске.

Для решения поставленной задачи использовался автоматизированный испытательный комплекс АСИС [1]. Комплекс представляет собой совокупность устройств силового нагружения и управления давлением, приспособлений для испытаний образцов при различных видах напряжённого состояния, измерительной системы АСИС, а также программного обеспечения на базе ПЭВМ. При данных исследованиях использовались приборы одноплоскостного среза и стабилметр (прибор трёхосного сжатия) с автоматической системой нагружения и фиксацией перемещений.

Определение **угла внутреннего трения  $\phi$**  и **сцепления  $c$**  возможно методом одноплоскостного среза при трёх разных вертикальных нагрузках  $\sigma'_1$  или методом трёхосного сжатия при различных вертикальных  $\sigma'_1$  и ограничивающих давлениях  $\sigma'_3$ .

Определение упругих параметров **модулей упругости  $E$**  и **числа Пуассона** производилось при трехосных испытаниях в лаборатории. Пример графика, по которому определялись характеристики, представлен на рисунке 1.

Для расчета модуля упругости  $E_0$  для модели Мора – Кулона брался отрезок, составляющий 1/2...1/3 от напряжения разрушения.

Определение модуля сдвига  $G$ , модуля объёмной деформации  $K$  и секущего модуля деформации осуществляется по данным испытаний грунта в условиях трёхосного сжатия по формулам:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1 + 2\nu)} \quad (2)$$

$$E_{50} = \frac{(\sigma'_1)_{50} - \sigma'_{1c}}{(\epsilon_1)_{50}} \quad (3)$$

где  $\sigma'_{1c}$  – напряжение в конце этапа уплотнения;  
 $(\epsilon_1)_{50}$  – значение  $\epsilon_1$  при  $(\sigma'_1)_{50}$ .

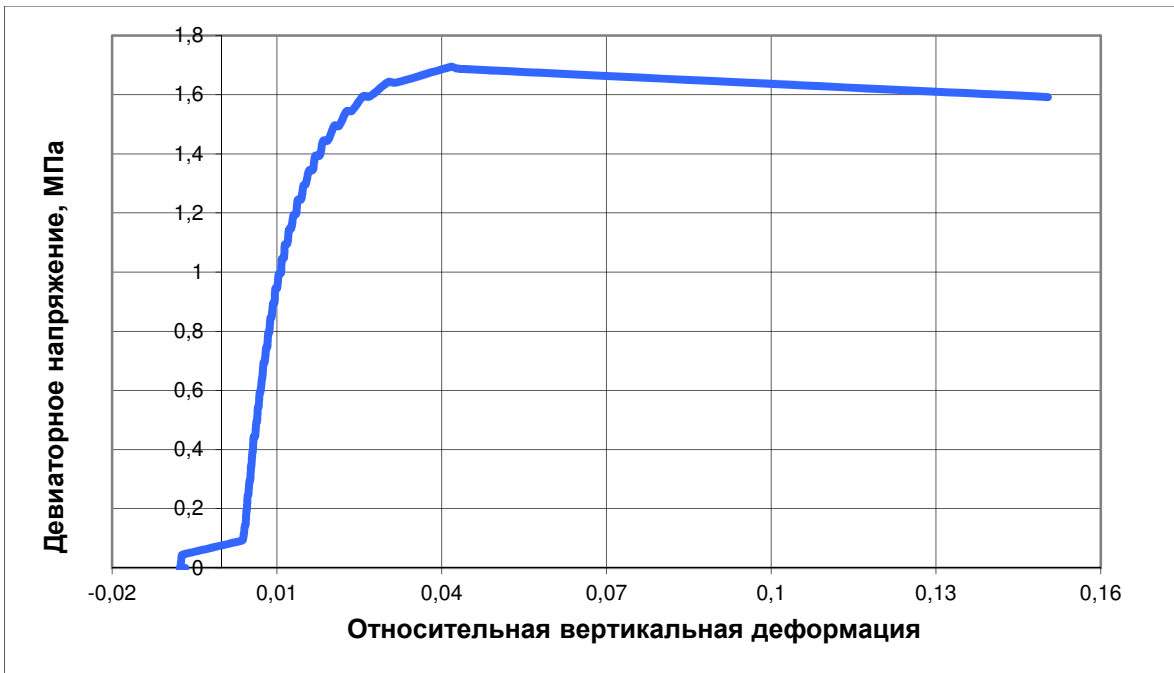


Рисунок 1. – Зависимость девиаторного напряжения от относительной вертикальной деформации

Число Пуассона определяется в результате непосредственного измерения продольных и поперечных деформаций по формуле

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \epsilon_1} \right). \tag{4}$$

Для этого строится график зависимости относительных вертикальных деформаций от относительных объёмных деформаций (рис. 2).

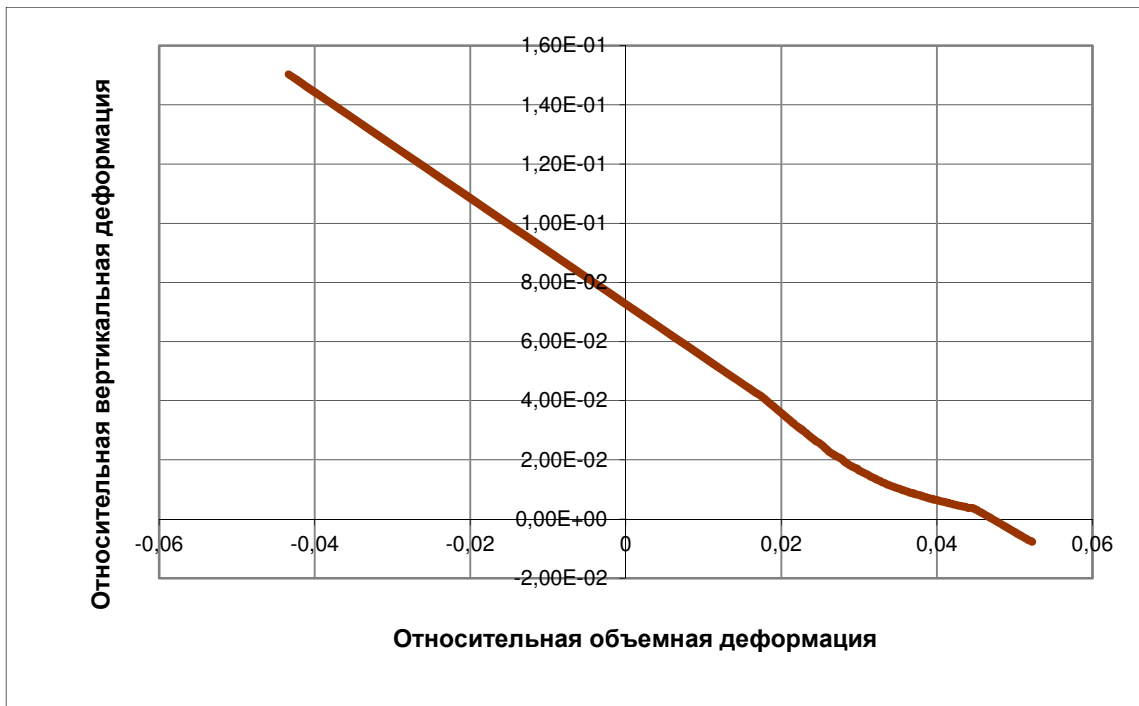


Рисунок 2. – Зависимость относительных вертикальных деформаций от относительных объёмных деформаций

Коэффициент бокового давления  $K_0$  определяется как отношение горизонтального напряжения  $\sigma'_h$  к действующему вертикальному напряжению  $\sigma'_v$  ( $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$ ) при отсутствии боковых деформаций ( $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ ). Коэффициент бокового давления отражает мгновенное напряженно-деформированное состояние массива, и многократно меняется в геологическое время, при седиментации и нормальной консолидации является постоянной величиной, при увеличении вертикальных напряжений (наступление ледников, застройка)  $K_0$  – уменьшается, при разгрузке (отступлении ледников, эрозии, экскавации грунта)  $K_0$  – увеличивается.

Касаемо угла дилатансии  $\Psi$ , действующих нормативных документов по его определению в Беларуси на данный момент нет. Поэтому для его определения использовалось предложение M.D. Bolton [5] для условий плоской деформации по формуле (5), для этого строится график зависимости деформации сдвига от вертикальной деформации (рис. 3).

$$\operatorname{tg} \Psi_m = \frac{d\varepsilon_1}{d\gamma} \quad (5)$$

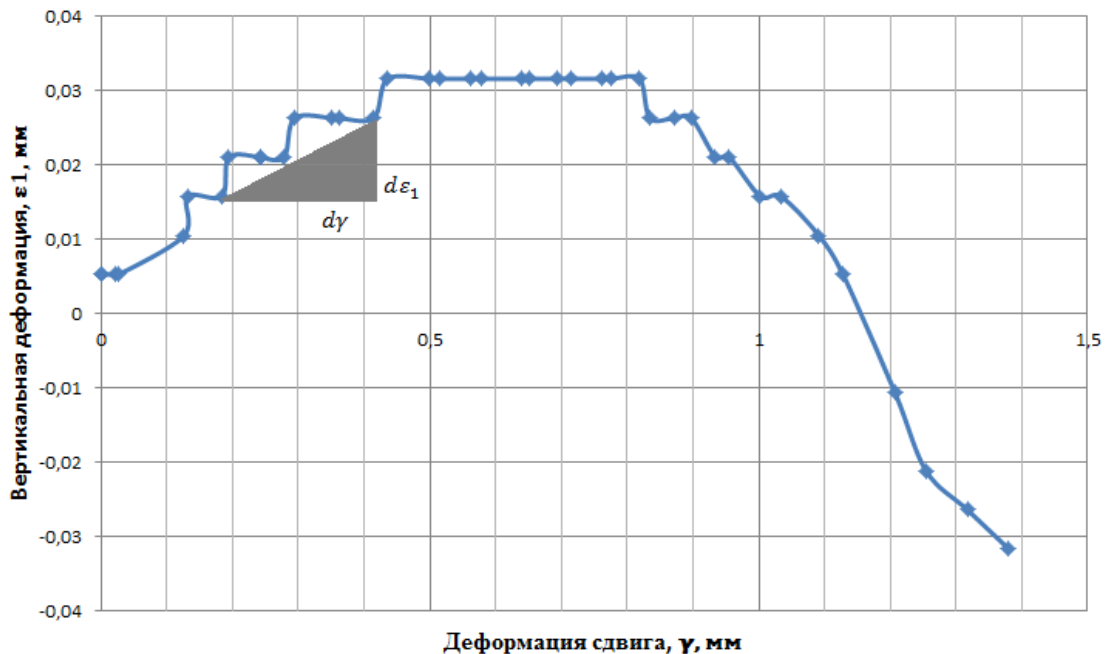


Рисунок 3. – Зависимость деформации сдвига от вертикальной деформации

На графике выбирается участок, для которого определяется угол дилатансии, и по формуле (5) находится искомый угол. Для данного участка угол дилатансии равен  $2,6^\circ$ .

По результатам проведенной работы были определены характеристики, необходимые для расчёта оснований и фундаментов в программном комплексе PLAXIS по модели упрочняющегося грунта. Кроме стандартно описанных в ГОСТ 12248 были определены дополнительные характеристики, которых в нормативах нет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. PLAXIS, 2D Version 8 [Electronic resource] / Brinkgreve R.B.J. [et al.]. – Balkema, 1997. – 200 p. – Mode of access: <http://www.plaxis.nl/index.php?cat=manuals&mouse=Plaxis%20V8>.

2. Schanz, T. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien / T. Schanz // Mitt. Inst. für Geotechnik 45. Universität Stuttgart. – Stuttgart, 1998. – 152 s.
3. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The HardeningSoil Model: Formulation and verification [Electronic resource] / T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – Balkema, Rotterdam, 1999. – P. 281–290. – Mode of access: <http://www.unistuttgart.de/igs/content/publications/40.pdf>.
4. Артемёнок, В.В. Влияние анизотропии на прочностные характеристики грунта при испытании в приборе одноплоскостного среза [Электронный ресурс] / В.В. Артемёнок [и др.] // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкий государственный университет. Сер. Прикладные науки. Строительство. – 2017. – Вып. 19 (89). – С. 172–174. – Электронный оптический диск – 1 CD-ROM.
5. Vermeer, P.A. Nonassociated plasticity for soils, concrete and rock / P.A. Vermeer, R. De Borst // Heron. – 1984. – № 29 (3). – 62 p.