



ОПИСАНИЕ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ NGI-ADP

МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к. т. н., г. Москва, Россия
info@indep-geo.ru

МОСИНА А.С.

Научный сотрудник лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН, заместитель генерального директора ООО «Независимая геотехника», к. г.-м. н., г. Москва, Россия
Mosina.A.S@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Издательство журнала «Геоинфо» подготовило к печати и передало в типографию книгу «Математические модели грунтов для инженеров» (авторы – А.Ю. Мирный и А.С. Мосина), объемом более 400 страниц. Эта монография, задуманная в первую очередь как практический справочник, содержит в себе необходимую теоретическую информацию по теории упругости, пластичности и ползучести, а также сведения о более чем 30 моделях, реализованных в наиболее популярных геотехнических расчетных комплексах, об их областях применения и методиках определения параметров. На эту книгу получены положительные рецензии профессоров Г.Г. Болдырева и А.Г. Шашкина. Приобрести данное издание можно будет уже в октябре 2024 года, отправив заявку на адрес электронной почты sale@indep-geo.ru. С актуальным содержанием данной монографии можно ознакомиться по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/X-INTOKrwOC2-A>.

Чтобы дать читателям представление о стиле изложения и содержании этой книги, мы, с согласия авторов, решили опубликовать фрагменты из нее в серии статей. В данной статье описывается модель NGI-ADP.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

устойчивость сооружений; природные грунты; слабые неконсолидированные грунты; слабые водонасыщенные грунты; моделирование; модель NGI-ADP; анизотропные условия прочности; анизотропный закон упрочнения; трехосное сжатие; трехосное растяжение; простой сдвиг; трехосное сжатие с растяжением; испытания.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Мосина А.С. // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 9. С. 40–43.
 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-9-40-43.

DESCRIPTION AND PARAMETERS OF THE NGI-ADP MODEL

MIRNYY A.Yu.

Associate professor at the Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, the head of "Independent Geotechnics" LLC, PhD, Moscow, Russia
info@indep-geo.ru

MOSINA A.S.

Researcher at the Laboratory for Studying the Composition and Properties of Soils, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science; the deputy general director of "Independent Geotechnic" LLC, PhD, Moscow, Russia
Mosina.A.S@yandex.ru

ABSTRACT

The publishing house of the "GeoInfo" journal has prepared for printing the book "Mathematical models of grounds for engineers" (by A.Yu. Mirnyy and A.S. Mosina) with a volume of more than 400 pages and handed it over to a printing house. This monograph, (which was conceived primarily as a practical reference book) contains the necessary theoretical information on the theory of elasticity, plasticity and creep, as well as the information about more than 30 models implemented in the most popular geotechnical computational softwares, about their fields of application and methods for determining parameters. This book received positive reviews from professors G.G. Boldyrev and A.G. Shashkin. You will be able to purchase the book in October 2024 by sending an application to the next email address: sale@indep-geo.ru. The current contents of this monograph can be found at the next web link: <https://disk.yandex.ru/d/X-IHTOKrwOC2-A>.

To provide insight into the style of presentation and the content of the book for the readers, we decided to publish some fragments from it (with the consent of the authors) in a series of articles. This article describes the NGI-ADP model.

KEYWORDS:

stability of structures; natural soils; soft unconsolidated soils; soft water-saturated soils; modeling; NGI-ADP model; anisotropic strength conditions; anisotropic hardening law; triaxial compression; triaxial extension; simple shear; triaxial compression with extension; tests.

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Mosina A.S. Opisaniye i parametry modeli NGI-ADP [Description and parameters of the NGI-ADP model] // GeoInfo. 2024. Vol. 6. № 9. S. 40–43. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-9-40-43 (in Rus.).

В некоторых случаях игнорировать физическую анизотропию природных грунтов при моделировании невозможно. В первую очередь это касается массивов пылевато-глинистых грунтов, сам процесс отложения которых подразумевает формирование частого переслаивания грунтов разного состава. Для решения подобных задач была разработана упругопластическая модель со сдвиговым упрочнением NGI-ADP.

Название модели раскрывается как Norwegian Geotechnical Institute Active, Direct simple shear and Passive modes of loading. Это означает, что модель учитывает влияние различных траекторий нагружения на величину сопротивления недренированному сдвигу. Примененный авторами модели подход позволяет достаточно прямолинейно решить известную задачу. Если рассмотреть основание некоторого сооружения в состоянии предельного равновесия (рис. 1), то окажется, что на трех условных участках линии скольжения грунт

находится в различных напряженных состояниях: под сооружением – трехосное сжатие, на горизонтальном участке – простой сдвиг, а вне сооружения, в зоне выпора, – трехосное сжатие с растяжением. Из экспериментов известно, что сопротивление сдвигу в каждом из этих трех случаев будет различным. Следовательно, необходимо либо разделить массив на три области и использовать в каждой свои параметры прочности (что на практике крайне неудобно), либо использовать для всего массива модель с анизотропным условием прочности. Последнее позволит при расчете автоматически применять корректные параметры сопротивления сдвигу в различных частях массива в зависимости от вида напряженного состояния.

Как следует из названия, модель является результатом работы сотрудников Норвежского геотехнического института [1], опирающимся на исследования таких ученых, как Л. Бьеррум, А. Шифилд и Ч. Лэдд (L. Bjerrum, A. Schofield, Ch. Ladd). Модель предназначена

для решения задач устойчивости сооружений на основаниях, сложенных слабыми неконсолированными грунтами, в которых внутреннее трение не оказывает существенного влияния на сопротивление сдвигу.

В основе модели лежит условие прочности Треска, представляющее собой правильную шестиугольную призму, ось которой совпадает с гидростатической осью. Для учета физической анизотропии ось призмы смещается по одной из координат (как это происходило бы при кинематическом упрочнении). Фактический размер и положение поверхности прочности определяются по значениям сопротивления недренированному сдвигу при различных траекториях нагружения: при трехосном сжатии (ТХС) – s_u^C ; при трехосном растяжении (ТХР) – s_u^E ; при активном нагружении в условиях плоской деформации (PSA) – s_u^A ; при пассивном нагружении в условиях плоской деформации (PSA) – s_u^P . В результате поверхность прочности оказыва-

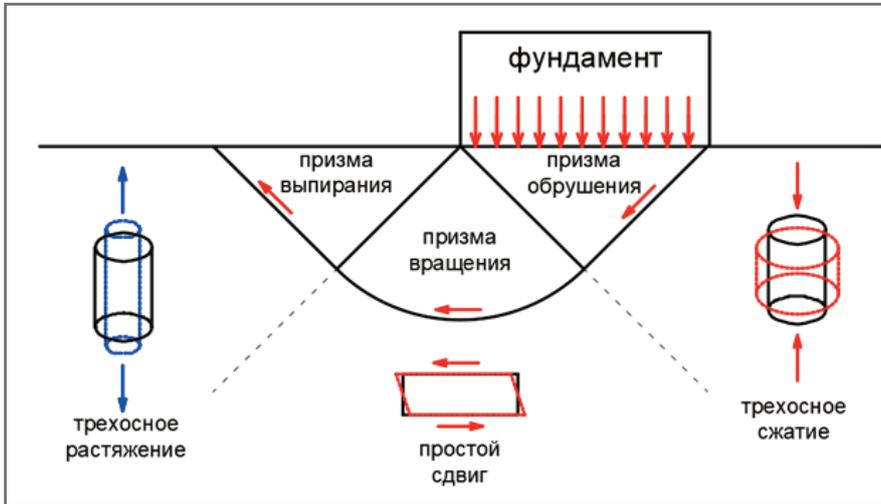


Рис. 1. Условное разделение грунтового основания в предельном состоянии на зоны по видам напряженного состояния

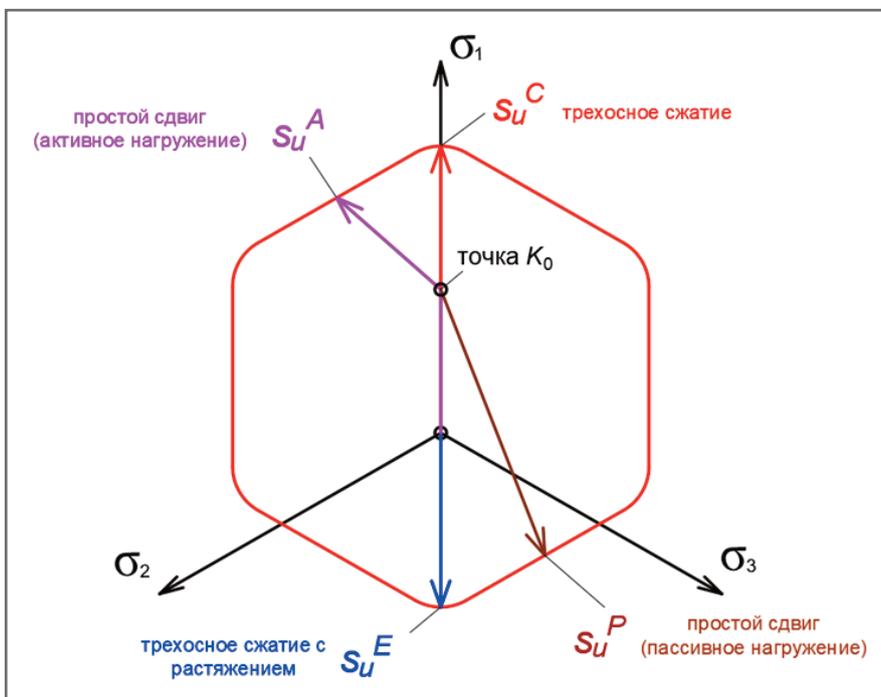


Рис. 2. Девиаторное сечение поверхности текучести в модели NGI-ADP, траектории нагружения при различных испытаниях

ется смещенной относительно гидростатической оси (рис. 2).

Точкой, из которой берут начало все траектории, ведущие к разрушению, является точка, соответствующая бытовому напряженному состоянию и принадлежащая линии K_0 . С учетом того что в природном напряженном состоянии вертикальные и горизонтальные напряжения не равны друг другу, в этой точке девиатор напряжений также не равен нулю. В качестве входного параметра модель использует величину начальных касательных напряжений $\tau_0 = 0,5(\sigma'_z - \sigma'_x)$.

Чтобы избежать необходимости применения правила Койтера, модель использует инвариантную форму записи

условия прочности Треска [2] и потенциал пластичности по Мизесу, чтобы «скруглить» ребра призмы и таким образом обеспечить дифференцируемость в каждой точке поверхности текучести. Для этого в функцию текучести вводится дополнительное слагаемое.

С учетом того что модель изначально предназначена для моделирования недренажного режима нагружения, материал предполагается абсолютно несжимаемым в объеме (это задается путем принятия $\nu=0,5$). Следовательно, величина сопротивления недренажному сдвигу не зависит от уровня средних напряжений и призма не ограничена с торцов. Упругая жесткость

при сдвиге задается с помощью упругого модуля сдвига G_{up} .

Все параметры модели вводятся не в абсолютных величинах, а как отношение к величине сопротивления недренажному сдвигу при активном нагружении в условиях плоской деформации s_u^A , которая, в свою очередь, может быть задана как функция глубины отбора (известно, что сопротивление недренажному сдвигу с глубиной возрастает). Таким образом, модель может использоваться для воспроизведения поведения элементов достаточно большой мощности без необходимости разделять толщу на отдельные РГЭ.

Модель использует неассоциированный закон пластического течения и при этом учитывает сдвиговое упрочнение. Разработчиками модели отмечается, что изменение траектории нагружения и вида напряженного состояния влияет и на характер упрочнения. В связи с этим модель в качестве входных параметров требует ввода значения деформации сдвига при разрушении для каждой из трех траекторий.

С учетом того что прибор плоской деформации практически недоступен для проведения серийных испытаний, для упрощения практического применения модели ее параметры приведены к более привычным и распространенным методам. Входные параметры определяются по результатам испытаний образцов-близнецов в трех различных напряженных состояниях: при трехосном сжатии ($b=0$; $\theta=0^\circ$), трехосном растяжении ($b=1$; $\theta=60^\circ$) и простом сдвиге ($b=0,5$; $\theta=30^\circ$). Отношение между сопротивлением недренажному сдвигу при трехосном сжатии и в приборе плоской деформации принимается равным 0,99, что позволяет легко определить все остальные величины. Отметим, что для отечественной лаборатории это не снимает всех трудностей, так как приборы простого сдвига в РФ не используются, а трехосное сжатие с растяжением можно выполнить только в камерах трехосного сжатия типа Б по специальной схеме. Тем не менее даже при отсутствии специализированного оборудования можно оценить значения параметров по опубликованным соотношениям между ними, хотя полученный расчет допустимо использовать только в качестве предварительного.

Модель использует анизотропный закон упрочнения, то есть упрочнение будет определяться траекторией нагружения. Этот закон задается с помощью

Таблица. Параметры модели NGI-ADP и методы их определения

Параметр	Ед. изм.	Значение	Метод определения
$s_{u\ ref}^A$	кПа	Характеризует сопротивление недренированному сдвигу в условиях активного нагружения в приборе плоской деформации на некоторой известной глубине	Прибор плоской деформации (простого сдвига). Допускается косвенное определение на основании соотношения $s_u^C/s_{u\ ref}^A=0,99$
$s_u^C/s_{u\ ref}^A$	-	Позволяет изменять величину s_u^C в зависимости от $s_{u\ ref}^A$	Расчетом по результатам непосредственных испытаний (по литературным данным составляет 0,97–0,99)
$s_u^P/s_{u\ ref}^A$ ¹	-	Позволяет изменять величину s_u^P в зависимости от $s_{u\ ref}^A$	Расчетом по результатам непосредственных испытаний
$s_u^{DSS}/s_{u\ ref}^A$	-	Позволяет изменять величину s_u^{DSS} в зависимости от $s_{u\ ref}^A$	Расчетом по результатам непосредственных испытаний
$\tau_0/s_{u\ ref}^A$	-	Позволяет изменять величину τ_0 в зависимости от $s_{u\ ref}^A$	Расчетом на основании природного НДС
γ_{ref}	м	Глубина, для которой определены все параметры и соотношения между ними	На основании глубины отбора образца
$s_{u\ inc}^A$	кПа/м	Описывает увеличение сопротивления сдвигу с глубиной. Если задана равной нулю, то сопротивление сдвигу – постоянная величина	На основании испытаний образцов с различных глубин либо по данным зондирования
$G_w/s_{u\ ref}^A$	-	Позволяет изменять величину G_w в зависимости от $s_{u\ ref}^A$	На основании испытаний в приборах трехосного сжатия или простого сдвига
γ_f^C	-	Определяет предел сдвигового упрочнения при трехосном сжатии	На основании непосредственных испытаний
γ_f^E	-	Определяет предел сдвигового упрочнения при трехосном сжатии с растяжением	На основании непосредственных испытаний
γ_f^{DSS}	-	Определяет предел сдвигового упрочнения при простом сдвиге	На основании непосредственных испытаний

¹ Авторы указывают, что испытания в приборе плоской деформации не требуются, однако su^P определяется только в нем. По всей видимости, при пассивном нагружении также выполняется соотношение $su^E/su^P = 0,99$.

значений предельной деформации при разных напряженных состояниях. Более подробно ознакомиться с аналитическим обоснованием модели, а также с некоторыми частными результатами определения параметров можно в оригинальной публикации [1].

Несмотря на кажущуюся громоздкость списка параметров, для обоснова-

ния модели требуется всего три различных опыта:

- испытание на трехосное сжатие в режиме НН в полном соответствии с ГОСТ 12248.3;
- испытание на простой сдвиг в режиме НН в полном соответствии с ГОСТ Р 71042-2023;

Данная модель является одной из

наиболее детализированных моделей, позволяющих выполнять расчеты устойчивости оснований, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, и могла бы успешно применяться при проектировании инженерных сооружений на шельфе, в припортовых зонах, в транспортном строительстве и т.п. 

Список литературы ▶

1. Grimstad G., Andresen L., Jostad H.P. NGI-ADP: anisotropic shear strength model for clay // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2010. Vol. 36. P. 483–497.
2. Billington E.W. Generalized isotropic yield criterion for incompressible materials // Acta Mechanica. 1988. Vol. 72. P. 1–20.
3. Мирный А.Ю., Лузин И.Н., Рахматуллина Е.В. Метод определения прочности на растяжение связных грунтов и его применение в геотехнических расчетах // Геотехника. 2016. № 3. С. 24–30.