

Оценка предельного равновесия склона

¹**ЖАКУЛИН Адил Султанович**, д.т.н., профессор, adilzhakulin@mail.ru,
^{1*}**ЖАКУЛИНА Айсулу Адилевна**, к.т.н., доцент, aisuluzh@mail.ru,
¹**КРОПАЧЕВ Пётр Александрович**, к.т.н., доцент, kropachev-54@mail.ru,
¹**ИМАНОВ Едиль Куттыбаевич**, магистр, зав. кафедрой, e.imanov91@mail.ru,
¹**ХАН Максим Александрович**, магистр, старший преподаватель, han_maks@mail.ru,
¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,
*автор-корреспондент.

Аннотация. Рассматриваются востребованные практикой вопросы повышения эффективности строительства на просадочных грунтах, имеющих неустойчивую физико-механическую форму. В связи с тем, что для решения этой задачи оказалось недостаточно традиционных экспериментально-теоретических способов и методов расчета, потребовалась разработка совершенно новых методических инструментов. Разработан новый метод расчета устойчивости откоса без введения формы поверхности обрушения. В основе данного метода расчета лежит использование уравнений механики деформирования весомого грунтового массива с различными вариантами учета условий предельного равновесия. При этом традиционный путь решения указанной задачи развит с явным учетом в деформационной теории пластичности условия предельного равновесия в форме Кулона-Мора. В качестве общего методического средства для определения описывающих поведение геотехнической системы «сооружение – грунт» параметров принят метод конечных элементов. Анализ результатов численного решения при моделировании взаимодействия склона и подпорной стены показал, что наиболее опасным является обусловленное сдвиговыми деформациями развитие максимальных горизонтальных перемещений у подпорных стен.

Ключевые слова: просадочные грунты, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, геометрическая нелинейность, подпорная стена, устойчивость откоса, численные методы.

Введение

В начале февраля 2024 года в микрорайоне Тау-Самал Медеуского района г. Алматы сошел оползень объемом 3200 кубометров. Основная причина оползня – переувлажнение грунта техногенного характера. В этом же районе были оползни в 2021 и 2020 годах. Самый крупный оползень объемом 7200 кубометров произошел в 2020 году. Причиной схода этого оползня стали повышенные осадки и, как следствие, переувлажнение грунта. При норме 0,4 м оно составило в данном случае до 1 м. Ежегодно в весенний период в предгорных и горных районах Алматы происходит в среднем пять сходов оползней. Оползневые явления обусловлены главным образом подмывом склонов, их переувлажнением.

Актуальность задачи состоит в том, что при возрастании влажности просадочного грунта полностью нарушается его природная структура и возникает неизвестное напряженное состояние. В просадочных

лессовых грунтах при полном или частичном водонасыщении происходит обрушение массива откоса склона, которое обусловлено значительным ухудшением расчетных параметров: сцепления, угла внутреннего трения, модуля деформации. Неизвестное напряженно-деформированное состояние при изменении природной влажности склона гор, сложенного просадочными грунтами, является главным фактором, который достаточно часто приводит к потере устойчивости и оползню склона.

Просадочные грунты на территории Казахстана распространены в предгорных районах Юга и Востока. Указанные грунты достигают значительной мощности – до 40,0 м и проявляют просадку под собственным весом при замачивании. В условиях водонасыщения они очень ярко проявляют свойства дилатансии (разжижения) и оползня. Кроме того, по данным исследований ученых-геологов, в предгорных районах Юга Казахстана отмечены такие опасные физико-геоло-

гические явления, как плоскостной срыв, оврагообразование, просадочность, сейсмичность [1, 2].

Инженерно-геологические условия

Рассматриваемая для оценки напряженно-деформированного состояния склона откоса площадка расположена в Алматинской области, у подножия гор Алатау. Абсолютные отметки поверхности земли колеблются здесь в пределах от 916,0 м до 985,835 м, что составляет перепад величиной 69,835 м. В геолого-литологическом строении принимают участие нижнечетвертичные эоловые отложения, которые представлены лессовидными просадочными суглинками (Q_I), а также верхнечетвертичные аллювиально-пролювиальные отложения ($арQ_{III}$) в виде галечниковых грунтов, перекрытых суглинками и современным почвенно-растительным слоем (Q_{IV}). Суглинки (Q_I) буровато-серого цвета, до глубины 21,0 м просадочные, ниже – непросадочные. Суглинки (Q_I) вскрыты до глубины 40,0 м [1]. Галечниковые грунты характеризуются следующим содержанием фракций: валунов – до 15%, гальки – 50-55%, гравия – 10-15%, заполнителя – 15-20%.

Для анализа напряженно-деформированного состояния откоса разработана упруго-пластическая модель на основе решения геометрической нелинейной связанной задачи теории пластичности. Задача позволяет оценить напряженно-деформированное состояние естественных склонов, которое учитывает перераспределение напряжений в грунтовом массиве. На площадке откосы сложены суглинистыми грунтами от твердой до тугопластичной консистенции, карбонатизированные, до глубины 15,5-21,0 м – просадочные. Грунтовые воды до 40,0 м не вскрыты. При этом по результатам лабораторных испытаний выявлены следующие характеристики для суглинков: плотность – 15-16 кН/м³, коэффициент пористости – $e > 0,9$. Согласно результатам компрессионных испытаний, суглинки при замачивании проявляют просадочные свойства. При этом значительно ухудшаются прочностные свойства грунтов – до 50%. Начальное просадочное давление изменяется от 0,028 МПа до 0,361 МПа (0,112). Коэффициент относительной просадочности при удельном давлении 0,05 МПа колеблется в пределах 0,001 до 0,056 (0,014). При удельном давлении 0,1 МПа он составляет 0,001-0,064 (0,023). При удельном давлении 0,2 МПа – 0,001-0,105 (0,046), при удельном давлении 0,3 МПа – 0,019-0,113 (0,059). Расчеты показывают, что величина суммарной просадки составляет 8,8-73,51 см. При этом тип грунтовых

условий по просадочности – второй.

Результаты решения задачи

Расчет подпорной стены проведем, используя решения теории предельного состояния сыпучей среды (численные методы). Метод конечных элементов (МКЭ) использован с применением прикладной программы PLAXIS [2, 5, 7, 10]. При оценке напряженно-деформированного состояния откоса склона в условиях взаимодействия с подпорными стенами рассматривалось поведение просадочных грунтов. Рассмотрена плоская задача в упругопластической постановке с использованием для среды модели Кулона-Прандтля, предполагающая упругое поведение среды при напряжениях ниже предела текучести и равнообъемное (с нулевой дилатансией) пластическое течение при напряжениях на пределе текучести. Упруго-пластическое решение реализовано с помощью МКЭ и достигается известным методом «начальных напряжений» с использованием итерационной процедуры Ньютона-Рафсона с неизменной матрицей жесткости, но с переменным вектором нагрузок, пополняемым в ходе итерационного процесса «начальными силами» в пластических элементах. Погрешность в результате расчета с использованием МКЭ складывалась из погрешности дискретизации, обусловленной заменой тела, обладающего бесконечным числом степеней свободы, моделью с конечным числом степеней свободы, и погрешности округления чисел при выполнении вычислительных операций на ЭВМ [3-7].

Исследованию подлежало напряженно-деформированное состояние откоса, сложенного просадочными грунтами при изменении влажности от 15 до 30% от первоначальной влажности под действием собственного веса грунтового откоса (силы тяжести). Расчетная схема с конечно-элементной сеткой и указанием слоев напластования представлена на рисунке 1.

Модель состоит из трех основных слоев грунтового массива для расчета: слой 1 – просадочные грунты склона, толщиной до 40 м, слой 2 – суглинки твердые, плотные коренной породы и слой 3 – скальные породы. Для решения задачи используется МКЭ. Математическая постановка задачи будет базироваться на основе модели Мора-Кулона. Ниже приведена таблица физических параметров, которые понадобятся в решении проблемы.

Рассмотрен откос с углом наклона 60°.

Удельный вес грунта примем равным $\gamma = 16,5$ кН/м³.

Данная массовая нагрузка приводит к возникновению области пластической де-

формации и области локализации, которые показаны на рисунке 1 (слой 1). Состояние откоса в этом случае можно назвать близким к предельному.

При этом откос можно считать устойчивым, так как обе эти области выходят только одним краем на поверхность откоса.

Результаты решенной плоской задачи приведены на рисунках 2-4.

Численным анализом поставленной задачи получены:

- развитие горизонтальных и общих перемещений;
- вертикальные общие напряжения;
- развитие пластических касательных напряжений;
- искажение конечно-элементной сетки после водонасыщения.

Под коэффициентом запаса устойчивости будем понимать отношение удельного веса, при котором зона локализации выходит другой стороной на поверхность откоса, к реальному удельному весу.

Также получены:

- искажение конечно-элементной сетки;

- горизонтальные и общие деформации склона при изменении расчетных характеристик прочностных характеристик просадочных грунтов;

- изолинии максимальных горизонтальных (сдвиговых) напряжений и общих (полных) напряжений при изменении напряженно-деформированного состояния откоса на подпорную стену.

Прочностные свойства интерфейсов связаны с прочностными свойствами слоя грунта. Каждый набор данных имеет свой коэффициент понижения.

При этом область локального разрушения в целом соответствует объемному весу $\gamma = 16,5 \text{ кН/м}^3$, а состояние откоса в данном случае можно считать устойчивым. Показано, как в результате дополнительной массовой нагрузки (вследствие увлажнения на 30%) область локализации пластической деформации распространяется в откосе и выходит на вторую поверхность с двух сторон. В данном случае, откос является неустойчивым, и происходит его обрушение.

Получены картины горизонтальных и

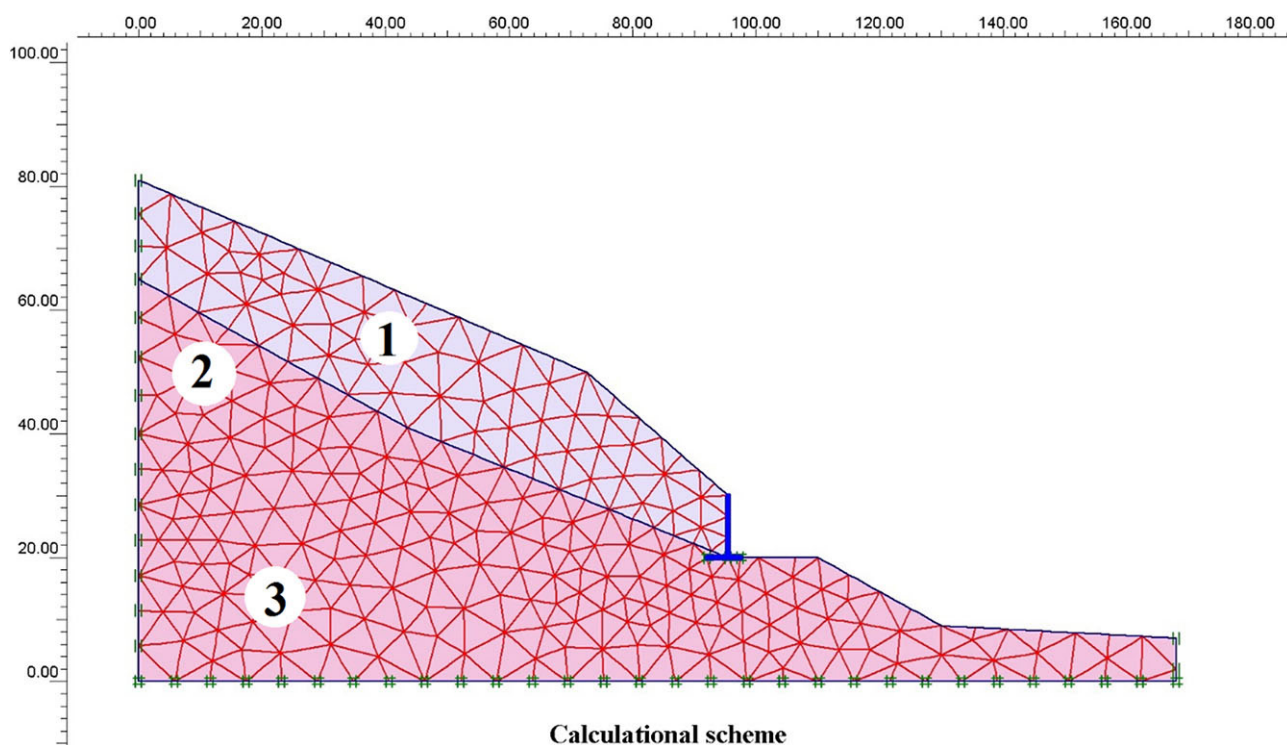


Рисунок 1 – Расчетная схема с конечно-элементной сеткой по слоям напластования

Характеристики грунтов, принятые при расчетах МКЭ

Наименование слоя	E , МПа	ν	γ , кН/м ³	α_{cs} , град	e_0	λ	k
Просадочные суглинки	5,0	0,40	16,5	26	0,60	0,312	0,100

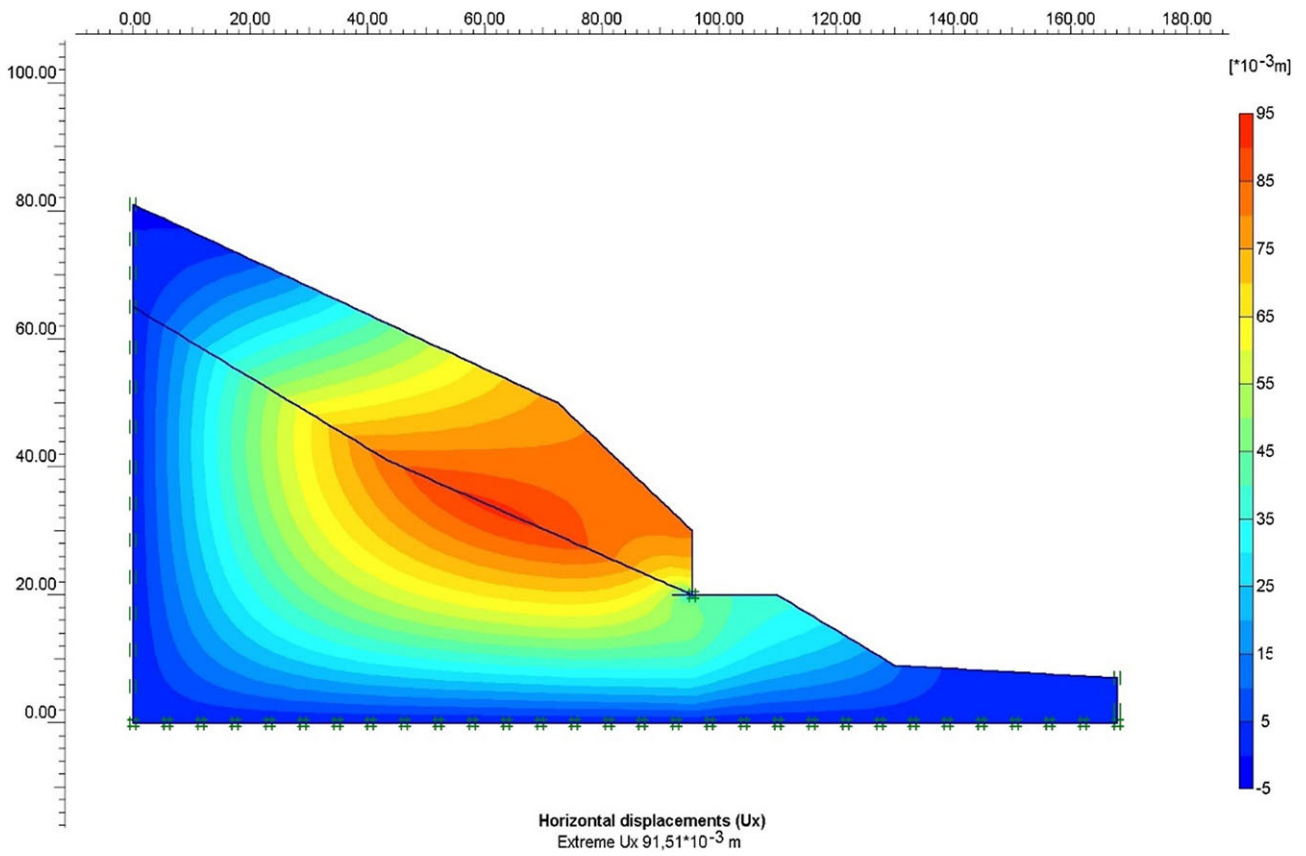


Рисунок 2 – Области локализации пластических горизонтальных перемещений

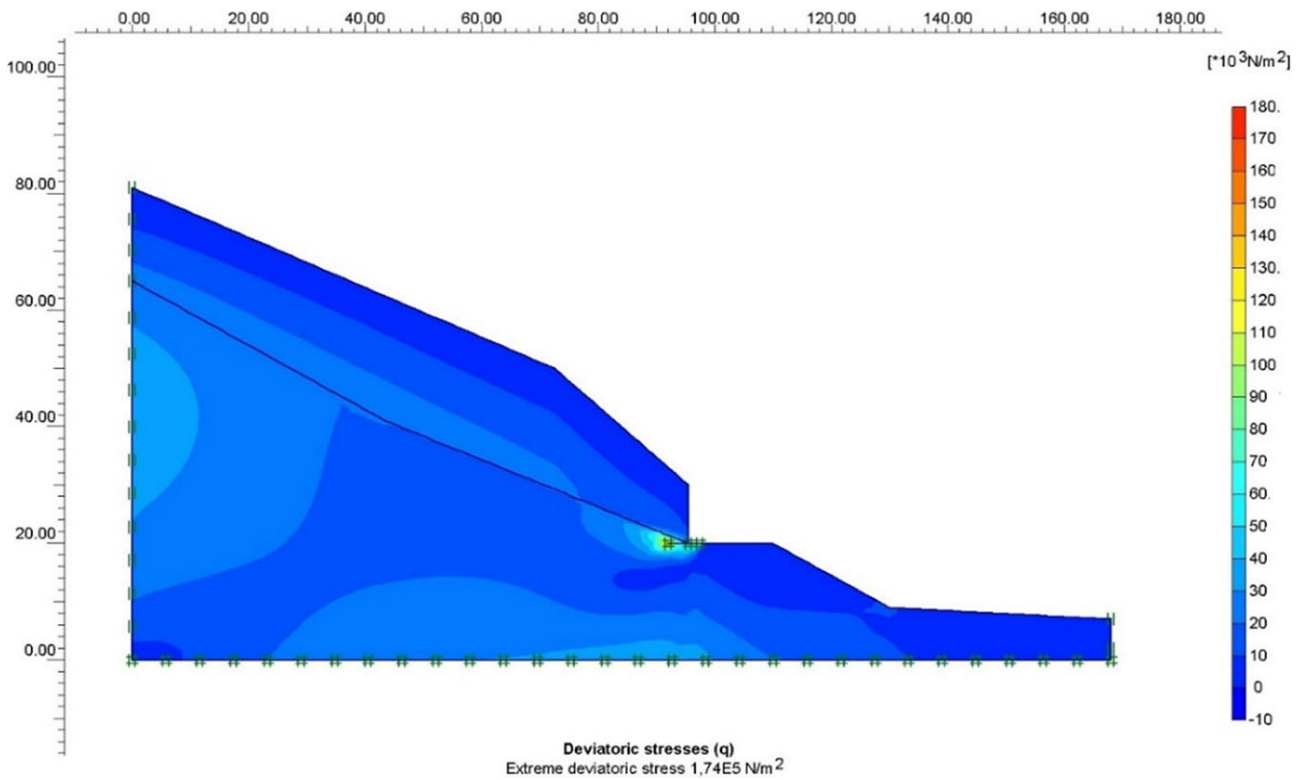


Рисунок 3 – Области локализации пластических касательных напряжений

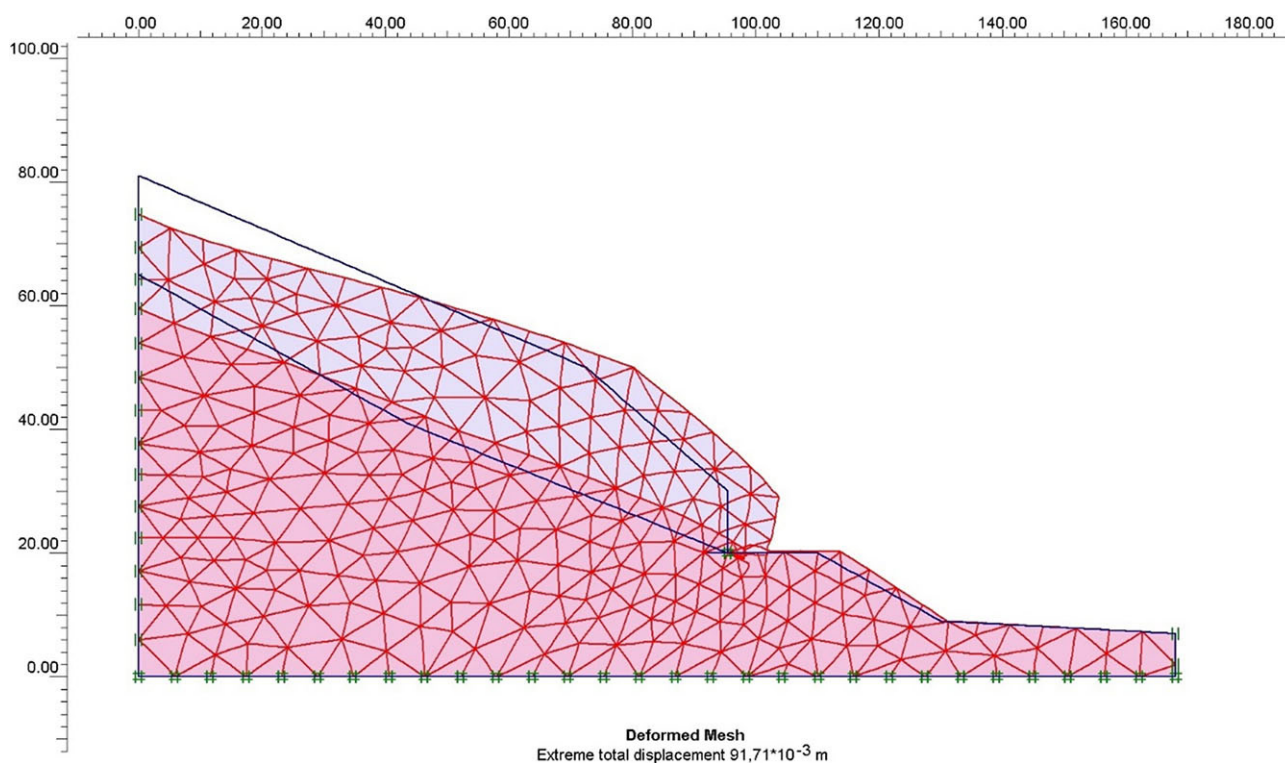


Рисунок 4 – Механизм деформирования (общие перемещения)

общих перемещений склона при изменении расчетных характеристик просадочных грунтов, а также изолинии максимальных горизонтальных (сдвиговых) напряжений и общих (полных) напряжений.

Анализ результатов численного решения при моделировании взаимодействия откоса и подпорной стены показывают, что наиболее опасным является развитие максимальных горизонтальных деформаций у подпорной стены, обусловленный сдвиговыми деформациями. Зона распространения сдвиговых деформаций охватывает большой объем грунтов откоса. Просадочные грунты, проседая от собственного веса на склоне при водонасыщении, ухудшают первоначальное значение сцепления, угла внутреннего трения, модуля деформации, изменяя полностью первоначальное напряженно-деформированное состояние. Траектории движения частиц просадочных грунтов при изменении напряженно-деформированного состояния откоса на подпорную стену показывают, что движение частиц грунта происходит на границе просадочных и непросадочных суглинков. Расчеты численным решением показывают, что подпорная стена на склоне откоса, сложенная просадочными грунтами, является неустойчивой, и скольжение грунта происходит только в объеме просадочных грунтов склона откоса.

Выводы

На территории Казахстана просадочные грунты распространены в предгорных районах Юга и Востока. Указанные грунты отличаются неустойчивой физико-механической формой и достигают мощности до 40,0 м. При замачивании и водонасыщении они проявляют значительную просадку под собственным весом, а также свойства дилатансии (разжижения) с возникновением такого опасного явления, как оползень.

Рассмотрены конкретные практические вопросы повышения эффективности строительства на таких сложных грунтах. Анализ проблемы показал, что применение традиционных экспериментально-теоретических способов и методов расчета в условиях просадочных грунтов недостаточно. Для решения задачи расчета устойчивости откоса, сложенного просадочными грунтами, был разработан новый метод, который отличается тем, что не вводились формы поверхности обрушения. При этом были использованы уравнения механики деформирования весомого грунтового массива с разными вариантами учета условий предельного равновесия. Традиционный путь решения получил развитие с явным учетом в деформационной теории пластичности условия предельного равновесия в форме Кулона-Мора. В качестве общего методического средства получе-

ния числовых значений параметров, описывающих поведение геотехнической системы «сооружение – грунт», принят МКЭ. Данный метод позволяет не только эффективно учитывать механическую неоднородность рассматриваемой среды, но и, что чрезвычайно важно – решать проблемы расчета изменения геометрии области, возникающие при ее больших деформациях.

Расчеты численным решением показывают, что подпорная стена на склоне откоса,

сложенная просадочными грунтами, является неустойчивой, и скольжение грунта происходит только в объеме просадочных грунтов склона откоса.

Анализ результатов численного решения при моделировании взаимодействия склона и подпорной стены показывает, что наиболее опасными являются развитие максимальных горизонтальных перемещений у подпорных стен, обусловленные сдвиговыми деформациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жакулин А.С. Деформируемость грунтов водонасыщенных оснований. LAP Lambert Academic Publishing. Saarbrucken. 2015.
2. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, Version 10. Balkema, 2017.
3. Малышев М.В. Прочность и устойчивость основания сооружений. Москва, 2014.
4. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. Москва, 2018.
5. Morgenstern, N.R. & Price, V.E. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces // Computer Journal, 9, pp. 388-393. 2017.
6. Terzaghi, K. and Peck R.B. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley, New York. 2017.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва: Недра, 2018. 224 с.
8. Ухов С.Б. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. Москва, 2012.
9. Das, M. Braja «Principles Geotechnical Engineering». Third Edition. PWS Publishing Company, Boston, 672 p. 2013.
10. Парамонов В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геомеханики / Группа компаний «Геоинженерия». Санкт-Петербург, 2012.

Құқықтың шекті теңдеуін бағалау

¹**ЖАКУЛИН Әділ Сұлтанұлы**, т.ғ.д., профессор, adilzhakulin@mail.ru,

^{1*}**ЖАКУЛИНА Айсұлу Әділқызы**, т.ғ.к., доцент, aisuluzh@mail.ru,

¹**КРОПАЧЕВ Пётр Александрович**, т.ғ.к., доцент, kropachev-54@mail.ru,

¹**ИМАНОВ Едиль Куттыбаевич**, магистр, кафедра меңгерушісі, e.imanov91@mail.ru,

¹**ХАН Максим Александрович**, магистр, аға оқытушы, han_maks@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Авторлар тұрақсыз физикалық-механикалық нысаны бар шөгү топырақтарында құрылыс тиімділігін арттырудың практикалық мәселелерін қарастырады. Бұл мәселені шешу үшін дәстүрлі эксперименттік-теориялық әдістер мен есептеу әдістері жеткіліксіз болғандықтан, мүлде жаңа әдістемелік құралдарды әзірлеу қажет болды. Шөгү бетінің пішінін енгізбей еңіс орнықтылығын есептеудің жаңа әдісі әзірленді. Бұл есептеу әдісі шекті тепе-теңдік шарттарын есепке алудың әртүрлі нұсқалары бар салмақты топырақ массасының деформация механикасының теңдеулерін қолдануға негізделген. Сонымен бірге бұл мәселені шешудің дәстүрлі тәсілі Кулон-Мор түріндегі шекті тепе-теңдік шартының пластикасының деформациялық теориясында нақты қарастырыла отырып әзірленді. Ақырлы элементтер әдісі «құрылым-топырақ» геотехникалық жүйенің мінез-құлқын сипаттайтын параметрлерді анықтаудың жалпы әдістемелік құралы ретінде қабылданған. Еңіс пен ті-

реу қабырғасының өзара әрекеттесуін модельдеу кезіндегі сандық шешімнің нәтижелерін талдау ығысу деформацияларының әсерінен тіреу қабырғаларында максималды көлденең жылжулардың дамуы ең қауіпті екенін көрсетті.

Кілт сөздер: шөгү топырақтары, кернеулі-деформациялық күйі, көтергіштігі, геометриялық сызықтылығы, тірек қабырғасы, еңіс орнықтылығы, сандық әдістер.

Assessment of the Limiting Equilibrium of a Slop

¹**ZHAKULIN Adil**, Dr. of Tech. Sci., Professor, adilzhakulin@mail.ru,

¹***ZHAKULINA Aisulu**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, aisuluzh@mail.ru,

¹**KROPACHEV Petr**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, kropachev-54@mail.ru,

¹**IMANOV Edil**, Master's Degree, Head of Department, e.imanov91@mail.ru,

¹**KHAN Maxim**, Master's Degree, Senior Lecturer, han_maks@mail.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The authors consider practical issues of increasing the efficiency of construction on subsidence soils that have an unstable physical and mechanical form. Due to the fact that traditional experimental-theoretical methods and calculation methods were not enough to solve this problem, it was necessary to develop completely new methodological tools. A new method for calculating slope stability without introducing the shape of the collapse surface has been developed. This calculation method is based on the use of equations of the mechanics of deformation of a weighty soil mass with various options for taking into account the conditions of limit equilibrium. At the same time, the traditional way of solving this problem has been developed with explicit consideration in the deformation theory of plasticity of the limit equilibrium condition in the Coulomb-Mohr form. The finite element method has been adopted as a general methodological tool for determining the parameters describing the behavior of the geotechnical system «structure-soil». Analysis of the results of a numerical solution when modeling the interaction of a slope and a retaining wall showed that the most dangerous is the development of maximum horizontal displacements at retaining walls due to shear deformations.

Keywords: subsidence soils, stress-strain state, bearing capacity, geometric nonlinearity, retaining wall, slope stability, numerical methods.

REFERENCES

1. Zhakulin A.S. Deformiruemost' gruntov vodonasyshchennyh osnovanij. LAP Lambert Academic Publishing. Saarbrücken. 2015.
2. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, Version 10. Balkema, 2017.
3. Malyshev M.V. Prochnost' i ustojchivost' osnovaniya sooruzhenij. Moscow, 2014.
4. Maslov N.N. Osnovy inzhenernoj geologii i mekhaniki gruntov. Moscow, 2018.
5. Morgenstern N.R. & Price, V.E. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces // Computer Journal, 9, pp. 388-393. 2017.
6. Terzaghi, K. and Peck R.B. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley, New York. 2017.
7. Fadeev A.B. Metod konechnyh elementov v geomekhanike. Moscow: Nedra, 2018. 224 p.
8. Uhov S.B. i dr. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty. Moscow, 2012.
9. Das M. Braja «Principles Geotechnical Engineering». Third Edition. PWS Publishing Company, Boston, 672 p. 2013.
10. Paramonov V.N. Metod konechnyh elementov pri reshenii nelinejnyh zadach geomekhaniki / Gruppa kompanij «Geokonstrukciya». Sankt-Peterburg, 2012.