

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ НИЗКОЙ ПРОЧНОСТИ

М.А. Карасев¹, Г.Б. Поспехов¹, Т.С. Астапенко¹, В.С. Шишкина¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: tnastapenko@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены вопросы анализа моделей прогноза напряженно-деформированного состояния в геотехнических сооружениях, сложенных грунтами низкой прочности. Основное внимание уделено техногенным грунтам, используемым для формирования гидроотвалов, хвостохранилищ, шламохранилищ и других искусственно созданных геотехнических сооружений. Отмечено, что грунты с низкой прочностью характеризуются высокой сжимаемостью, их механическое поведение в значительной степени зависит от состояния и структуры. В связи с этим обеспечение устойчивости и эксплуатации геотехнических сооружений на грунтах низкой прочности может быть реализовано с помощью комплексного геомеханического анализа, вследствие которого определяется выбор оптимальных технологических решений и прогноз ожидаемых геомеханических процессов. Показано, что традиционные методы расчета для оценки механического поведения грунтов низкой прочности не могут быть использованы, таким образом, основная задача заключается в использовании различных альтернативных методов расчета, например, применении численных методов анализа (метод материальных точек, метод гидродинамики сглаженных частиц, связный Лагранж-Эйлеровый метод), используемых для прогноза напряженно-деформированного состояния объектов инженерного дела. Полученные результаты в ходе дальнейших исследований будут положены в предполагаемый подход обеспечения устойчивости геотехнических сооружений на основаниях низкой прочности.

Ключевые слова: техногенные грунты, намывные грунты, прочность, напряжения, деформации, модели деформирования, геомеханические процессы, численное моделирование.

Для цитирования: Карасев М. А., Поспехов Г. Б., Астапенко Т. С., Шишкина В. С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 49–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.

Stress–strain behavior prediction models for weak manmade soil

M.A. Karasev¹, G.B. Pospehov¹, T.S. Astapenko¹, V.S. Shishkina¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: tnastapenko@yandex.ru

Abstract: Spotlight is on the models of the stress–strain behavior prediction in geotechnical structures composed of weak soils. Emphasis is laid on manmade soils at hydraulic fills, tailings ponds, slurry storages and other artificial geotechnical facilities. Weak soils possess high

compressibility, and their mechanical behavior greatly depends on their condition and structure. Maintenance of stability and operability of geotechnical structures arranged on weak soils can be implemented using an integrated geomechanics analysis which allows selecting the optimized process designs and predicting the anticipated geomechanical behavior. It is shown that the conventional calculation methods are inapplicable to estimation of the mechanical behavior of weak soils. For this reason, it is required to use alternative calculation techniques, for instance, numerical methods of analysis (material point method, smoothed-particle hydrodynamics, the Euler–Lagrange equation) which are in service in the stress–strain behavior prediction at engineering structures. The research findings will be used to develop and propose an approach to geotechnical structure stability on weak bases.

Key words: manmade soil, fill ground, strength, stresses, strains, deformation models, geomechanical processes, numerical modeling.

For citation: Karasev M. A., Posphehov G. B., Astapenko T. S., Shishkina V. S. Stress–strain behavior prediction models for weak manmade soil. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):49–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.

Введение

Массивы намывных техногенных грунтов образуются при гидравлическом способе формирования таких сооружений, как гидроотвалы, хвостохранилища, шламохранилища, золоотвалы. Такие сооружения могут занимать площади в несколько сотен и тысяч гектаров, поэтому в целях рационального использования геологической среды возникает необходимость освоения их территорий после завершения намыва. В связи с этим, как правило, возникает проблема обоснования возможности складирования на тех же площадях отходов «сухим способом». При этом с поверхности и до некоторой глубины намывные техногенные грунты характеризуются низкой прочностью, повышенной сжимаемостью, находятся в нестабилизированном состоянии, что делает последующее их использование в качестве основания для различных целей сложной геомеханической и инженерной задачей.

Поэтому проблема проектирования различных сооружений на таких грунтах весьма актуальна в горнодобывающей отрасли.

В настоящее время применяются различные методики численного моделирования [1 – 4] и прогноза напряженно-деформированного состояния геотехнических сооружений [5 – 7]. Стоит отметить, что традиционные расчетные методики оценки устойчивости сооружений для техногенных намывных грунтов, как, например, метод предельного равновесия или метод предельного состояния, не позволяют в явном виде выполнить прогноз развития геомеханических процессов. Величины коэффициента запаса по устойчивости в таких случаях получаются без учета фактического изменения напряженно-деформированного состояния и, в частности, величин порового давления, что в значительной степени снижает точность выполняемых расчетов и требует проведения значительного объема натурных наблюдений, на основании которых вносятся поправки в расчетную модель. Вопросы развития деформаций при формировании и эксплуатации различных сооружений на таких основаниях также не могут быть учтены при выполнении расчетов традиционными методами. Столь сложные геомеха-

нические процессы могут быть установлены на основании физического моделирования, например, методами центробежного моделирования [8, 9], однако их применение требует наличия подготовленной специализированной лаборатории и не может рассматриваться как основной метод геомеханического обоснования при проектировании сооружений. Альтернативный подход основан на применении численных методов анализа, которые получили широкое распространение в практике прогноза напряженно-деформированного состояния в различных областях инженерного дела, и в частности, при решении задач геомеханики. Однако адаптация численных методов анализа для решения задач геомеханики при размещении сооружений на грунтах низкой прочности также является нетривиальной задачей и требует применения специализированных подходов.

Таким образом, настоящая публикация посвящена анализу состояния вопроса прогноза геомеханических процессов при освоении территорий размещения техногенных намывных грунтов с применением численных методов ана-

лиза и разработке общих рекомендаций по повышению достоверности развития напряженно-деформированного состояния при передаче нагрузок на грунты с низкой прочностью текучей и текуче-пластичной консистенции.

Особенности механического поведения оснований, сложенных грунтами низкой прочности

Дисперсные водонасыщенные глинистые грунты низкой прочности принято называть слабыми грунтами. При этом условность данного термина и критерии отнесения грунтов к слабым разновидностям обсуждаются уже почти на протяжении века, что подробно изложено в трудах М.Ю. Абелева и Л.С. Амаряна [10–12]. Механическое поведение таких грунтов, помимо состава, обуславливаются их состоянием, а также структурой, которая является важным элементом при определении таких показателей, как прочность на сдвиг, сжимаемость, и оказывает значительное влияние на их фильтрационные характеристики (рис. 1).

На практике освоение территорий распространения техногенных намывных грунтов всегда приводит к внедрению

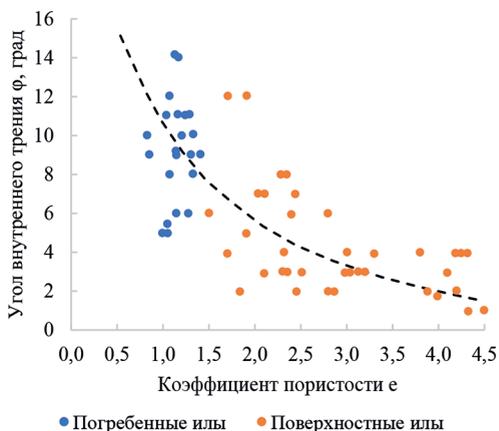
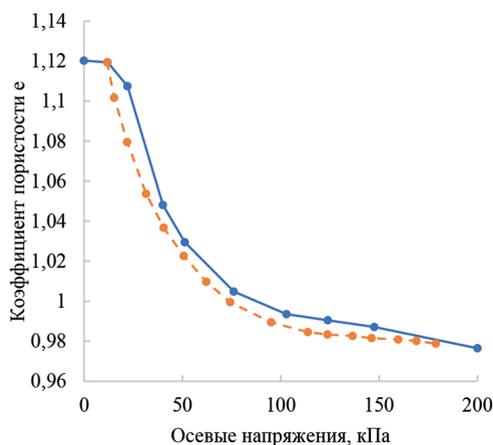


Рис. 1. Характерное деформирование грунтов низкой прочности при сжатии [10] (а) и закономерность изменения угла внутреннего трения от физического состояния [12] (б)

Fig. 1. The characteristic deformation of low compressive strength soils [10] (a) and the pattern of variation of the angle of internal friction from the physical state [12] (b)

формируемых сооружений в текучие и текучепластичные намывные грунты, что вызывает выдавливание одной их части, а другой — защемление под сооружением с последующим уплотнением по мере рассеивания порового давления [8, 13]. Поэтому обеспечение устойчивости и нормальной эксплуатации различных сооружений на таких грунтах требует проведения комплексного геомеханического анализа, по результатам которого устанавливаются режим формирования новых сооружений или мероприятия по подготовке основания, обеспечивающие избежание выдавливания намывных грунтов за пределы складирования, а также контролируемую их консолидацию.

Низкая прочность рассматриваемых намывных грунтов обуславливает значительные сдвиговые деформации, а зависимость между нагрузкой и деформацией у таких грунтов имеет нелинейный характер. При этом материал при намыве может длительное время осаждаться и самоуплотняться, что не позволяет характеризовать его с помощью модуля деформации, поскольку напряженно-деформируемое состояние материала постоянно изменяется даже без приложения какой-либо дополнительной нагрузки. В целом, исследования, посвященные особенностям деформирования водонасыщенных глинистых грунтов при длительном статическом нагружении, в лабораторных условиях показывают, что прочность грунта и его объемные деформации увеличиваются в зависимости от продолжительности действия нагрузки и среднего нормального напряжения [14]. Деформации таких грунтов также могут расти или затухать в зависимости от величины нагрузки и интенсивности ее приложения. Поэтому характеристики прочностных и деформационных свойств намывных грунтов не являются постоянными величинами и существенно за-

висят от режима нагружения и фактора времени.

Глинистые грунты наиболее чувствительны к статическим нагрузкам. Исследования, посвященные особенностям деформирования глинистых грунтов при длительном статическом нагружении, в лабораторных условиях показали, что прочность грунта и его объемные деформации увеличиваются в зависимости от продолжительности действия нагрузки и среднего нормального напряжения. После уплотнения исследуемого грунта зафиксировано улучшение его механических свойств по сравнению с исходными. В связи с этим стоит отметить, что такие характеристики, как удельная связность и угол внутреннего трения, не являются постоянными величинами и существенно зависят от режима нагружения и длительности, при этом данные характеристики изменяются как в пределах характерных уплотненных и разуплотненных зон, так и в интегральном объеме [14]. Деформация также может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от интервала нагрузки. Поскольку процесс осмотического уплотнения насыщенной глины представляет собой процесс непрерывного дренирования поровой воды, то закон фильтрации будет влиять на процесс осмотического уплотнения [15].

Практика применения численных методов прогноза напряженно-деформированного состояния грунтов низкой и чрезвычайно низкой прочности

В геомеханике применяются различные методы моделирования для определения напряженно-деформированного состояния геотехнических сооружений и прогноза ожидаемых геомеханических процессов [16 — 19]. Достоверный прогноз геомеханических процессов при взаимодействии сооружений с основанием,

сложенным грунтами низкой прочности, определяется возможностью метода численного моделирования получать решения при ожидаемых величинах деформаций и способностью модели деформирования среды корректно воспроизводить характерные закономерности изменения напряжений и деформаций. Тем выше требования к моделям и методам, чем выше нелинейность ожидаемых процессов и чем больше величины прогнозируемых деформаций.

Как было отмечено ранее, грунты низкой прочности являются хорошо сжимаемой средой, испытывающей значительные деформации формоизменения при приложении к ним внешней нагрузки, что проявляется в виде внедрения отсыпаемых на них сыпучих геоматериалов и сопровождается выдавливанием грунтов низкой прочности из-под них. То есть с математической точки зрения такой класс задач должен решаться с учетом физических и геометрических нелинейных процессов, протекаемых при деформировании таких грунтов. Несмотря на то, что традиционно применяемые для решения задач геомеханики методы численного моделирования (метод конечных элементов, метод конечных разностей и т.д.) для прогноза напряженно-деформированного грунтового массива позволяет учитывать эти два вида нелинейности, величины деформаций, при которых достоверность решения сохраняется, ограничены.

В основном [20] снижение качества прогноза напряженно-деформированного состояния рассматриваемой системы связано с искажением конечно-элементной сетки, что может происходить за счет значительного изменения объема элементов, или при перемещении одной части элементной сетки относительно другой по сформированным поверхностям скольжения. До определенного момента такие искажения элементной сетки можно

купировать за счет использования адаптивных методов ее перестроения [21, 22] или при использовании специальной процедуры контроля искажения формы элемента [23], которые нашли широкое применение в практике расчета напряженного состояния исследуемых объектов в различных отраслях инженерного дела. В то же время если при решении задач геомеханики ожидается внедрение одной среды в другую, представленные выше подходы перестают эффективно работать и не позволяют получить требуемое решение.

В качестве альтернативных численных методов прогноза напряженного состояния исследуемых объектов для задач в очень больших деформациях обычно рассматриваются следующие: метод дискретных элементов [24, 25], связный Лагранж-Эйлеровый метод [20, 21, 26], бессеточные методы [27, 28], а также ряд других методов, не нашедших широкого применения в практике выполнения численных расчетов при решении задач геомеханики. Необходимо отметить, что применение метода дискретных элементов для прогноза напряженного состояния грунтов низкой прочности [29] на настоящий момент ограничено только объектами малых размеров, что связано со значительными требованиями к производительности вычислительной техники при рассмотрении масштабных геотехнических объектов и их оснований.

Дополнительные сложности накладывает калибровка параметров моделей деформирования слабых грунтов при использовании метода дискретных элементов, которая определяется не столько связью между тензором напряжений и деформаций, сколько контактным взаимодействием между отдельными элементами. Таким образом, основное внимание будет уделено анализу опыта применения связного Лагранж-Эйлерова метода (CEL), а также бессеточным методам —

методу гидродинамики сглаженных частиц (SPH), методу Галеркина (EFG) и методу материальной точки (MPM), которые в последнее время получают все более широкое распространение в практике прогноза высокоинтенсивных геомеханических процессов.

Метод CEL включает в себя как Лагранжеву формулировку, так и формулировку Эйлера. Лагранжевы элементы всегда полностью заполнены одним материалом, то есть границы материала совпадают с границей элемента. В то же время границы материала и элементов в Эйлеровой постановке могут не совпадать, то есть наблюдается перетекание материала из одной ячейки в другую. Алгоритм интегрирования по времени определяющих уравнений основан на разделении расчетного шага на два подшага, где на первом подшаге выполняется расчет в Лагранжевой постановке, за которым следует обновление положения материала внутри элементной сетки (рис. 2).

Анализируя опыт применения метода CEL для решения задач геомеханики, можно отметить его высокую эффективность, особенно при рассмотрении

взаимодействия между сооружениями и слабыми грунтами. Так, в работе [25] представлены результаты численного прогноза деформаций грунта под воздействием режущего инструмента. Авторами была получена хорошая как качественная, так и количественная сходимость результатов с лабораторным экспериментом.

Было отмечено, что данный метод не ограничен геометрией рассматриваемых объектов и позволяет получать усиление, возникающее в результате отпора разрушаемого грунта для режущих инструментов произвольной формы. Вопросы прогноза внедрения различных объектов в грунтовой массив с применением метода CEL рассмотрены в ряде научных публикаций [25, 27 – 29]. Значительная часть исследований посвящена вопросам оценки несущей способности различных типов фундаментов на грунтах очень низкой прочности [31]. Среди отдельного направления исследований, где широкое распространение получил метод CEL, это задачи, связанные с прогнозом механического уплотнения пористых сред [32]. Авторами работы было получено решение задачи о внедрении

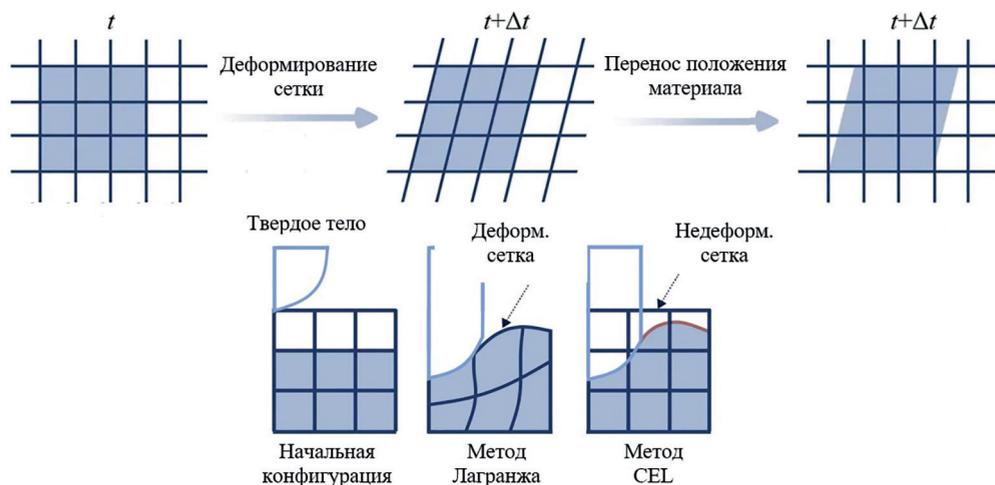


Рис. 2. Графическое представление алгоритма CEL [30]

Fig. 2. Graphical representation of the CEL algorithm [30]

сухих пород при их отсыпке на породы гидроотвала [33]. В целом данный метод себя хорошо зарекомендовал для решения различного класса задач, где величины ожидаемых деформаций значительны.

Одним из наиболее распространенных бессеточных методов является метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). В рамках данного метода рассматриваемая расчетная область идеализируется в виде набора точек, пространство между которыми сглаживается через весовые функции. Несмотря на то, что данный метод хорошо подходит для решения задач в больших деформациях, он достаточно требователен к вычислительным ресурсам по сравнению с другими рассмотренными в публикации методами. Данный метод нашел широкое применение при решении задач по первому предельному состоянию, задач взаимодействия конструкций [34] и грунтового массива [35, 36], а также моде-

лирования эрозионных процессов [37]. Однако в настоящее время более перспективным бессеточным методом является метод материальных точек (MPM).

MPM нашел применение при решении широкого круга задач механики твердого тела, включая мантийную конвекцию [38], упругие колебания, столкновения, а также взаимодействия между сыпучими материалами [39].

MPM хорошо показал себя в решении задач геомеханики в больших деформациях, с которыми плохо справлялись другие численные методы. И в отличие от других методов, основанных на частицах, таких как метод дискретных элементов, которые хорошо подходят для задач с большими перемещениями, MPM использует структуру механики сплошной среды, благодаря чему модели деформирования сред, разработанные под метод конечных элементов, могут быть адаптированы для метода MPM. В методе MPM материал представляют как

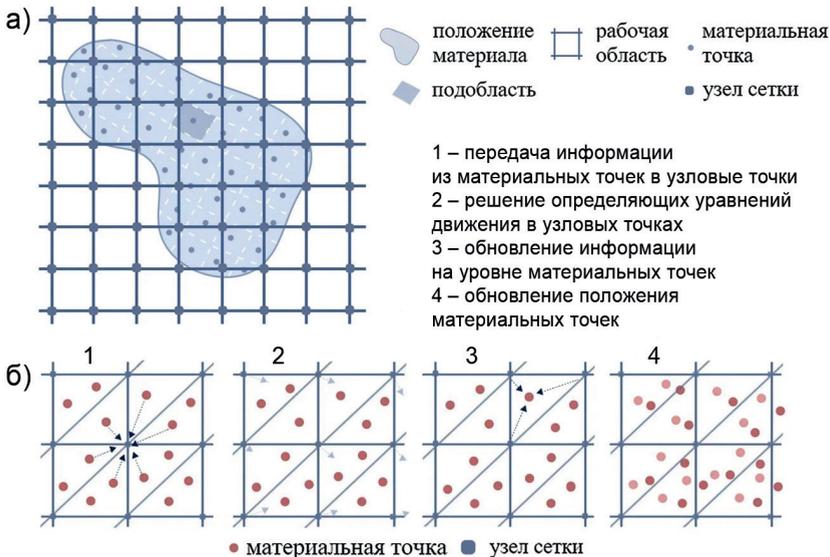


Рис. 3. Дискретизация расчетной области с расположением в ней материальных точек (а) и схема вычисления первичных (перемещения и усилия) и вторичных (напряжения и деформации) переменных при использовании метода MPM (б) [40]

Fig. 3. Discretisation of the calculation field with location of material points (a) and the scheme of calculation of primary (displacements and forces) and secondary (stresses and strains) variables when using MPM method (b) [40]

набор материальных точек, а их деформации определяются законами движения Ньютона. МРМ представляет собой гибридный подход Эйлера-Лагранжа, в котором используются движущиеся материальные точки и вычислительные узлы на фоновой сетке. Этот подход очень эффективен, особенно в контексте больших деформаций. В МРМ расчетная область разделена на две зоны (рис. 3, а). Первая зона — сплошное тело — разбивается на множество материальных точек. Каждая материальная точка определяет начальное положение материала. Вторая зона представляет собой условно неподвижную элементную сетку, внутри которой осуществляется движение материальных точек. Ее размер определяется областью, внутри которой ожидается движение материальных точек, включая и пространство, временно не занятое материальными точками.

Дискретные уравнения баланса количества движения обычно решаются в узлах этой расчетной сетки, тогда как уравнения сохранения массы и определяющие уравнения решаются в материальных точках (рис. 3, б). Информация, необходимая для решения уравнений баланса на расчетной сетке, в любой момент анализа передается от материальных точек к узлам сетки с помощью функций отображения, т.е. типичных функций формы, используемых также в методе конечных элементов.

Анализ научных публикаций, отражающих вопросы применения метода МРМ для решения задач геомеханики, позволяет заключить, что основное внимание исследователей сосредоточено на решении задач устойчивости отвалов и гидроротвалов, природных склонов, а также котлованов, тело или основание которых сложены очень слабыми грунтами. Особенности таких геотехнических объектов являются их переменная влажность и степень водонасыщения, недре-

нированное поведение при нагружении, а также развитие оползневых процессов, сопровождающихся значительными деформациями формоизменения. Как отмечалось авторами исследований, метод МРМ хорошо себя показал при решении такого класса задач, особенно при использовании соответствующих моделей деформирования геоматериалов.

Таким образом, можно отметить, что применение рассмотренных выше методов численного моделирования значительно расширяет область решаемых задач геомеханики, а в отдельных случаях является единственным способом моделирования сложных нелинейных процессов в грунтовых массивах, которые сопровождаются большими деформациями.

Однако, как было отмечено ранее, использование пригодного для задачи численного метода не всегда позволяет добиться достоверного решения задач геомеханики при рассмотрении взаимодействия грунтов низкой прочности с геотехническим объектом. Вторым элементом достоверного прогноза напряженно-деформированного состояния рассматриваемой среды является модель ее деформирования.

Широкое распространение при решении задач механики грунтов нашли упруго-идеально-пластические модели, основанные на условии пластичности Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Треска, Мизеса, Ладе-Дункана, и многие другие. Самым распространенным в практике выполнения геомеханических расчетов является условие пластичности Кулона-Мора, которое нашло широкое применение при решении задач устойчивости отвальных масс, насыпей и естественных откосов, а также для решения других задач, которые можно отнести к первому предельному состоянию. Модели деформирования среды, основанные только на условии пластичности

Кулона-Мора, предполагают, что выделяется два участка. Первый соответствует линейной стадии деформирования, когда могут развиваться только упругие деформации, в то время как второй определяет деформирование материала после достижения поверхности пластического течения. Необходимо отметить, что механизм пластического деформирования модели Кулона-Мора полностью определяется условным трением. Увеличение объема при пластическом сдвиге может быть определено через пластический параметр ψ , угол дилатансии. Функция пластического течения F и пластического потенциала P , выраженные через инварианты напряжений q и p' , в общем виде принимают вид [39]:

$$F = q - \left(\frac{c'}{tg\varphi'} + p' \right) \frac{\sin\varphi'}{\cos\theta + \frac{\sin\theta\sin\varphi'}{\sqrt{3}}}, \quad (1)$$

$$P = q - (a_{pp} + p') \frac{\sin\psi}{\cos\theta + \frac{\sin\theta\sin\psi'}{\sqrt{3}}}, \quad (2)$$

где q — интенсивность нормальных напряжений; p' — средние эффективные напряжения; φ' — эффективный угол внутреннего трения; c' — эффективное сцепление; ψ — угол дилатансии; a_{pp} — показатель сглаживания функции пластического потенциала; θ — угол Лоде.

Необходимо отметить, что понятие прочности в модели Кулона-Мора не определено, так как поверхность пластического течения может определять предельное напряженное состояние, соответствующее пиковой прочности, так и остаточной прочности. Частично рассматриваемая неопределенность решается за счет введения функции разупрочнения, которая связывала показатели пластичности φ' , c' и ψ с накопленной величиной пластических деформаций ε_{eq} . Несмотря на то, что в такой формулировке модель Кулона-

Мора лучше подходит для решения задач геомеханики в больших деформациях, положения теории критического состояния не выполняются, а траектории изменения напряженно-деформированного состояния при недренированном нагружении не совпадают с результатами лабораторных исследований. Необходимо отметить, что представленное описание характерно и для других упругопластических моделей, где механизм пластического деформирования определяется одной незамкнутой поверхностью пластического течения.

Среди моделей деформирования грунтов низкой и чрезвычайно низкой прочности выделяются классические модели, основанные на теории критического состояния, шатровые модели, а также современные модели, реализованные как в рамках теории упругопластического или вязко-упругопластического течения, так и в рамках теории деформационной пластичности.

Шатровые модели нашли широкое применение для решения задач геомеханики деформирования слабых оснований. К основной особенности этих моделей можно отнести появление второй поверхности пластического течения, отвечающей за механизм формирования как объемных пластических деформаций, так и сдвиговых. Существует несколько вариантов реализаций такого класса моделей, отличительная особенность которых в основном заключается в форме поверхностей пластического течения и параметрах, которые контролируют ее изменение. Отдельные шатровые модели реализованы с учетом ползучести слабых грунтов.

В общем виде поверхность пластического течения может быть записана следующим образом [41]:

$$F(q, p') = \frac{q^2}{M^2(p' + c \cdot ctg\varphi')} + p' - p_c, \quad (3)$$

где M — параметр, характеризующий угол наклона линии критического состояния в осях p' - q ; p_c — параметр состояния (определяет положение поверхности пластического течения).

В целом данный класс моделей позволяет описать нелинейное поведение грунта в условиях как трехосного, так и компрессионного сжатия, что позволяет эффективно использовать данный класс моделей для корректного прогноза развития напряженного состояния в основании насыпей и отвалов различного назначения. К основной области применения шатровых моделей можно отнести расчет деформирования насыпей различного назначения, располагаемых на глинистых водонасыщенных грунтовых основаниях. Так, в работах [41, 42] приведены результаты расчета деформаций основания с учетом объемной ползучести глинистых грунтов. Была получена хорошая сходимость с результатами натурных наблюдений. Однако к основному недостатку данного типа модели можно отнести невозможность описать механическое поведение грунта при разной плотности в рамках одного набора параметров. То есть положения теории критического состояния не в полной мере реализованы.

Модель Cam-Clay была одной из первых, которая связывала механическое поведение среды с показателем ее состояния. Она позволяла описать развитие напряженно-деформированного состояния как для нормально уплотненной условно сыпучей среды, так и для ее переуплотненного состояния, в условиях дренированного и недренированного нагружений.

Уравнение поверхности пластического течения модели Cam-Clay определяется как [41]

$$F(q, p') = q - Mp' \ln \left(\frac{p_c}{p'} \right). \quad (4)$$

Постановка модели Cam-Clay предполагала, что два условия теории критического состояния ($D = 0$ и $\partial D / \partial \varepsilon^p_{eq}$) удовлетворяются одновременно, что не позволяло определить изменение пиковой прочности в результате дилатационных процессов. Пиковая прочность геоматериала могла быть определена только на границе перехода от упругой стадии деформирования к пластическому состоянию, что не позволяло учесть рассеивание энергии на стадии пластического упрочнения.

Последующее развитие классической модели Cam-Clay позволило исключить ряд проблем с ее стабильностью, учесть анизотропию, структурную прочность и ползучесть пород [43, 44], а также ряд других особенностей, которые значительно расширили функционал ее применения. Однако необходимо отметить, что в научной литературе отсутствует информация о применении данных моделей для решения задач, где ожидаются очень большие деформации, сопровождающиеся внедрением и перемешиванием различных сред.

Наибольшую популярность среди моделей, основанных на теории критического состояния, которые используются для решения задач в больших деформациях, набрала модель Nor-Sand, разработанная для описания механического поведения сыпучих сред, где в качестве показателя физического состояния выступает коэффициент пористости e_0 , который задается через параметр состояния Ψ . В отличие от модели Cam-Clay, в модели Nor-Sand рассматривается две функции пластического течения, выбор функции зависит от значения параметра дилатансии N [44]:

$$F(q, p', p'_i) = q - M_i \left(1 - \ln \left(\frac{p'}{p'_i} \right) \right) p', \quad (5)$$

где M_i — отображаемый параметр, характеризующий угол наклона линии крити-

ческого состояния в зависимости от угла Лоде и параметров состояния; p_i' — параметр упрочнения.

Основное отличие модели Nor-Sand от модели Cam-Clay заключается в законе пластического упрочнения/разупрочнения. Предполагается, что механизм пластического упрочнения/разупрочнения увязан со сдвиговыми деформациями ε_{eq} , а не с объемными деформациями ε_{vol} . В отличие от модели Cam-Clay, в модели Nor-Sand два условия теории критического состояния отделены друг от друга за счет введения понятия максимальной поверхности пластического течения. В данной модели показатель состояния (плотность) и набор параметров модели позволяют воспроизводить механическое поведение материала в широком диапазоне условий нагружения. Несмотря на то, что данная модель разрабатывалась для описания механического поведения песка при дренированном и недренированном нагружении, было показано, что она может быть успешно применена для описания других условно сыпучих геоматериалов.

Альтернативой моделей деформирования геоматериалов, реализуемых в рамках теории пластического течения, являются модели, сформулированные в рамках теории деформационной пластичности. Деформационная пластичность, адаптированная для описания механического поведения сыпучих сред, получила название Hypoplasticity, и модели, сформулированные в рамках данной теории, уже на протяжении более 30 лет используются для решения практических задач геомеханики. В рамках данной теории не вводятся такие понятия, характерные для теории пластического течения, как поверхность пластического течения, пластический потенциал и т.д., а разделение между упругими и пластическими деформациями не требуется. Применяется единое уравнение для прог-

ноза изменения напряженно-деформированного состояния. Это позволяет упростить численную реализацию моделей деформирования геоматериалов для выполнения расчетов в рамках численного моделирования, а также уменьшает проблемы с достижением сходимости численного решения. В общем виде уравнение, определяющее деформирование среды, в рамках теории Hypoplasticity записывается через связь скорости изменения тензора напряжений $\dot{\sigma}$, тензора напряжений и тензора деформаций [45]:

$$\dot{\sigma} = f(\sigma, \varepsilon) = D\varepsilon + N\|\varepsilon\|, \quad (6)$$

где D — тензор четвертого порядка; N — тензор второго порядка.

Тензоры D и N определяют поведение модели деформирования среды. В настоящее время в практике решения задач геомеханики в больших деформациях нашли две модели, основанные на теории Hypoplasticity. Обе модели включают в свою формулировку параметр состояния, характеризующий изменение коэффициента пористости геоматериала на различных стадиях нагружения, то есть модели реализованы в рамках принципов, заложенных в теории критического состояния. Первая из них сформулирована для описания механического поведения песков [45]. Данная модель широко использовалась для численного моделирования внедрения свай в грунтовый массив в рамках методов CEL, SPH и MPM [46]. Авторами был получен сопоставимый с данными инструментальных замеров результат по несущей способности свай, как на вдавливание, так и на отрыв. Также эта модель использовалась при решении других задач геомеханики, где моделировалось внедрение одной сыпучей среды в другую. Вторая модель, предназначенная для воспроизведения механического подведения глинистых грунтов [47], в дальнейшем была расширена для учета анизотропии ме-

ханических свойств глин [48] и нелинейной сдвиговой жесткости при малых деформациях [49]. Несмотря на то, что использование данной модели для решения задач в больших деформациях не упоминается в научных публикациях, никаких принципиальных ограничений ее использования для такого класса задач нет.

Таким образом, неважно, в рамках какой теории выполнена реализация модели деформирования геоматериала, учет принципов, положенных в теорию критического состояния, позволяет выполнить достоверный прогноз изменения напряженно-деформированного состояния при различных условиях нагружения, а также корректно прогнозировать пиковые и остаточные величины прочности, в широком диапазоне изменения сдвиговых деформаций. Один набор параметров полностью определяет поведение таких моделей, а параметр состояния, которым чаще всего является коэффициент пористости или относительная плотность, позволяет определить влияние начального состояния на последующее поведение геоматериала. То есть один и тот же набор параметров геоматериала может быть использован для рассмотрения его поведения на различных глубинах, при разной плотности или при разной истории формирования напряженного состояния.

Показано, что такие модели деформирования геоматериалов могут быть использованы для расчета напряженно-деформированного состояния различных геоматериалов, и в частности, грунтов очень низкой прочности.

Обсуждение

Выполненный анализ показывает, что в настоящее время разработаны как методы прогноза напряженно-деформированного состояния грунтов, характеризующихся способностью испытывать зна-

чительные объемные и сдвиговые деформации, так и модели, учитывающие особенности деформирования грунтов с низкой прочностью. В то же время в рассмотренных публикациях было показано, что геомеханические задачи в больших деформациях не являются типовыми и требуется адаптация как численных методов анализа, так и моделей деформирования грунтов для ее решения.

В настоящее время коллектив авторов занимается исследованием глинисто-солевых шламов, образующихся при обесшламливании питания сильвиновой флотации, и формированием напряженно-деформированного состояния как на стадии функционирования шламохранилища, так и при отсыпке на него соляных раздробленных пород после его заполнения. Апробируются методы определения механического поведения таких геоматериалов как в лабораторных, так и в натуральных условиях. Совершенствуются методы прогноза напряженно-деформированного состояния геотехнических сооружений, сложенных слабыми грунтами. Таким образом, для решения такой задачи необходимо учесть весь комплекс вопросов, который рассматривался в настоящей работе.

Полевые исследования Санкт-Петербургского горного университета методом вращательного среза на одном из действующих шламохранилищ на калийном месторождении показали, что прочность глинисто-солевых шламов не возрастает в пределах изученных 8 м и они остаются в нестабилизированном состоянии (см. рис. 4).

Такие результаты подтверждаются ранее выполненными исследованиями [50], которые позволили установить, что даже спустя 7–11 лет с начала эксплуатации шламохранилищ их сопротивление недренированному сдвигу не достигало величины, равной 50 кПа, данные приведены в таблице.

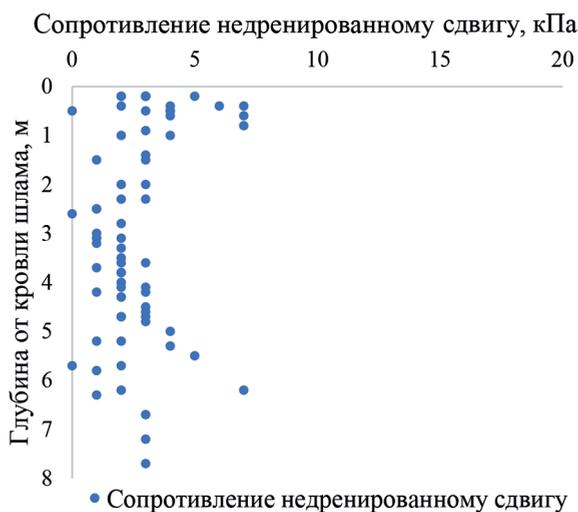


Рис. 4. Результаты оценки уплотненности шламов для шламохранилища после 4 лет эксплуатации
 Fig. 4. Results of sludge compaction assessment for a tailings piles after 4 years of operation

При отборе проб шламов со дна шламохранилища в результате лабораторных исследований плотность материала с глубины 2–3 м составила 1,36–1,48 г/см³ при рассолосодержании более 90%. Модуль деформации шламов составил 0,8 МПа, а коэффициент фильтрации – 0,012–0,003 м/сут. Поэтому отложения со дна шламохранилища по аналогии с природными грунтами характеризуются как суглинистый ил предельно малой степени литификации и являются сильносжимаемыми грунтами низкой прочности. При этом агрегатный

состав глинисто-солевых шламов обуславливает более сильную сжимаемость и высокую фильтрационную способность, чем у природных грунтов, считающихся слабыми.

В современной нормативной литературе в ОДМ 218.4.4.002-2020 [52] приведено наиболее полное определение слабых грунтов, согласно которому к ним относят связные грунты с сопротивлением недренированному сдвигу C_u в условиях природного залегания менее 75 кПа или модулем деформации E ниже 5 МПа, а при отсутствии этих данных документ

Прочностные свойства глинистых шламов на шламохранилищах обогатительных фабрик Березниковского калийного рудоуправления (БКРУ) (составлено авторами) [50]

Strength properties of clayey sludge at the tailings piles of Potash Mining Complex in Berezniki (BKRU) (compiled by authors) [50]

Шламо-хранилище	Участок	Прочность по крыльчатке, МПа	Срок эксплуатации к моменту исследований
БКРУ-2	пляжная зона	0,003–0,030 среднее 0,013 (20 испытаний)	11 лет
	прудковая зона	0,003–0,044 среднее 0,008 (19 испытаний)	
БКРУ-3	прудковая зона	0,003–0,027 среднее 0,10 (27 испытаний)	7 лет

предлагает относить к слабым грунтам разновидности с показателем текучести IL более 0,5. Из вышеперечисленных трех критериев единственный параметр, который может быть достоверно получен для техногенных намывных грунтов прямыми полевыми методами — это C_u , определяемое с помощью метода вращательного среза (крыльчаткой). Поэтому в данной работе при оценке грунтов как слабых оснований в качестве основного принят прочностной критерий. При этом конкретное значение $C_u < 75$ кПа, принятое в дорожном строительстве, требует уточнения для других видов хозяйственной деятельности.

Помимо полевых исследований методом вращательного среза в случае возможности отбора проб или моделирования изменения свойств техногенных грунтов оценку C_u можно выполнить с помощью лабораторной крыльчатки по методике BS 1377-7 [53], по неконсолидированно-недренированной схеме трехосных испытаний по ГОСТ 12248.3-2020 [54] или косвенно через определение удельного сопротивления пенетрации по ГОСТ 34276-2017 [55].

Использование C_u для начальной характеристики прочности намывных текучих и текучепластичных грунтов предпочтительнее определения сцепления и угла внутреннего трения, поскольку проведение испытаний на одноплоскостном срезе грунтов при такой консистенции осложняется их выдавливанием в зазор даже при очень малых давлениях, а проведение трехосных испытаний по консолидированно-недренированной и консолидированно-дренированной схеме затрудняет большая сжимаемость таких грунтов. Тем более что намывные грунты обычно обладают низкой проницаемостью, в связи с чем условия недренированных испытаний лучше отражают их поведение, особенно если учитывать высокую скорость нагружения

грунтов при последующем освоении территории для складирования «сухих» отходов. Но для прогноза поведения материала при переходе в стабилизированное состояние дополнительно должны изучаться параметры прочности в эффективных напряжениях, а при необходимости оценки деформационных процессов во времени потребуются определения коэффициента консолидации и коэффициента фильтрации.

При этом следует отметить, что рассматриваемые грунты не позволяют обеспечить высокое качество монолитов. Даже при применении специальных типов грунтоносков после извлечения материала из массива возникает проблема сохранения ненарушенного состояния при помещении материала в оборудование для проведения лабораторных исследований. Непосредственные испытания таких грунтов также связаны с серьезными трудностями. Например, высокая сжимаемость материалов приводит к тому, что при выполнении трехосных испытаний образец принимает бочкообразную форму, с формированием расширения в его нижней части. То есть достоверность результатов получаемых продольных и особенно поперечных деформаций вызывает серьезное сомнение. При проведении сдвиговых испытаний грунтовые массы выдавливаются через зазор между частями прибора еще на стадии приложения нормальной нагрузки, то есть обеспечить заданный режим формирования напряжений не представляется возможным или весьма затруднительно. Таким образом, исследование механического поведения таких грунтов не может быть основано только на лабораторных исследованиях и требует комплексного подхода, включая разработку специализированного оборудования для их испытания.

В целом необходимо отметить, что изучение механического поведения шла-

мов в лабораторных условиях является нетривиальным процессом и требует разработки новых подходов. В частности, при выполнении таких работ авторами предполагается использовать различные варианты физического моделирования (стендовые испытания), результаты которых будут использоваться для калибровки параметров моделей деформирования геоматериала.

Такой подход позволит изучить особенности деформирования такого материала под различными нагрузками и воздействиями и получать картину внедрения сухих пород солевотвала в водонасыщенные глинисто-солевые шламы. По нашему мнению, эффективность такого подхода будет наиболее показательной при изучении механического поведения глинисто-солевых шламов в диапазоне напряжений, при которых шламы представляют собой вязкую жидкость, вплоть до момента, когда после предварительного уплотнения шламы смогут сохранять свою форму для последующих их испытаний традиционными способами. С учетом ожидаемых значительных как объемных деформаций, так и деформаций формоизменения, для калибровки моделей деформирования шламов решение такой задачи с применением сеточных методов не позволит достичь нужного результата, что потребует использования так называемых бессеточных методов, краткий анализ и опыт применения которых был представлен ранее.

В настоящее время по каждому из озвученных в работе направлений ведутся научные исследования, результаты которых будут публиковаться по мере накопления и обобщения результатов.

Заключение

Большинство техногенных грунтов, складываемых в накопители отходов наливного и намывного типов, относятся

к грунтам низкой прочности, что определяет их особенности деформирования при формировании нагрузок, обусловленных наращиванием ограждающих сооружений. Рассматриваемые материалы, как правило, находятся в нестабилизированном состоянии, характеризуются низкими деформационными характеристиками и прочностью недренированного сдвига от 1 до 50 кПа.

Такие параметры механических характеристик определяют особенности изучения свойств грунтов, зачастую сопряженные с невозможностью отбора монолитов, а также комплексного проведения лабораторных исследований в условиях трехосного сжатия, что предопределяет необходимость более широкого применения натуральных методов исследования. Рациональным также является применение косвенных подходов к оценке механического поведения таких грунтов на основании методов физического моделирования.

Учитывая специфику поведения грунтов низкой прочности, для их прогноза напряженно-деформированного состояния при взаимодействии с сооружением необходимо использовать численные методы анализа, пригодные для описания больших деформаций, такие как методы CEL, SPH, MPM или их аналоги. Применение данных методов позволит не только корректно учесть формирование напряженного состояния в таких системах, но и решать задачи, связанные с разрывом сплошности среды, изменением ее формы, внедрением одной среды в другую. Особое внимание должно быть уделено и выбору модели деформирования слабых грунтов, так как механизм их деформирования в значительной степени зависит как от их физического состояния, так и от корректного воспроизведения траектории нагружения в зависимости от величины формируемого избыточного порового давления.

Таким образом, деформирование слабых грунтов под воздействием нагрузки от сооружений представляется комплексной задачей и требует применения нестандартных подходов как на стадии обоснования механических характеристик таких сред, выбора метода численного анализа и модели деформирования среды, так и при определении параметров моделей среды и установления начальных и граничных условий численных моделей.

В настоящее время авторами работы выполняются исследования, направленные

на повышение достоверности определения механического поведения грунтов низкой прочности (на примере глинисто-солевых шламов) и методов прогноза напряженно-деформированного состояния таких геоматериалов при их рассмотрении в качестве тела или основания геотехнических сооружений. Предложены нестандартные подходы для решения данных задач, апробация которых и подтверждение их эффективности выполняется на примере глинисто-солевых шламов, являющихся основанием для планируемого в будущем солеотвала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 16–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

2. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.

3. Мустафин М. Г., Кологривко А. А., Васильев Б. Ю. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта // Горный журнал. — 2023. — № 2. — С. 56–62. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

4. Карасев М. А., Петрушин В. В., Рысин А. И. Применение метода конечно дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 48–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

5. Казанин О. И., Ильинец А. А. Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 41–48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

6. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-1. — С. 100–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.

7. Игнатъев С. А., Судариков А. Е., Имашев А. Ж. Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. — 2019. — Т. 238. — С. 371–375. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.371.

8. Малюшицкий Ю. Н. Устойчивость насыпей-отвалов. — Киев: Будивельник, 1975. — 176 с.

9. Madabhushi G. Centrifuge modelling for civil engineers. CRC press, 2017. — 324 p.

10. Абелев М. Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений. — М.: Стройиздат, 1973. — 145 с.

11. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. — М.: Стройиздат, 1983. — 249 с.

12. Амарян Л. С. Свойства слабых грунтов и методы их изучения. — М.: Недра, 1990. — 224 с.

13. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Карасев М. А., Кутепов Ю. Ю. Прогноз формоизменения намывных массивов гидроотвалов при складировании на них отвальных насыпей // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 23–27. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.05.

14. *Mirsayapov I. T., Koroleva I. V.* Deformation of clay soils under regime long-term static loading / 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019-Proceedings. 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0956.

15. *Liu G., Xie Q., Fan G., Qian F., Qi C.* Model test on bearing capacity characteristics of heat exchanger piles in saturated clays // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2017, vol. 36, no. 10, pp. 2535–2543. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0370.

16. *Беляков Н. А., Емельянов И. А.* Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2022. — № 2. — С. 192–207. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.

17. *Козловский Е. Я., Журавков М. А.* Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 33–38. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.

18. *Ковальский Е. Р., Громцев К. В., Петров Д. Н.* Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 87–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101.

19. *Барях А. А., Девятков С. Ю., Денкевич Э. Т.* Математическое моделирование развития процесса сдвигения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 13–20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.

Литературу с п. 20 по п. 50 смотри в REFERENCES.

51. *Дашко Р. Э.* Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. — СПб.: Институт «ПИ Геореконструкция», 2015.

52. *ОДМ 218.4.4.002-2020* Методические рекомендации по использованию существующих насыпей из слабых и обводненных грунтов при реконструкции автомобильных дорог [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/218.4.4.002-2020.pdf> (дата обращения: 20.03.2023).

53. *BS 1377-7* Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6754255> (дата обращения: 20.03.2023).

54. *ГОСТ 12248.3-2020* Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/566409062> (дата обращения: 20.03.2023).

55. *ГОСТ 34276-2017* Методы лабораторного определения удельного сопротивления пенетрации. Soils. Methods of laboratory determination of the specific resistance to penetration [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200157117> (дата обращения: 20.03.2023). **МИАЭ**

REFERENCES

1. Protosenya A. G., Katerov A. M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 16–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

2. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.

3. Mustafin M. G., Kologrivko A. A., Vasiliev B. Yu. Accuracy of digital terrain modeling based on periodic airborne laser scanning of a mining object. *Gornyi Zhurnal.* 2023, no. 2, pp. 56–62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.

4. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 48 – 66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48.

5. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute.* 2022, vol. 253, pp. 41 – 48. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

6. Protosenya A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 100 – 113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.

7. Ignatiev S. A., Sudarikov A. E., Imashev A. Zh. Modern mathematical forecast methods of maintenance and support conditions for mining tunnels. *Journal of Mining Institute.* 2019, vol. 238, pp. 371 – 375. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.371.

8. Malyushitskiy Yu. N. *Ustoychivost' nasypay-otvalov* [Stability of embankments-dumps], Kiev, Budivsel'nik, 1975, 176 p.

9. Madabhushi G. *Centrifuge modelling for civil engineers.* CRC press, 2017. 324 p.

10. Abelev M. Yu. *Slabye vodonasyshchennye glinistyie grunty kak osnovaniya sooruzheniy* [Weak water-saturated clay soils as foundations of structures], Moscow, Stroyizdat, 1973, 145 p.

11. Abelev M. Yu. *Stroitel'stvo promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzheniy na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh* [Construction of industrial and civil structures on weak water-saturated soils], Moscow, Stroyizdat, 1983, 249 p.

12. Amaryan L. S. *Svoystva slabykh gruntov i metody ikh izucheniya* [Properties of weak soils and methods of their study], Moscow, Nedra, 1990, 224 p.

13. Kutepov Y. I., Kutepova N. A., Karasev M. A., Kutepov Y. Yu. Prediction of shape-shifting of hydraulic waste dumps fill massifs when stockpiling waste embankments on them. *Gornyi Zhurnal.* 2016, no. 12, pp. 23 – 27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.05.

14. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Deformation of clay soils under regime long-term static loading. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019-Proceedings.* 2019. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0956.

15. Liu G., Xie Q., Fan G., Qian F., Qi C. Model test on bearing capacity characteristics of heat exchanger piles in saturated clays. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering.* 2017, vol. 36, no. 10, pp. 2535 – 2543. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0370.

16. Belyakov N. A., Emelyanov I. A. Development of approach to processing of stress state measurements by circular unloading method. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2022, no. 2, pp. 192 – 207. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.

17. Kozlovskiy E. Ya., Zhuravkov M. A. Determination and verification of the calculated model parameters of salt rocks taking into account softening and plastic flow. *Journal of Mining Institute.* 2021, vol. 247, pp. 33 – 38. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.4.

18. Kovalski E. R., Gromtsev K. V., Petrov D. N. Modeling deformation of rib pillars during backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 87 – 101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101.

19. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modeling of displacement during the potash ores mining by longwall faces. *Journal of Mining Institute.* 2023, vol. 259, pp. 13 – 20. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.

20. Wang D., Bienen B., Nazem M., Tian Y., Zheng J., Pucker T. Randolph M. Large deformation finite element analyses in geotechnical engineering. *Computers and Geotechnics.* 2015, vol. 65, pp. 104 – 114. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.12.005.

21. Zhang L. B., Cai Z. X., Liu H. F. A novel approach for simulation of soil-tool interaction based on an arbitrary Lagrangian-Eulerian description. *Soil and Tillage Research.* 2018, vol. 178, pp. 41 – 49. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.011.

22. Aubram D. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for penetration into sand at finite deformations.* Shaker Verlag, Aachen, Germany, 2014.

23. Solimanab H. A., Shashcd A. Y., Hossainyc T. M., Abd-Rabouce M. Investigation of process parameters in orthogonal cutting using finite element approaches. *Heliyon*. 2020, vol. 6, no. 11. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05498.
24. Zhou W. H., Yin Z. Y. *Practice of discrete element method in soil-structure interface modeling*. Springer, 2022, 260 p. DOI: 10.1007/978-981-19-0047-1.
25. Xu W. J., Wang S., Zhang H. Y., Zhang Z. L. Discrete element modelling of a soil-rock mixture used in an embankment dam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 86, pp. 141 – 156. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.04.004.
26. Qiu G., Henke S., Grabe J. Application of a Coupled Eulerian – Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. *Computers and Geotechnics*. 2011, vol. 38, pp. 30 – 39. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.09.002.
27. Bui H. H. Smoothed particle hydrodynamics for soil mechanics. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. 2006, pp. 275 – 281.
28. Liua G. R., Mao Z., Huan Y. SPH modeling for soil mechanics with application to landslides. *Modeling in Geotechnical Engineering*. 2021, pp. 257 – 289. DOI: 10.1016/B978-0-12-821205-9.00004-6.
29. Yadong X., Jie Z., Hongwei H., Hongxin D. Analysis of Large Soil Rock Mixture Slope Based on DEM. *5th ISRM Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics and International Symposium on Rock Engineering for Innovative Future*. Okinawa, Japan, 2019.
30. Cardoso A., Borges J., Costa P., Gomes A., Marques J., Vieira C. Numerical methods in geotechnical engineering. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX. Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2018)*. 2018, Porto, Portugal, CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9781351003629.
31. Lingbo Zhang, Zongxi Cai, Liwei Wang, Runxi Zhang, Haofei Liu Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method for simulating soil-tool interaction. *Biosystems Engineering*. 2018, vol. 175, pp. 96 – 105. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.09.003.
32. Aubram D., Rackwitz F., Savidis S. Contribution to the non-lagrangian formulation of geotechnical and geomechanical processes. *Holistic Simulation of Geotechnical Installation Processes: Theoretical Results and Applications*, Springer International Publishing. 2017, pp. 53 – 100.
33. Qiu G., Grabe J. Numerical investigation of bearing capacity due to spudcan penetration in sand overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 2012, vol. 49, no. 12, pp. 1393 – 1407. DOI: 10.1139/t2012-085.
34. Bui H. H., Fukagawa R., Sako K., Ohno S. Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2008, vol. 32, no. 12, pp. 1537 – 1570. DOI: 10.1002/nag.688.
35. Peng C., Guo X. G., Wu W., Wang Y. Unified modelling of granular media with smoothed particle hydrodynamics. *Acta Geotechnica*. 2016, vol. 11, no. 6, pp. 1231 – 1247. DOI: 10.1007/s11440-016-0496-y.
36. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. Three – dimensional modeling of granular flow impact on rigid and deformable structures. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 112, pp. 257 – 271. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.019.
37. Dong X., Liu G., Li Z. L., Zeng W. A smoothed particle hydrodynamics (SPH) model for simulating surface erosion by impacts of foreign particles. *Tribology International*. 2016, vol. 95, pp. 267 – 278. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.11.038.
38. Moresi L., Dufour F., Mühlhaus H. B. A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials. *Journal of Computational Physics*. 2003, vol. 184, no. 2, pp. 476 – 497. DOI: 10.1016/S0021-9991(02)00031-1.
39. Bardenhagen S. G., Brackbill J. U., Sulsky D. The material-point method for granular materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000, vol. 187, no. 3-4, pp. 529 – 541. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00338-2.

40. Fern J., Rohe A., Soga K., Alonso E. *The material point method for geotechnical engineering: a practical guide*. CRC Press, 2019. DOI: 10.1201/9780429028090.
41. Brinkgreve R. B. J. Time-dependent behaviour of soft soils during embankment construction—a numerical study. *Ninth International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*. CRC Press/Balkema-Taylor & Francis Group. 2004, pp. 631 – 637.
42. Vermeer P. A., Neher H. P. A soft soil model that accounts for creep. *Beyond 2000 in computational geotechnics*. Routledge, 2019, pp. 249 – 261.
43. Yin Z. Y., Karstunen M., Chang C. S., Koskinen M., Lojander M. Modeling time-dependent behavior of soft sensitive clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2011, vol. 137, no. 11, pp. 1103 – 1113. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000527.
45. Grimstad G., Degado S. A., Nordal S., Karstunen M. Modeling creep and rate effects in structured anisotropic soft clays. *Acta Geotechnica*. 2010, vol. 5, pp. 69 – 81. DOI: 10.1007/s11440-010-0119-y.
46. Herle I., Gudehus G. Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1999, vol. 4, no. 5, pp. 461 – 486.
47. Chmelnizkij A., Nagula S., Grabe J. Numerical simulation of deep vibration compaction in Abaqus/CEL and MPM. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 175, pp. 302 – 309. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.031.
48. Mašin D. Clay hypoplasticity with explicitly defined asymptotic states. *Acta Geotechnica*. 2013, vol. 8, pp. 481 – 496. DOI: 10.1007/s11440-012-0199-y.
49. Mašin D. Clay hypoplasticity model including stiffness anisotropy. *Géotechnique*. 2014, vol. 64, no. 3, pp. 232 – 238. DOI: 10.1680/geot.13.P.065.
50. Mašin D., Rott J. Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*. 2014, vol. 9, pp. 299 – 312. DOI: 10.1007/s11440-013-0271-2.
51. Dashko R. E. *Inzhenerno-geologicheskiiy analiz i otsenka vodonasyshchennykh glinistykh porod kak osnovaniya sooruzheniy* [Engineering geological analysis and assessment of water-saturated clayey rocks as foundations for structures], Saint-Petersburg, Institut «PI Georekonstruktsiya», 2015.
52. *ODM 218.4.4.002-2020 Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu sushchestvuyushchikh nasypov iz slabyykh i obvodnennykh gruntov pri rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog*, available at: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/218.4.4.002-2020.pdf> (accessed 20.03.2023). [In Russ].
53. *BS 1377-7 Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (total stress)*, available at: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details?id=6754255> (accessed 20.03.2023). [In Russ].
54. *GOST 12248.3-2020. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruemosti metodom trekhnosnogo szhatiya*. Soils. Determination of strength and deformation parameters by triaxial compression testing, available at: <https://docs.cntd.ru/document/566409062> (accessed 20.03.2023). [In Russ].
55. *GOST 34276-2017. Metody laboratornogo opredeleniya udel'nogo soprotivleniya penetratsii*. Soils. Methods of laboratory determination of the specific resistance to penetration, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200157117> (accessed 20.03.2023). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карасев Максим Анатольевич¹ — д-р техн. наук,
доцент, e-mail: karasevma@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,

Поспехов Георгий Борисович¹ — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: pospehov@spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,

Астапенко Татьяна Сергеевна¹ — аспирант,
e-mail: tnastapenko@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6581-2550,
Шишкина Вероника Сергеевна¹ — студент,
e-mail: s181165@stud.spmi.ru,
¹ Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Астапенко Т.С., e-mail: tnastapenko@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.A. Karasev*¹, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: karasevma@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,
*G.B. Posphehov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: pospehov@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,
*T.S. Astapenko*¹, Graduate Student,
e-mail: tnastapenko@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6581-2550,
*V.S. Shishkina*¹, Student, e-mail: s181165@stud.spmi.ru,
¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: T.S. Astapenko, e-mail: tnastapenko@yandex.ru.

Получена редакцией 01.04.2023; получена после рецензии 06.06.2023; принята к печати 10.10.2023.
Received by the editors 01.04.2023; received after the review 06.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ С НИЗКИМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ШАХТАХ ВЬЕТНАМА (2023, № 5, СБ 2, 20 с.)

*Зубов Владимир Павлович*¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: spggi.zubov@mail.ru;
*Тхан Ван Зуи*¹ — аспирант, e-mail: thanduyvr@gmail.com; *Федоров А. С.*¹ — доцент;
*Ли Юньпэн*¹ — аспирант, e-mail: yunpengli@mail.ru, ¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Отмечена повышенная опасность очистных и подготовительных работ при отработке угольных пластов с низкими прочностными характеристиками. Исследованы причины увеличения интенсивности самопроизвольного обрушения угля из кровли пласта и забоев лав при переходе горных работ на более глубокие горизонты и при отработке пластов, в кровле которых залегают труднообрушающиеся породы. Рассмотрены типовые формы полостей, образующихся при самопроизвольном обрушении угля в призабойном пространстве лав. Сделаны выводы о перспективных направлениях совершенствования способов предотвращения обрушений угля из забоя лавы и подкровельной пачки при отработке пластов угля с низкими прочностными характеристиками.

Ключевые слова: угольные пласты, обрушение угля в лавах, мягкий уголь, низкие прочностные характеристики угля, самопроизвольное обрушения угля, влажность угля.

FEATURES OF DEVELOPMENT OF COAL SEAMS WITH LOW STRENGTH CHARACTERISTICS IN MINES OF VIETNAM
*V.P. Zubov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor; *Than Van Zui*¹, Graduate Student; *A.S. Fedorov*¹, Associate Professor;
*Li Yunpeng*¹, Graduate Student; ¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

The reasons for the increase in the intensity of spontaneous collapse of coal from the roof of the formation and the faces of lavas during the transition of mining operations to deeper horizons and during the development of layers in the roof of which hard-to-collapse rocks lie. Typical forms of cavities formed during spontaneous collapse of coal in the bottomhole space of lavas are considered. Conclusions are drawn about promising directions for improving methods for preventing coal collapses from the lava face and the under-roof pack when working out coal seams with low strength characteristics.

Key words: coal seams, collapse of coal in lavas, soft coal, low strength characteristics of coal, spontaneous collapse of coal, humidity of coal.