

ПРОЧНОСТЬ ГРУНТОВ В РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ

Аннотация: В практике расчетов грунтовых сооружений уже давно используются геотехнические программные комплексы (Plaxis, Midas, Z-Soil, Phase2, GEO5 FEM и др.), однако действующие нормативные и рекомендательные документы не содержат четких указаний, каким образом следует их применять. В статье приводится сравнение между подходами в расчетах грунтовых сооружений в железнодорожной, автодорожной и гидротехнической отрасли на основе анализа СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений». Основная часть посвящена сопоставлению подходов к определению прочности грунтов и последующего использования ее в расчетах по предельным состояниям первой группы в программах численного моделирования.

Ключевые слова: МКЭ, численное моделирование, Plaxis, прочность грунтов, теория Терцаги, расчеты устойчивости.

Одним из основных документов для расчетов и проектирования гидротехнических объектов является СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений». Существенным отличием этого документа от действующих в авто - и железнодорожном проектировании является учет таких понятий как: полная и эффективная прочность, критерии прочности грунта (Кулона, Кулона-Мора, Мизеса-Шлейхера); сопротивление недренированному сдвигу. В целом по строительной отрасли СП 23.13330.2011 – один из немногих нормативных документов (если не единственный) – по заложенному в принципы расчетов смыслу сопоставим с современными геотехническими комплексами (например, Plaxis, Midas, Z-Soil, Phase2 и др.). Надо сказать, что обозначения коэффициента бокового давления в состоянии покоя (K_0) и степени переуплотнения грунта (OCR) полностью соответствуют понятиям, применяемым в программах численного моделирования.

Такой отличительной особенностью СП обязан своим разработчикам – гидротехникам, заложившим основу Механики грунтов в нашей стране: В.А. Флорину и П.Л. Иванову. Здесь стоит упомянуть крупнейшего специалиста

по расчетам устойчивости Р.Р. Чугаева, чьи книги содержат детальнейший анализ всех имеющихся на то время методов расчета.

В части расчетов устойчивости СП 23.13330.2011 регламентирует использование методов предельного равновесия, учитывающими все условия равновесия, что означает использование таких методов как Morgenштейн-Прайса, Спенсора, GLE [6]. А для сооружений I класса рекомендуется применять численное моделирование и нелинейные модели грунтов. Это единственный нормативный документ (в автодорожном строительстве есть аналог - ОДМ 218.2.006-2010 «Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог», но он не относится к нормативным), рекомендуемый наряду с детерминистическими методами расчета устойчивости использовать вероятностные методы оценки надежности и отказов. В транспортном строительстве этот подход только начинает практиковаться.

Пункт 7.15 СП 23.13330.2011 для определения устойчивости сооружений на основаниях, сложенных пылевато-глинистыми грунтами с коэффициентом водонасыщения $S_r > 0.85$, рекомендует учитывать нестабилизированное состояние грунтов двумя способами, в зависимости от используемой теории прочности. В инженерном приложении механики грунтов для слабых водонасыщенных оснований грунт рассматривается двухфазная система: вода+минеральная часть. Расчеты по трехкомпонентной схеме (вода+воздух+минеральная часть) существуют, но являются на сегодняшний день малораспространенными в виду малой изученности и сложности.

По своей сути Свод правил по проектированию гидротехнических объектов регламентирует применение двух подходов к определению прочности грунтов:

- теорию плотности-влажности Н.Н. Маслова, в которой влажность выступает аналогом порового давления, а прочность определяется в полных напряжениях;

- теорию К. Терцаги, в которой прочность определяется эффективными характеристиками (что соответствует полностью консолидированному состоянию), а в процессе нагружения прочность определяется с учетом избыточного порового давления.

Пользователи таких программных комплексов как Plaxis, Midas, Z-Soil, Phase2 и пр. сталкиваются с вопросом: как в этих программах осуществляется повышение прочности грунта в процессе уплотнения грунтов основания, ведь в них нет такого расчетного параметра, как влажность. Для того чтобы разобраться в этом вопросе, необходимо произвести сопоставление методов испытаний, предназначенных для установления параметров в обеих теориях.

При сопоставлении результатов теории «плотности-влажности» Н.Н. Маслова и первоначальной теории К. Терцаги видно (рис. 1), что они хорошо согласуются между собой [4], разница между ними заключается лишь в интерпретации данных. Современные программные продукты, зарубежного исполнения, благодаря возможностям компьютерной техники [2], реализуют более сложную теорию К. Терцаги, в то время как действующие отечественные методики расчетов [5] основаны на теории Н.Н. Маслова.

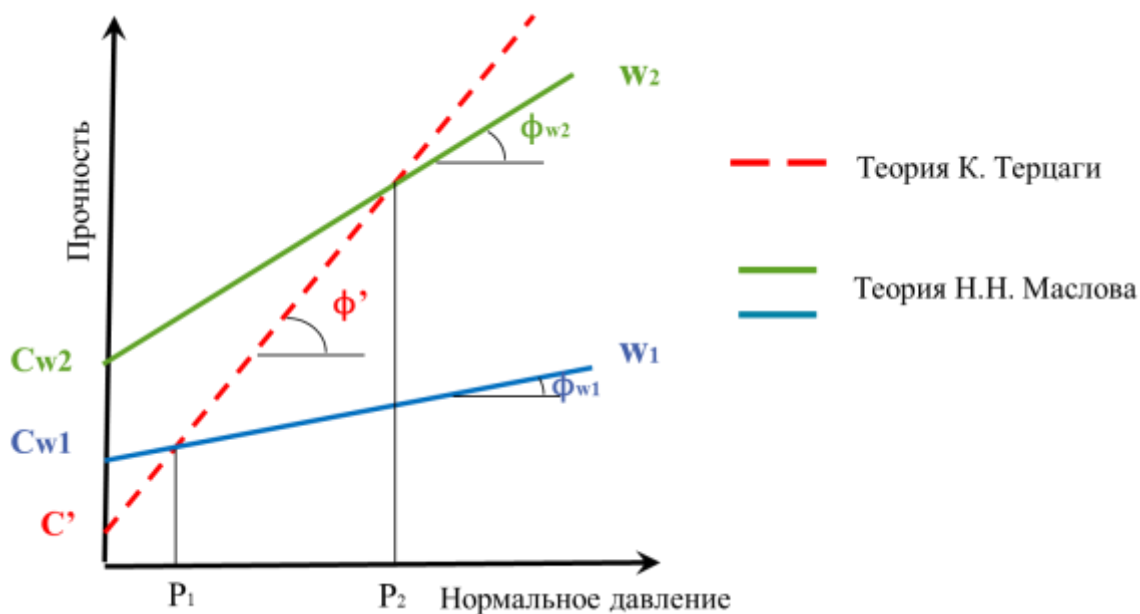


Рис. 1 Сопоставление двух теорий прочности

По результатам проведения испытаний, в теории Н.Н. Маслова производятся преобразования с целью получения графиков зависимости прочностных характеристик от влажности (рис. 2).

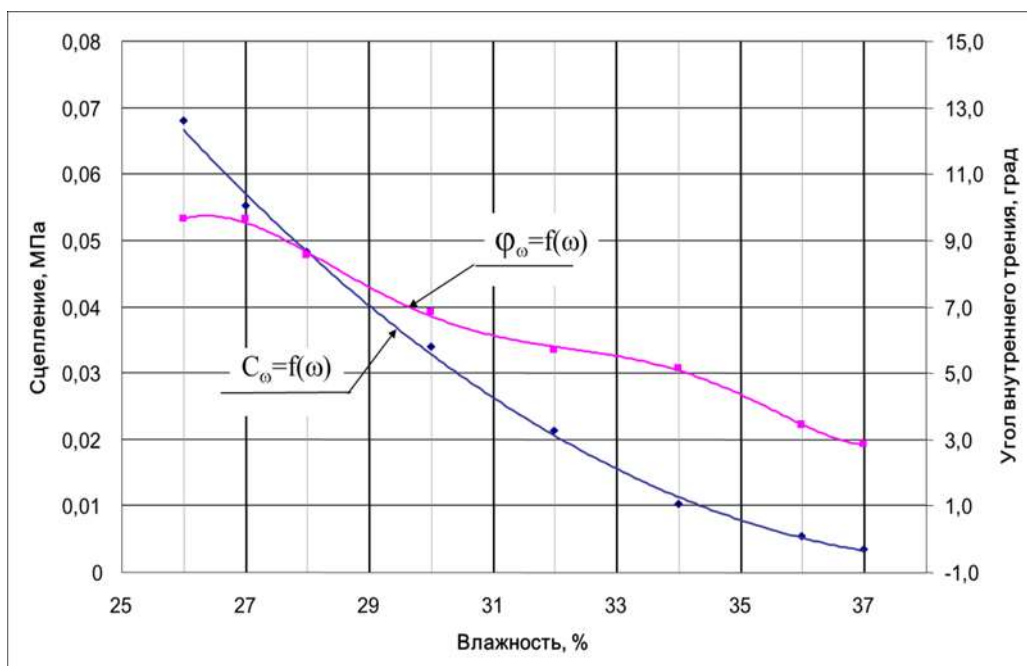


Рис. 2 Результаты испытаний по методу Н.Н. Маслова [7]

Принцип расчета заключается в следующем: определяют напряжения от грунтового сооружения с учетом взвешивающего действия грунтовых вод, по необходимым дополнительным графикам зависимости влажности от давления определяют изменение влажности в процессе отсыпки насыпи и далее по графикам рис. 2 определяют изменение трения и сцепления в грунтах основания.

Таким образом, расчетные характеристики грунтов должны быть приняты для определенного состояния увлаженности грунтов, т.е. при конкретной величине влажности w_B . На практике (в области транспортного строительства) проектировщик часто принимает для расчета значения из сводной таблицы физико-механических свойств грунтов отчета по инженерным изысканиям, при этом не всегда понятно, что это за значения: получены они при естественной влажности или для водонасыщенных образцов; был это быстрый или медленный срез. Отсутствие такой информации значительно снижает эффективность расчетов [8].

Геотехнические программные комплексы, например Plaxis, основываются на проведении испытаний в приборах трехосного сжатия (стабилометров) по трем схемам: КД – консолидированно-дренированное, НН – неконсолидированно-недренированное и КН – консолидированно-дренированное (подробнее можно прочитать в [1]). Поскольку все отечественные представления проектировщиков, занимающихся расчетами земляного полотна, основаны на теории «плотности-влажности» Н.Н. Маслова, то возникают определенные сложности и пониманием принципов работы программ класса Plaxis.

На рисунке 3 показаны результаты прочностных испытаний грунтов по теории Н.Н. Маслова: три образца грунта подвергались трем разным уплотняющим давлениям σ_{n1} , σ_{n2} , σ_{n3} , в результате чего происходило изменение плотности-влажности и, следовательно, прочности τ .

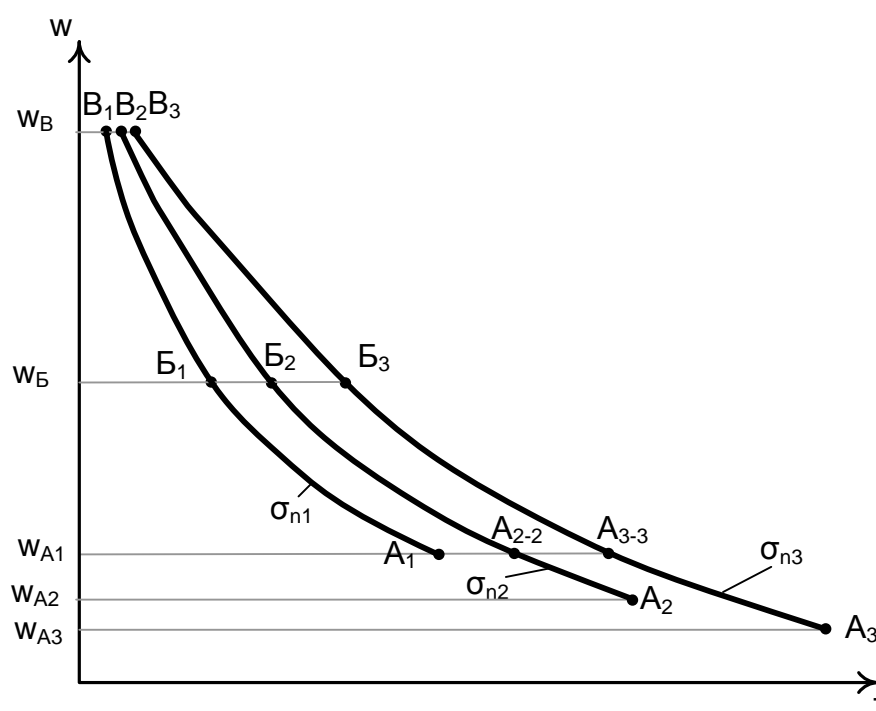


Рис. 3 Графики испытаний по методу плотности-влажности

Анализ графиков Н.Н. Маслова (рис. 3) показывает, что возможны следующие состояния прочности грунтов:

1. Для водонасыщенных грунтов в естественном состоянии прочность определяется влажностью w_B и соответствующей линией предельной прочности (рис. 4).

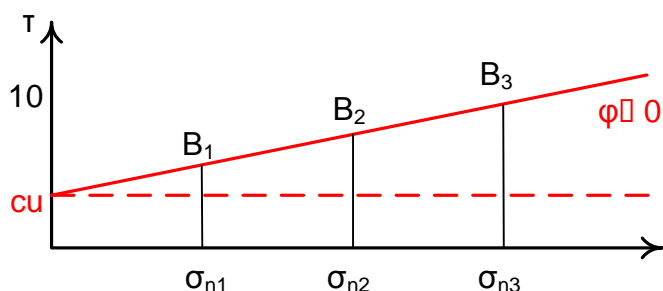


Рис. 4 Неконсолидированно-недренированные испытания или быстрый сдвиг

Если степень водонасыщения превышает $S_r=0.85$, то грунт считается водонасыщенным и его прочность характеризуется недренированной прочностью c_u , а предельная огибающая будет в виде горизонтальной линии с углом внутреннего трения равным нулю (на рис. 4 показано пунктиром). Однако в силу конструктивных особенностей при проведении испытаний в распространенных приборах одноплоскостного среза, предельная огибающая будет характеризоваться линией с небольшим углом наклона (углом внутреннего трения). Это состояние относится к нестабилизированному, а недренированная прочность используется при расчетах быстрого возведения грунтового сооружения. Точки B_1, B_2, B_3 определяются неконсолидированно-недренированными испытаниями (НН) или полевым испытанием с помощью крыльчатки.

2. Точки A_1, A_2, A_3 (рис. 5) соответствуют стабилизированному состоянию, т.е. максимальной прочности при данной нагрузке. Это испытания по консолидированно-дренированной схеме (КД), а прочность при этом определяется эффективными характеристиками φ' и c' и соответствует состоянию полной консолидации при приложенной нагрузке.

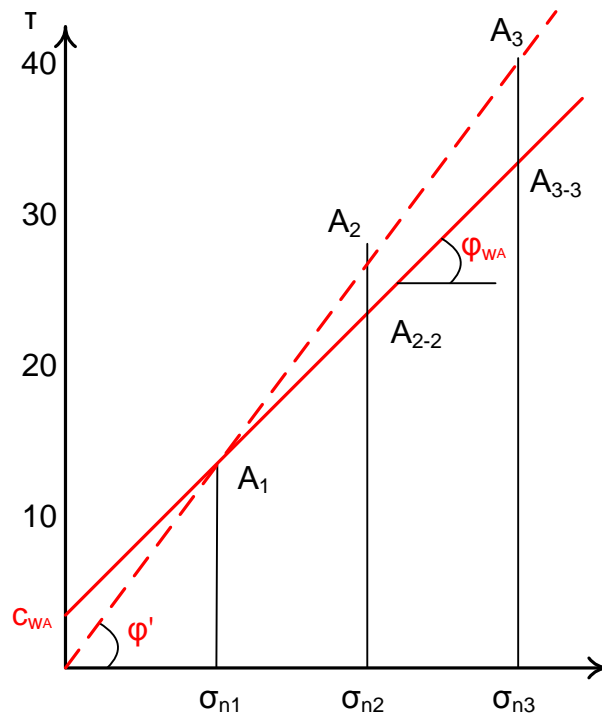


Рис. 5 Консолидированно-дренированные испытания или медленный сдвиг

Точки A_{2-2} , A_{3-3} соответствуют прочности грунта при влажности w_A и определяются соответствующими параметрами прочности.

Здесь стоит отметить высказывание Н.Н. Маслова о неправомерности использования известного выражения Кулона (получаемого по результатам КД испытаний в виде точек A_1 , A_2 , A_3) для начальной и промежуточной стадии нагружения водонасыщенного основания. В [4] говорится о том, что игнорирование этого высказывания не раз приводило строителей и инженеров-геологов к тяжелым непоправимым ошибкам.

Действительно, использование прочности грунтов в точках A_1 , A_2 , A_3 (рис. 3) для оценки начального или промежуточного состояния водонасыщенных слабых грунтов будет давать завышенные значения коэффициента устойчивости по сравнению с прочностью в промежуточных точках Б или В.

В автодорожной практике расчеты по первому предельному состоянию основаны на теории плотности-влажности Н.Н. Маслова. С одной стороны это упрощает расчеты, поскольку нет необходимости определять полные и эффективные напряжения и поровое давление (оно заменено эквивалентом –

влажностью), а с другой – возникает ряд вопросов: испытания по этому методу более длительные; требуется дополнительные данные в виде зависимости влажности от давления, а главное – как в основании сооружения будет распределяться влажность, а, следовательно, и прочность, ведь давление отличается как по глубине, так и по горизонтам.

Что касается расчетов промежуточного состояния (метод предварительной консолидации), то альтернативой итерационным и требующим дополнительных данных расчетам по Пособию [5] может стать численное моделирование [6]. Например, программа *Plaxis* использует тип поведения материалов *Undrained A*, который позволяет выполнять расчеты консолидации с упрочнением грунта. Для задания этой модели поведения требуются эффективные характеристики c' и ϕ' . Такими характеристиками для рассматриваемого ниже примера будут следующие: $c'=7,5$ и $\phi'=40$; эти значения получены в результате консолидированно-дренированных испытаний.

В водонасыщенных глинистых грунтах это состояние будет достигнуто через довольно длительный период, определяемый расчетом времени консолидации. А в момент после приложения нагрузки все давление будет принято поровой водой и эффективные напряжения будут определяться разницей между полными и поровым давлением. Построения на рисунке 6 выполнены для промежуточного состояния (влажность грунта $w=42\%$) с показателями прочности $c_w=46$ кПа и $\phi_w=24^\circ$ (по Н.Н. Маслову). В программе *Plaxis* это состояние достигается расчетом консолидации (снижение избыточного порового давления) до степени консолидации $U=50\%$ под нагрузкой 200 кПа. В результате эффективные напряжения составили: $\sigma'_1=100$ кПа, $\sigma'_3=43$ кПа (полные $\sigma_1=200$ кПа, $\sigma_3=122$ кПа), а максимальная прочность $\tau_{max}=51$ кПа. Как видно по рисунку 6 прочность, полученная в *Plaxis* (теория К. Терцаги) для исходных характеристик $c'=7,5$ и $\phi'=40$ (круг 2 на рисунке 6) равна прочности по уравнению Кулона-Мора для характеристик $c_w=46$ кПа и $\phi_w=24^\circ$ (теория Н.Н. Маслова). Таким образом,

рассматриваемые теории сопоставимы, но требуют задания разных исходных данных и понимания основополагающих принципов.

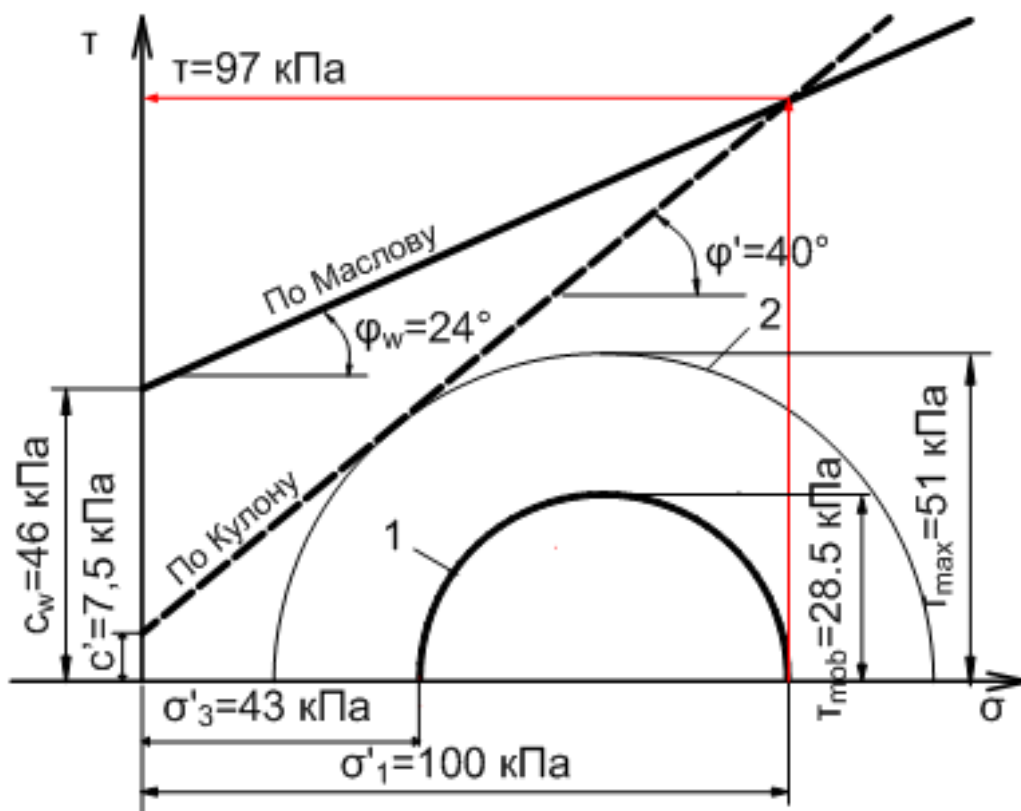


Рис. 6 Сопоставление прочности по Маслову и Кулону для промежуточного состояния (20% консолидации): 1 – мобилизованная прочность; 2 – максимальная прочность

Расчет режима постепенного возведения насыпи на водонасыщенном основании должен производиться с учетом взаимосвязи показателей влажности, прочности и осадки слабых грунтов. Такой принцип расчета требует: во-первых, наличия дополнительных данных от грунтовой лаборатории; во-вторых, наличия двух программ: а) для расчета напряжений, осадки, времени консолидации, б) для расчета устойчивости; а в-третьих, выполнения непростых итерационных расчетов.

Если сопоставить графики для стабилизированного и промежуточного состояния на одном рисунке, то более обоснованно можно производить сравнение двух теорий прочности с использованием вариантов прочности, принятых в программе Plaxis (рис. 7).

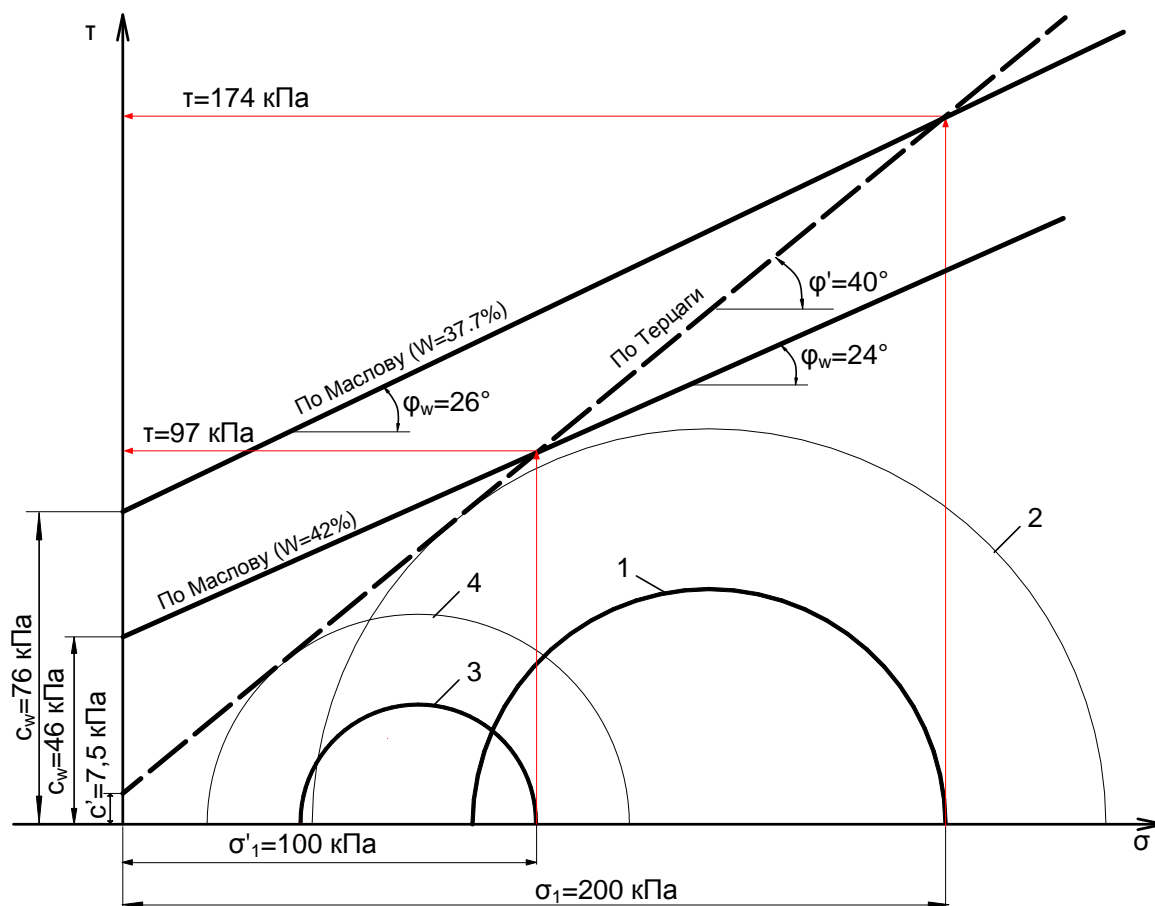


Рис. 7 Сопоставление параметров прочности: 1 – мобилизованная прочность в полных напряжениях или для дренированных условий нагружения; 2 – максимальная прочность для круга 1; 3 – мобилизованная прочность в эффективных напряжениях для промежуточного состояния (степень консолидации 20%); 4 – максимальная прочность для круга 3

По рисунку 7 можно проследить следующий ход размышлений:

1. **Конечное (стабилизированное) состояние.** Нагружение образца в условиях полного дренирования до давления 200 кПа – показано в виде круга Мора с номером 1; этому напряженному состоянию соответствует максимальная прочность, показанная кругом с номером 2. Эта прочность получена по условию Кулона-Мора (с использованием главных напряжений), ей соответствует прочность по условию Кулона (только с использованием нормального напряжения), равная 174 кПа. Причем как с характеристиками по Н.Н. Маслову при влажности $w=37.7\%$, так и по характеристикам по К. Терцаги значения идентичны.

2. **Промежуточное состояние.** Нагружение водонасыщенного образца и последующая консолидация под нагрузкой 200 кПа до степени 50%,

представлены в виде круга Мора с номером 3 (в эффективных напряжениях), которому соответствует максимальная прочность, показанная кругом с номером 4. Аналогично предыдущему состоянию прочность по условию Кулона-Мора (в главных напряжениях) и по Кулону (только с использованием нормального напряжения) отличаются, но в одной системе, т.е. по Кулону прочность с характеристиками принятыми по К.Терцаги равна прочности с характеристиками по Н.Н. Маслову (97 кПа).

Заключение

В последнее время появилось много программ, работающих на основе метода конечных элементов. Разработчики программных средств всячески рекламируют преимущества своих продуктов, однако с точки зрения эффективности применения современных геотехнических комплексов все зависит от уровня знаний и понимания пользователей. Разработчики проводят обучение преимущественно работе с самой программной оболочкой, либо дают только общее (не специализированное) представление о нелинейной механике грунтов и используемых моделях. Это обстоятельство снижает общий уровень доверия к программам и их распространение в геотехнической практике.

Нормативные документы по расчетам грунтовых сооружений в гидротехническом строительстве, в том числе издания до актуализации, написанные в Советском Союзе, на сегодняшний день, с появлением современных программ численного моделирования, не потеряли своей актуальности. Но современные представления в области Механики грунтов требуют использования более сложных инструментов, таких как программы расчетов по методу конечных элементов, которые позволяют выполнять детальный анализ и прогнозирование. Сегодня требуется пересмотр системы обучения студентов и повышения квалификации действующих специалистов с целью гармонизации документов прошлых лет с современными представлениями в области геотехники. Все предпосылки были сформированы еще при создании нормативных документов, и сейчас

требуется выполнить «привязку» заложенной основы к используемым программным продуктам.

Литература

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.
2. Вавринюк Т.С. Федоренко Е.В. Результаты инженерных изысканий, как основа для расчетов транспортных сооружений. Инженерные изыскания Издательство: Геомаркетинг (Москва) ISSN: 1997-8650. - 2014. - №3. - С. 46-49
3. Иванов, П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов. - М. : Высшая школа, 1985.
4. Маслов, Н.Н. Механика грунтов в практике строительства Текст. М. : Стройиздат, 1977. - 244 с.
5. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. М., 2004. 205 с
6. Федоренко Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик. Транспорт Российской Федерации №6 (49) 2013 с. 24-26
7. Экзогенные геологические процессы и их влияние на транспортное освоение территории: на примере Юго-Западного Приморья Автореф. дисс. на соиск. уч степ. канд. геол.-мин. наук, Хабаровск.: ДВГУПС, 2007. 25 с
8. Электронный ресурс: <http://miakoming.ru/forum/>