



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>
УДК 624.131.523



ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВСАСЫВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ НЕПОЛНОСТЬЮ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА

М.А. НОВГОРОДОВА^{1,*}, Д.Н. ГОРОБЦОВ¹, А.С. УШАКОВ²

¹ *Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия*

² *Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова — структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство»»
6, стр. 12, 2-я Институтская ул., г. Москва 109428, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрены основные аспекты влияния давления всасывания на устойчивость склона с примером расчета в программном обеспечении Plaxis. Авторы детально рассматривают особенности поведения ненасыщенного и насыщенного грунта, а также представляют модель описания поведения насыщенного грунта под воздействием этого давления.

Цель. Советские гидрофизики и почвоведы активно исследовали зависимость между капиллярно-сорбционным (структурным, или матричным [2]) давлением воды в грунте и влажностью. Однако с внедрением в инженерно-геологическую практику расчетов устойчивости склонов зарубежных методик и основанного на них программного обеспечения возникает вопрос — влияет ли давление всасывания глинистых грунтов на устойчивость склона?

Материалы и методы. Основным материалом выполненного исследования являются суглинки московского оледенения, а в качестве основы для моделирования выбрана модель Муалема — Ван Генухтена.

Результаты. Моделирование показало, что давление всасывания и капиллярность непосредственным образом влияют на коэффициент устойчивости склона (при условии, что остальные параметры моделей идентичны между собой).

Ключевые слова: механика неводонасыщенных грунтов, характеристическая кривая грунт — вода SWCC, модель Муалема — Ван Генухтена, расчет устойчивости склона

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Новгородова М.А., Горобцов Д.Н., Ушаков А.С. Влияние давления всасывания глинистых неполностью водонасыщенных грунтов на устойчивость склона. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2024;66(2):69—79.

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>

Статья поступила в редакцию 15.04.2024

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

INFLUENCE OF SUCTION PRESSURE OF CLAY UNSATURATED SOILS ON SLOPE STABILITY

MARGARITA A. NOVGORODOVA^{1,*}, DENIS N. GOROBTSOV¹, ANDREY S. USHAKOV²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC
6, p. 12, 2nd Institutskaya str., Moscow 109428, Russia*

ABSTRACT

Background. The main aspects of the influence of suction pressure on slope stability are considered; an example of calculations in the Plaxis software is presented. Specific features in the behavior of unsaturated and saturated soils are described. A model for describing the behavior of saturated soil under the influence of suction pressure is proposed.

Aim. Soviet hydrophysic and soil scientists actively explored the relationship between capillary-sorption (structural or matrix) water pressure in the soil and humidity. However, the introduction of foreign methods and software based thereon into the engineering and geological practice of calculating the stability of slopes has raised the question about the influence of suction pressure of clay soils on the stability of slopes.

Materials and methods. The main research material was loams of the Moscow glaciation. Simulation was carried out based on the Mualllem — van Genuchten model.

Results. The simulation results showed that suction pressure and capillarity directly affect the slope stability coefficient, provided that the similarity of other model parameters.

Keywords: unsaturated soil mechanics, soil–water characteristic curve SWCC, Mualllem — van Genuchten model, slope stability calculation

Conflict of interest: financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N., Ushakov A.S. Influence of suction pressure of clay unsaturated soils on slope stability. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):69—79. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>

Manuscript received 15 April 2024

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Одним из важных факторов, который может оказать влияние на устойчивость склона, сложенного глинистыми неводонасыщенными грунтами, является давление всасывания глинистых грунтов. В данной работе рассмотрены основные аспекты этого явления, его влияние на характеристики грунта, а также представлена модель описания поведения грунта под воздействием давления всасывания.

Теория

Ненасыщенный грунт представляет собой многофазовую систему, состоящую из твердых частиц, воды, газов и сократительной оболочки — уникальной фазы границы раздела воздух — вода [8].

Поведение полностью насыщенного грунта определяется полным напряжением и поровым давлением воды через эффективное напряжение [3]. В случае насыщенных грунтов возникает положительное поровое давление воды, которое расталкивает частицы и уменьшает прочность грунта. Положительное поровое давление создает условия для притяжения воды к частицам грунта и образования связей между ними, т.е. абсорбции — процесса поглощения воды всем объемом грунта.

В ненасыщенном грунте пустоты заполняются воздухом и водой, в результате чего силами поверхностного натяжения создается отрицательное поровое давление воды. Это воздействие

способствует сжатию частиц грунта и увеличению его прочности. Комплексное понимание этих процессов и их моделирование имеют важное значение для правильной оценки состояния грунта и его поведения в различных условиях.

В однородной модели насыщенного грунта, как показано на рисунке 1, две фазы — вода и твердые частицы — сосуществуют и разделяют пространство в зависимости от пористости грунта. Все переменные в этой модели непрерывны и зависят от пространства и времени.

В однородной модели ненасыщенного грунта (рис. 2) существуют три фазы: вода, воздух и твердые частицы. Пространство также разделяется в зависимости от пористости грунта и объемного содержания воды. Все переменные в этой модели также являются непрерывными и зависят от пространства и времени.

Абсорбция воды именно глинистыми грунтами способствует возникновению капиллярности. Капиллярность — это явление подъема или опускания жидкости в узких каналах (капиллярах) под воздействием сил поверхностного натяжения, т.е. вода, попадая в поры грунта, движется по капиллярам — маленьким трубкам. Капиллярность играет важную роль в ненасыщенном грунте, особенно в грунтах, содержащих глинистые частицы, которые имеют большую площадь поверхности, что позволяет им активно поглощать воду и другие вещества. В порах грунта, имеющих различные размеры и формы, можно концептуально рассмотреть капиллярные трубки с различными радиусами. Равновесие кривизны менисков [4] возможно только в порах определенного размера, соответствующего данному капиллярному давлению.

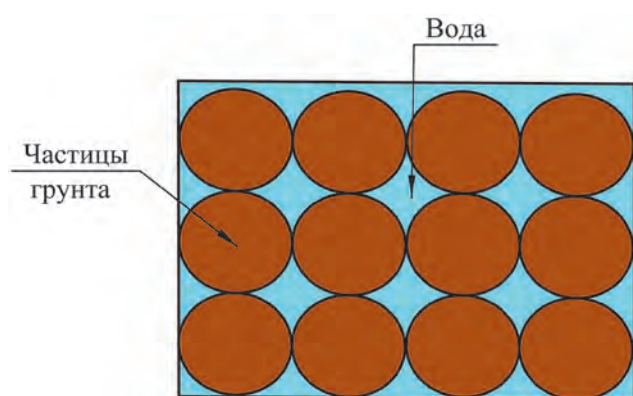


Рис. 1. Однородная модель насыщенного грунта
Fig. 1. Homogeneous saturated soil model

Давление всасывания — это отрицательное давление, которое возникает в порах грунта, частично насыщенного водой, в результате капиллярного поднятия воды. В глинистых грунтах капиллярность и давление всасывания являются двумя связанными понятиями, ведь оба явления возникают из-за действия сил на границе раздела между грунтом и водой. Поскольку капиллярность и давление всасывания определяют способность грунта удерживать влагу и сохранять свою структуру, то это, в свою очередь, влияет на физико-механические свойства глинистых грунтов. При этом большинство грунтов имеют остаточное содержание влаги из-за механизма удержания воды, отличного от капиллярности, называемого адсорбцией.

Адсорбция и абсорбция являются процессами поглощения одного вещества другим. В случае адсорбции вещество поглощается на поверхности другого вещества, а в случае абсорбции — проникает в объем. Ненасыщенные глинистые грунты представляют собой грунты, которые имеют высокую адсорбционную способность. Адсорбция может влиять на всасывание в грунтах, улучшая или ухудшая их водоудерживающую способность [16,18].

Давление всасывания возникает при изменении водосодержания в глинистых грунтах и представляет собой разность между атмосферным давлением и давлением в порах грунта. Если оно будет положительным, это может привести к снижению устойчивости склонов, так как вода, проникающая в поры грунта, увеличивает его влажность и снижает сцепление между частицами.

Для описания поведения воды и процессов, происходящих в ненасыщенных глинистых грунтах, используется уравнение Ричардса [1].

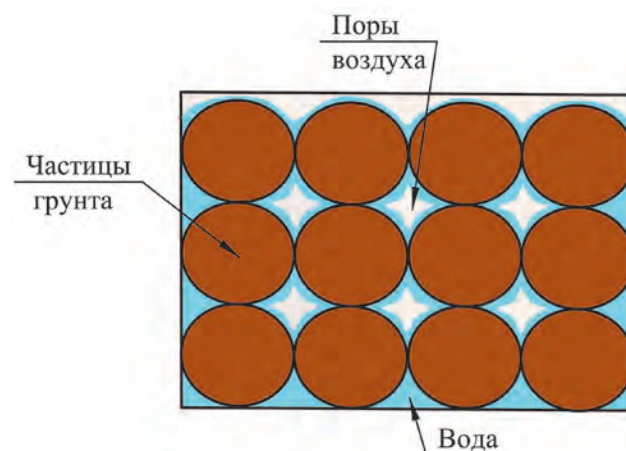


Рис. 2. Однородная модель ненасыщенного грунта
Fig. 2. Homogeneous unsaturated soil model

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]. \quad (1)$$

Для решения уравнения Ричардса необходимы замыкающие соотношения (модели водоудерживающей способности). Для этого используются алгебраические уравнения связи высоты всасывания ψ с влагосодержанием θ , называемые капиллярными соотношениями. Также нужны соотношения, связывающие коэффициент фильтрации $K(\psi)$ и высоту всасывания ψ . Одним из достаточно успешных вариантов решения является уравнение Муалема — Ван Генухтена. Модель ван Генухтена представляет собой математическую формулу, которая позволяет рассчитать объемную влажность грунта на основе его пористости, коэффициента влагопроводности (коэффициент влагопроводности аналогичен коэффициенту фильтрации, но применяется он для ненасыщенных грунтов) и других параметров. Таким образом, имеется подход к моделированию порового давления в ненасыщенных грунтах, учитывающий изменение пористости грунта и его проницаемости в зависимости от уровня влажности. Одна из широко используемых формулировок имеет вид [1]:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m}, & \psi < 0; \\ \theta_s, & \psi \geq 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$K(\psi) = K_s S_{e,s}^l \left[1 - \left(1 - S_{e,s}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2, \quad S_{e,s} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

где $S_{e,s}$ — эффективная насыщенность;
 θ_r и θ_s — остаточное (т.е. не извлекаемое гравитационным путем) влагосодержание и влагосодержание при полном насыщении соответственно;
 K_s [м/сут] — коэффициент фильтрации в условиях насыщения;
 α [м⁻¹] — параметр модели, функция размера пор;
 n — коэффициент распределения размеров пор;
 $m = 1 - 1/n, n > 1$;
 l — параметр связности пор.

Решение модели Муалема — Ван Генухтена представлено в программном обеспечении Plaxis для геотехнических расчетов, но для этого необходимо использовать характеристическую кривую «грунт — вода» SWCC, построенную на основе лабораторных испытаний или принятую по рекомендациям для разных типов грунтов (рис. 3).

SWCC — интерпретирующая модель, которая использует элементарную капиллярную модель для обеспечения понимания распределения воды

в пустотах. Первоначально SWCC рассматривалась как средство оценки всасывания грунта в полевых условиях путем измерения содержания свободной воды и использования SWCC в качестве фиксированной зависимости между всасыванием и содержанием воды (рис. 4).

Связь кривой SWCC и влажности может быть выражена через параметр «структурное всасывание», который учитывает поровое давление воды в грунте, в том числе отрицательное. Таким образом, характеристическая кривая «грунт — вода» SWCC представляет собой отношение между структурным всасыванием (энергетическим потенциалом) и содержанием воды (гравиметрическим или объемным) или степенью водонасыщения (S_e) [17]. Для построения кривой необходимо определить структурное всасывание грунта в зависимости от влажности.

Структурное всасывание, или энергетический потенциал, представляет собой изменение свободной энергии в единице объема воды при изотермическом переходе из состояния связанной воды в состояние свободной воды и определяется в репрезентативном элементарном объеме грунт — вода — воздух. Структурное всасывание широко рассматривается как наиболее фундаментальная физическая переменная, определяющая поведение ненасыщенного грунта, в том числе эффективное напряжение, прочность на сдвиг, давление набухания, снижение температуры замерзания и теплопроводность.

В этом исследовании для определения, как общего, так и структурного всасывания [17, 20] выбран метод фильтровальной бумаги по причине простоты выполнения испытания, широкого диапазона измеряемых значений и достаточного количества апробации [14].

Метод основан на водопоглощающих свойствах фильтровальной бумаги, используемой в качестве фильтра. Путем взаимодействия с грунтовой средой фильтровальная бумага либо десорбирует, либо абсорбирует влагу до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между фильтровальной бумагой и образцом грунта [13].

Влияние давления всасывания на устойчивость склона

Как уже говорилось выше, давление всасывания и капиллярность могут оказывать влияние на физико-механические свойства грунтов, а они, в свою очередь, воздействуют на величину коэффициента устойчивости склона. В качестве практического примера влияния давления

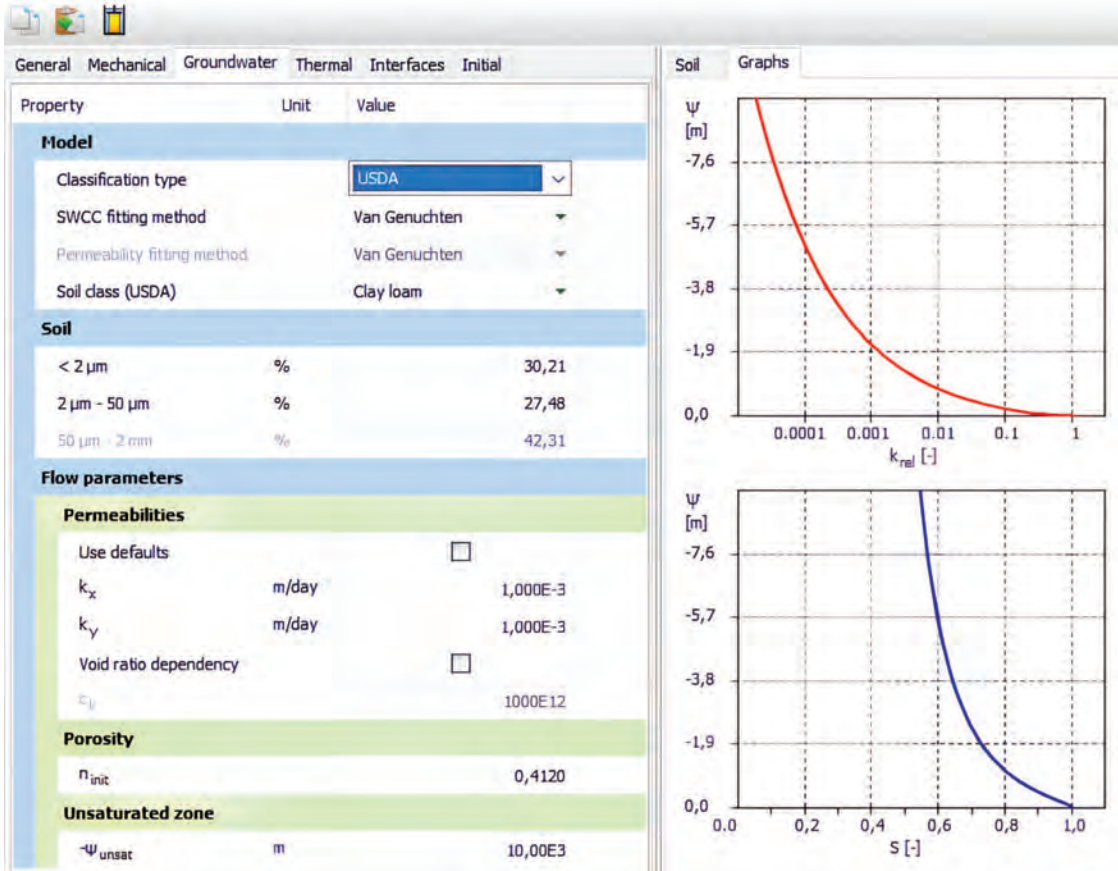


Рис. 3. Пример предлагаемой стандартизированной SWCC для тяжелых суглинков
 Fig. 3. Example of a proposed standardized SWCC for heavy loams

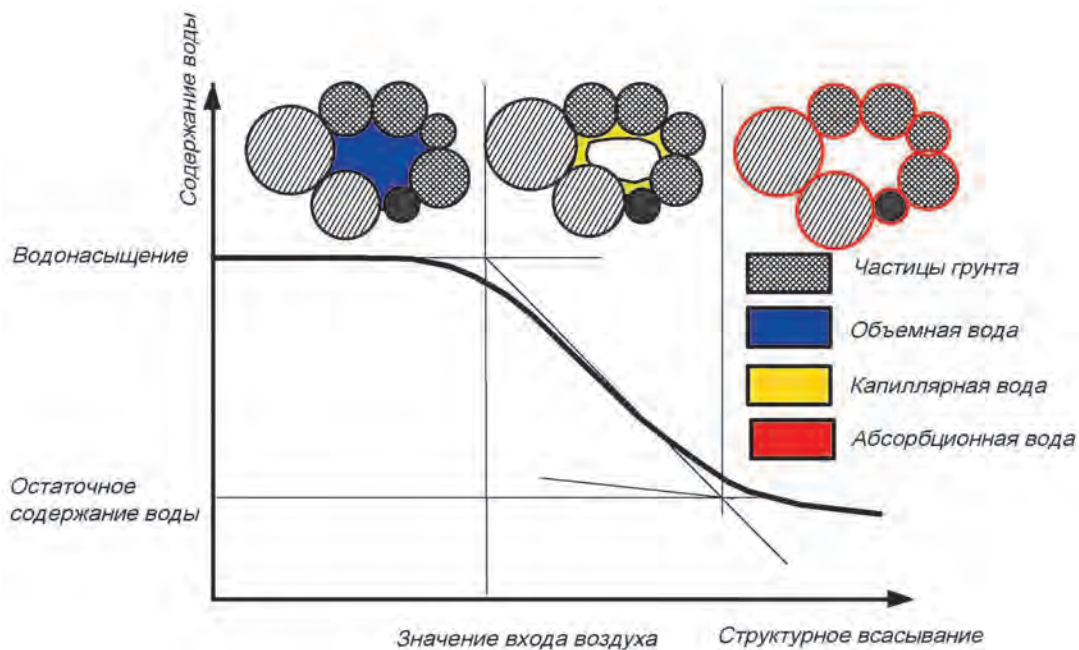


Рис. 4. Различные механизмы удержания воды в ненасыщенном грунте
 Fig. 4. Various mechanisms of water retention in unsaturated soil

Таблица. Физико-механические свойства исследуемого грунта
Table. Physico-mechanical properties of the studied soil

Влажность, д. е.			Число пла- стич- ности, I_p , д. е.	Пока- затель теку- чести, I_L , д. е.	Плотность, г/см ³			Пори- стость грунта, n , д. е.	Кoeffи- циент пористо- сти, e , д. е.	Кoeffи- циент водона- сыщения, S_r , д. е.
есте- ственная (природ- ная), w_e	на гра- нице текуче- сти, w_L	на границе раскаты- вания, w_p			грун- та, ρ	сухого грун- та, ρ_d	частиц грунта, ρ_s			
0,241	0,295	0,164	0,125	0,59	1,98	1,62	2,72	0,41	0,701	0,93

Прочность			Деформируемость	
Кoeffициент вн. трения, $\operatorname{tg} \phi$	Угол внутреннего трения ϕ , градусы	Уд. сцепление C , МПа	Модуль деформа- ции E , МПа	Кoeffициент Пуассона, ν
0,302	16,8°	0,025	13,2	0,41

всасывания на устойчивость склона рассмотрим объект, расположенный в г. Зеленограде.

Инженерно-геологический разрез представлен:

- современными техногенными (насыпными) накоплениями tQIV, представленными суглинками тугопластичными; песками мелкими средней плотности;
- среднечетвертичными флювиогляциальными водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями московского горизонта f,lgQII^{ms},

представленными суглинками мягко- и тугопластичными, редко заторфованными; песками мелкими средней плотности;

- среднечетвертичными ледниковыми отложениями московского горизонта gQII^{ms}, представленными суглинками тугопластичными; песками средней крупности, плотными.

При создании геомеханической модели для упрощения расчетов массив грунта представлял собой однородный грунт, сложенный

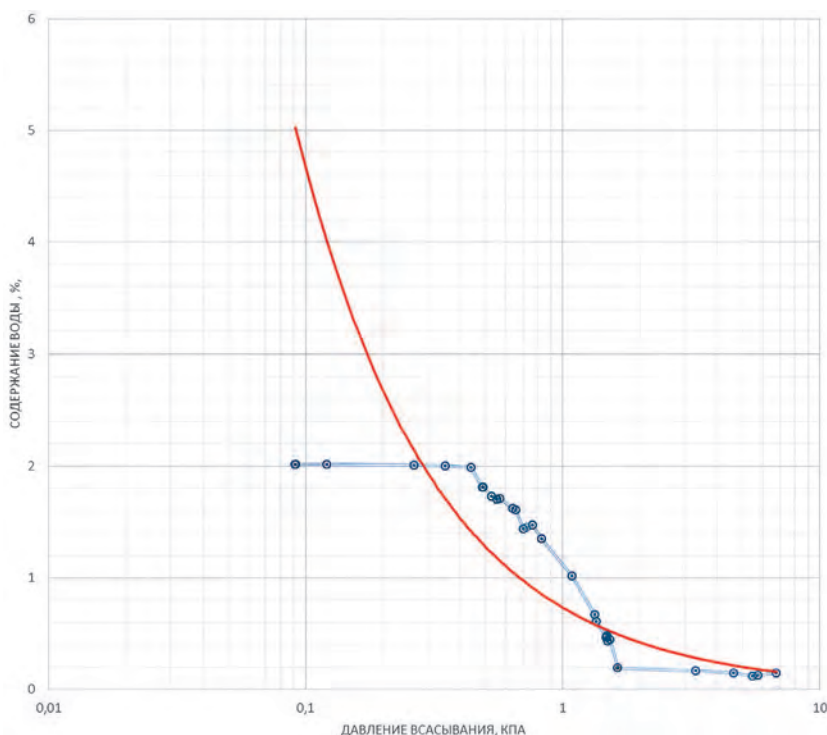


Рис. 5. Полученная характеристическая кривая «грунт — вода» SWCC для среднечетвертичных флювиогляциальных отложений

Fig. 5. Obtained characteristic soil—water curve SWCC for mid-Quaternary fluvioglacial deposits

суглинками мягко- и тугопластичными в естественном состоянии. В таблице приведены физико-механические свойства грунта.

Для рассматриваемого в модели грунта в лабораторных условиях бесконтактным и контактным методом фильтровальной бумаги [5—7, 12, 13, 19] для выборки из 30 образцов было определено содержание воды, по которым в соответствии с известной калибровочной кривой [15] получены значения полного и структурного всасывания. Далее была построена характеристическая кривая «грунт — вода» (рис. 5).

В дальнейшем в программном обеспечении Plaxis были выполнены расчеты без учета давления всасывания и с учетом давления всасывания, при этом все остальные параметры модели оставались неизменными [9—11].

Результаты моделирования представлены на рисунках 6—8.

Анализ рисунков показал, что коэффициент устойчивости склона без учета всасывания и капиллярности грунта, равен 1,46 (рис. 7). При учете всасывания и капиллярности коэффициент устойчивости повышается до 1,67 (рис. 8).

Если в процессе моделирования учитывать только давление всасывания без учета капиллярности (рис. 9), то коэффициент устойчивости составляет 1,66.

Заключение

В результате проведенного опыта можно сделать вывод о том, что давление всасывания и капиллярность могут влиять на свойства грунтов. Так, при повышении давления всасывания увеличивается влажность грунта, что может привести к снижению его прочности. Кроме того, увеличение давления всасывания может также привести к изменению структуры грунта, что также может повлиять на его свойства.

Таким образом, давление всасывания может оказывать влияние на устойчивость склона через его воздействие на физико-механические свойства грунта. Если давление всасывания приводит к увеличению влажности грунта и снижению его прочности, это может снизить коэффициент устойчивости склона и, следовательно, сделать склон менее устойчивым, что было показано в выполненном моделировании.

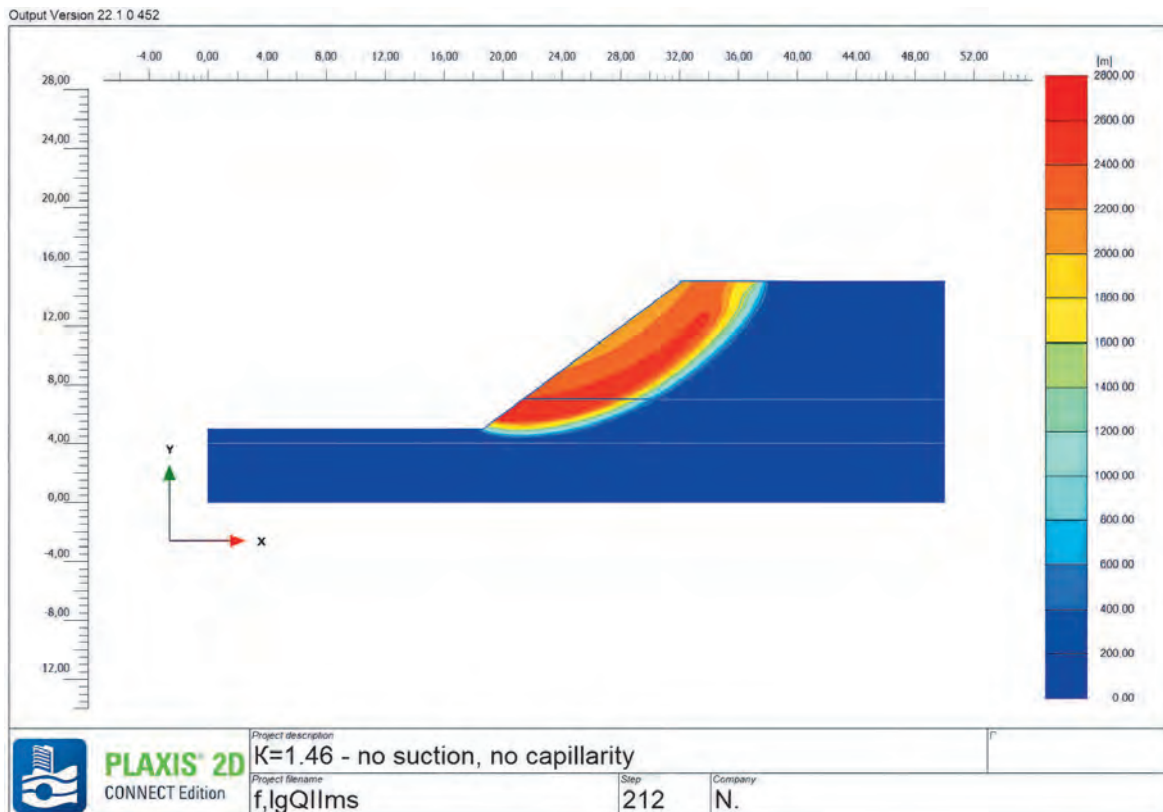


Рис. 6. Расчет устойчивости склона без учета давления всасывания и капиллярности
 Fig. 6. Calculation of slope stability without taking into account suction pressure and capillarity

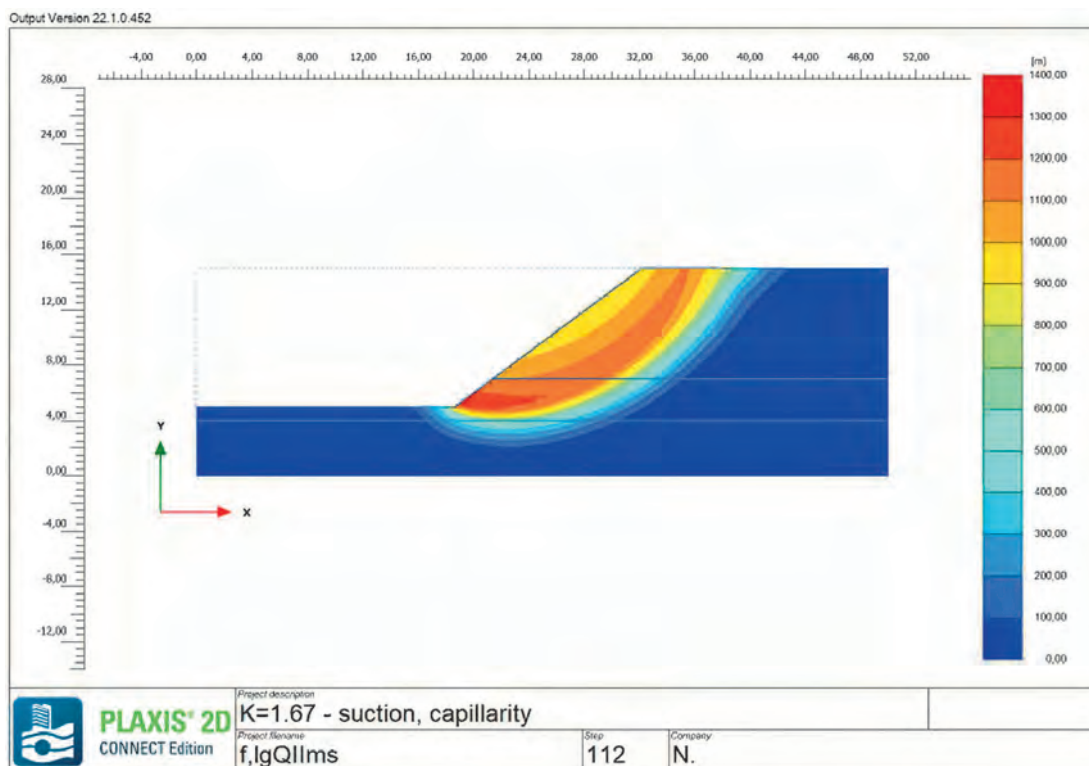


Рис. 7. Расчет устойчивости склона с учетом давления всасывания и капиллярности
Fig. 7. Calculation of slope stability taking into account suction pressure and capillarity

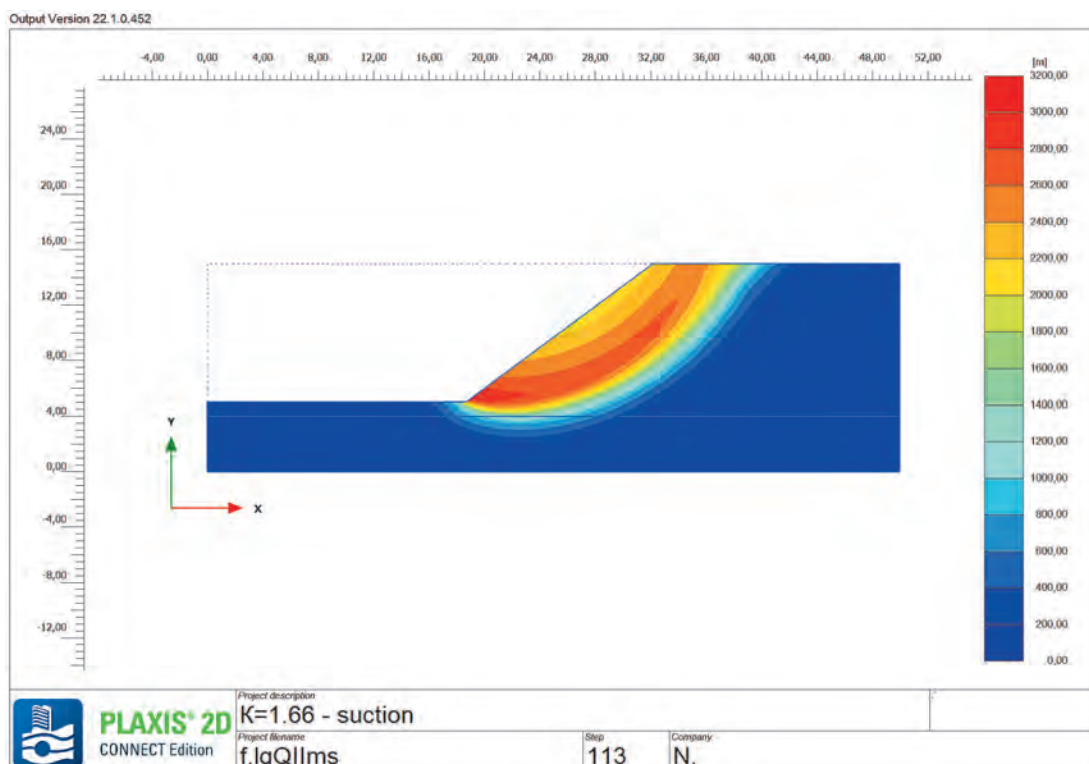


Рис. 8. Расчет устойчивости склона с учетом только давления всасывания
Fig. 8. Calculation of slope stability considering only suction pressure

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахаев А.Н., Машенькин П.А., Сидоров М.Л. Модели насыщенно-ненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации в комплексе программ «НИМФА» // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 3. С. 73—83.
2. Болдырев Г.Г., Колесников А.С., Новичков Г.А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. 2014. № 5—6. С. 78—85.
3. Гольдин А.Л., Нгуен Фьюнг Зунг. Построение траектории напряжений для ненасыщенного грунта при консолидированно-недренированных испытаниях в стабилометре // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 1—8.
4. Дугарцыренов А.В. Физико-химическая модель связной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 8. С. 80—88.
5. Мади Ахмед Йехиа Али Али. Экспериментальные исследования и моделирование динамики влажности и температуры почвы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 25 с.
6. Новгородова М.А. Определение параметров всасывания ненасыщенных грунтов методом фильтровальной бумаги // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: мат-лы 17-й общеросс. науч.-практич. конф. и выставки изыскательских организаций / Под ред. Н.А. Журавлевой и К.С. Висхаджиевой. М.: Геомаркетинг, 2022. С. 39—51.
7. Новгородова М.А., Горобцов Д.Н. Экспериментальное определение давления всасывания ненасыщенных глинистых грунтов // VI российское совещание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023». СПб.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 111—113.
8. Новгородова М.А., Горобцов Д.Н., Фоменко И.К. Теория ненасыщенных грунтов // Новые идеи в науках о Земле: мат-лы XV междунар. науч.-практич. конф. В 7 тт. М.: РГГУ им. С. Орджоникидзе, 2021. С. 273—276.
9. Скоробогатько К.В. Механика грунтов насыщенной и неводонасыщенной области грунта // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyshchennoy-oblasti-grunta/> (дата обращения: 02.03.2024).
10. Скоробогатько К.В. Моделирование свойств грунта в неводонасыщенной области выше уровня грунтовых вод // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (дата обращения: 05.03.2024).
11. Скоробогатько К.В. Влияние свойств грунта в неводонасыщенной области на результаты расчетов // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/vliyanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-na-rezultaty-raschetov/> (дата обращения: 04.03.2024).
12. ASTM D5298-03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-03>
13. ASTM D5298-2016. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
14. Fondjo A.A., Elizabeth Theron, Richard P. Ray. Assessment of Various Methods to Measure the Soil Suction // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075 (Online). Vol. 9 Iss. 12, October 2020. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L7958.1091220/>
15. Fredlund D.G., Wong D.K. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction // Geotechnical Testing Journal. 1989. No. 12(3). P. 188—194. <https://doi.org/10.1520/GTJ10967J>
16. Fredlund D.G., Rahardjo H., Fredlund M.D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. 2012. 944 p.
17. Leong E.C., He L., Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements // Geotechnical Testing Journal. 2002. No. 25(3). P. 322—333. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>
18. Lu N., Likos W.J. Unsaturated soil mechanics. 2004. Wiley. 584 p. ISBN: 978-0-471-44731-3
19. Meilani I., Rahardjo H., Leong E.C., Fredlund D.G. Mini suction probe for matric suction measurements / Canadian Geotechnical Journal. № 39(6). 2002. P. 1427—1432. <https://doi.org/10.1139/t02-101>
20. Swarbrick, G.E. Measurement of soil suction using the filter paper method // Conference: Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at ASCE Civil Engineering Conference 2001. P. 241—263. [https://doi.org/10.1061/40592\(270\)14](https://doi.org/10.1061/40592(270)14)

REFERENCES

1. Bakhaev A.N., Mashenkin P.A., Sidorov M.L. Models of saturated-unsaturated and pressure-non-pressure filtration in the NIMFA program complex // VANT, ser. Mathematical modeling of physical processes. 2019. Vol. 3. pp. 73—83.
2. Boldyrev G.G., Kolesnikov A.S., Novichkov G.A. Interpretation of the results of laboratory tests to determine the strength characteristics of soils // Engineering surveys. 2014. No. 5—6. pp. 78—85.
3. Goldin A.L., Nguyen Phuong Dung. Construction of a stress trajectory for unsaturated soil during consolidated undrained tests in a stabilometer // Engineering and Construction Journal. 2012. No. 9. P. 1—8.
4. Dugartsyrenov A.V. Physico-chemical model of cohesive rock // Mining Information and Analytical Bulletin. 2007. No. 8. P. 80—88.

5. Madi Ahmed Yehia Ali Ali. Experimental studies and modeling of the dynamics of soil moisture and temperature: abstract of thesis. dis. ... cand. biol. sci. M., 2018. 25 p.
6. Novgorodova M.A. Determination of suction parameters of unsaturated soils using the filter paper method // Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: materials of the 17th All-Russian. scientific-practical conf. and exhibitions of survey organizations / Ed. ON THE. Zhuravleva and K.S. Viskhadzhieva. M.: Geomarketing, 2022. pp. 39—51.
7. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N. Experimental determination of suction pressure of unsaturated clay soils // VI Russian meeting on clays and clay minerals "CLAYS-2023". SPb.: IGEM RAS, 2023. pp. 111—113.
8. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N., Fomenko I.K. Theory of unsaturated soils // New ideas in Earth sciences: materials of the XV international. scientific-practical conf. In 7 vols. M.: Russian State University for the Humanities named after. S. Ordzhonikidze, 2021. pp. 273—276.
9. Skorobogatko K.V. Soil mechanics of saturated and unsaturated soil areas // Specialized calculation systems MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyshchennoy-oblasti-grunta/> (access date: 03/02/2024).
10. Skorobogatko K.V. Modeling of soil properties in a non-water-saturated area above the groundwater level // Specialized calculation systems MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (access date: 03/05/2024).
11. Skorobogatko K.V. Influence of soil properties in a non-water-saturated area on the calculation results // Specialized calculation systems MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/vliyaniye-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-na-rezultaty-raschetov/> (access date: 03/04/2024).
12. ASTM D5298-03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-03>
13. ASTM D5298-2016. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
14. Fondjo A.A., Elizabeth Theron, Richard P. Ray. Assessment of Various Methods to Measure the Soil Suction // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075 (Online). Vol. 9 Iss. 12, October 2020. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L7958.1091220/>
15. Fredlund D.G., Wong D.K. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction // Geotechnical Testing Journal. 1989. No. 12(3). P. 188—194. <https://doi.org/10.1520/GTJ10967J>
16. Fredlund D.G., Rahardjo H., Fredlund M.D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. 2012. 944 p.
17. Leong E.C., He L., Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matrix suction measurements // Geotechnical Testing Journal. 2002. No. 25(3). P. 322—333. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>
18. Lu N., Likos W.J. Unsaturated soil mechanics. 2004. Wiley. 584 rub. ISBN: 978-0-471-44731-3
19. Meilani I., Rahardjo H., Leong E.C., Fredlund D.G. Mini suction probe for matric suction measurements / Canadian Geotechnical Journal. No. 39(6). 2002. P. 1427—1432. <https://doi.org/10.1139/t02-101>
20. Swarbrick, G.E. Measurement of soil suction using the filter paper method // Conference: Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at ASCE Civil Engineering Conference 2001. P. 241—263. [https://doi.org/10.1061/40592\(270\)14](https://doi.org/10.1061/40592(270)14)

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Новгородова М.А. — является основным автором статьи, участвовала в написании и редакции текста статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Горобцов Д.Н. — сгенерировал цель исследования, поставил задачи исследования и участвовал в редакции текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ушаков А.С. — проанализировал результаты исследования, подготовил данные и выполнил расчеты и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Margarita A. Novgorodova — is the main author of the article, participated in the writing and editing of the text of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Denis N. Gorobtsov — generated the purpose of the study, set the research objectives, participated in the editing of the text of the article, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Andrey S. Ushakov — analyzed the research results, prepared the data, performed the calculations, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Новгородова Маргарита Алексеевна* — преподаватель кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: marga_97@mail.ru
тел.: +7 (909)-639-17-27
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Горобцов Денис Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии, гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: dngorobtsov@mail.ru
тел.: +7 (925) 664-59-28
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Ушаков Андрей Сергеевич — инженер Научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича — структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство»».
6, стр. 12, 2-я Институтская ул., г. Москва 109428, Россия
e-mail: u20.andrey@gmail.com
тел.: +7 (962) 985-25-88
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0956-7393>

Margarita A. Novgorodova* — teacher of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: marga_97@mail.ru
tel.: +7 (909) 639-17-27
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Denis N. Gorobtsov — Cand. Sci. (Geol.-Min.), head of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia
e-mail: dngorobtsov@mail.ru
tel.: +7 (925) 664-59-28
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Andrey S. Ushakov — engineer of Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC. 6, p. 12, 2nd Institutskaya str., Moscow 109428, Russia
e-mail: u20.andrey@gmail.com
tel.: +7 (962) 985-25-88
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0956-7393>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author