

УДК 624.131.439.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4927
Шифр специальности ВАК: 1.6.7
Научная статья



Понятие матричного всасывания в теории поведения ненасыщенных грунтов

М.А. Новгородова✉, Л.А. Ярг, Д.Н. Горобцов

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Россия, г. Москва

✉novgorodovama@mgri.ru

Аннотация. Авторы рассматривают ключевой вопрос механики ненасыщенных грунтов, касающийся правильного использования понятия матричного всасывания: является ли матричное всасывание переменной напряжения или переменной напряженного состояния? **Цель.** Определение корректного подхода к описанию матричного всасывания и его влияния на поведение ненасыщенных грунтов. **Материалы и методы.** Общепринятый принцип механического равновесия и концепция представительного элементарного объема для многофазных пористых сред, включающих воздух, воду и твердые частицы. Авторы обобщили общепринятые физические и логические рассуждения для анализа матричного всасывания в типичных условиях воздух–вода–твердое тело. **Результаты исследования.** Матричное всасывание не является переменной напряжения на типичном уровне воздух–вода–твердое тело. Вместо этого его следует рассматривать как переменную напряженного состояния. Также установлено, что при рассмотрении матричного всасывания как переменной напряженного состояния существует взаимозависимость между ним и нормальным напряжением при одновременном использовании для описания состояния напряжения в ненасыщенных грунтах. Полученные результаты имеют важные последствия для концепции, теоретизации и применения механики ненасыщенных грунтов. Понимание того, что матричное всасывание является переменной напряженного состояния и взаимосвязано с нормальным напряжением позволяет более точно моделировать поведение ненасыщенных грунтов и разрабатывать более надежные инженерные решения. Это исследование способствует углублению знаний в области механики грунтов и предоставляет новые направления для дальнейших научных изысканий.

Ключевые слова: всасывание, давление всасывания, ненасыщенные грунты, эффективное напряжение, механика ненасыщенных грунтов, репрезентативный элементарный объем

Для цитирования: Новгородова М.А., Ярг Л.А., Горобцов Д.Н. Понятие матричного всасывания в теории поведения ненасыщенных грунтов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 11. – С. 213–221. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4927

UDC 624.131.439.3
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4927
Scientific paper



Matric suction in the theory of behavior of unsaturated soils

M.A. Novgorodova✉, L.A. Yarg, D.N. Gorobtsov

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation

✉novgorodovama@mgri.ru

Abstract. The authors address a key issue in unsaturated soil mechanics concerning the correct use of the concept of matrix suction: is matrix suction a stress variable or a stress state variable? **Aim.** To determine the correct approach to describe matrix suction and its effect on the behavior of unsaturated soils. **Materials and methods.** Generally accepted principle of mechanical equilibrium and the concept of representative elementary volume for multiphase porous media including air, water and solid particles. The authors generalized the commonly accepted physical and logical reasoning to analyze matrix suction under typical air–water–solid conditions. **Results.** The study revealed that matrix suction is not a stress variable at the typical air–water–solid

level. Instead, it should be considered as a stress state variable. It is also found that when considering the matrix suction as a stress state variable, there is a relationship between it and normal stress when used simultaneously to describe the stress state of unsaturated soils. The results obtained have important implications for the concept, theorizing, and application of unsaturated soil mechanics. Understanding that matrix suction is a stress state variable and is related to normal stress allows for more accurate modeling of unsaturated soil behavior and the development of more robust engineering solutions. This study contributes to the advancement of soil mechanics knowledge and provides new directions for future research.

Keywords: suction, suction pressure, unsaturated soils, effective stress, unsaturated soil mechanics, representative elementary volume

For citation: Novgorodova M.A., Yarg L.A., Gorobtsov D.N. Matric suction in the theory of behavior of unsaturated soils. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 11, pp. 213–221. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4927

Введение

Всасывание грунта, или давление всасывания, является ключевым параметром для описания поведения ненасыщенных грунтов. Данный термин характерен для дисперсных грунтов, у которых поровое пространство частично заполнено водой, частично воздухом. При этом именно соотношение вода–воздух зачастую определяет поведение грунта при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Всасывание – это показатель свободного энергетического состояния воды внутри грунта. Давление всасывания влияет на сдвиговые деформации, характер изменения объема грунта и гидравлическую проводимость ненасыщенных грунтов, а также отражает свободное энергетическое состояние воды внутри грунта [1].

На сегодняшний день выделяют следующие виды всасывания: полное, структурное и осмотическое. Полное (общее) всасывание – это сумма осмотического и структурного всасывания. Осмотическое всасывание – давление растворенных веществ (например, соли) в поровой воде грунта, является одним из факторов, влияющих на гидромеханическое поведение грунта при засолении. Структурное, или матричное, всасывание возникает из-за капиллярных сил, действующих в ненасыщенных грунтах, и определяется как разница между поровым давлением воздуха и поровым давлением воды. В большинстве случаев рассмотрение осмотического всасывания как разницы между общим и структурным всасыванием может быть проблематично из-за влияния сил гидратации, поэтому зачастую общее всасывание принимают равным матричному. Матричное всасывание – это переменная, которая определяет и/или влияет на каждое из этих явлений и соответствующее поведение грунта с малой и средней степенью насыщения. К примеру, повышение давления всасывания грунта может привести к снижению прочности грунта на сдвиг и снижению устойчивости склонов после проливных дождей и интенсивной инфильтрации воды [2].

Несмотря на то, что матричное всасывание как величина является важной составляющей в поведении ненасыщенных грунтов, и мировые исследования это подтверждают, существуют два фундаментальных вопроса, касающихся надлежащего использования матричного всасывания в механике ненасыщенных грунтов. Эти вопросы можно сформулировать следующим образом:

1. Является ли матричное всасывание величиной, зависящей от первоначального напряжения в грунте?
2. Является ли матричное всасывание переменной составляющей напряженного состояния массива грунта?

Под первоначальным напряжением в грунте понимается бытовое давление, которое представляет собой вертикальное эффективное напряжение в массиве грунта, возникающее от веса вышележащих слоев грунта. Под действием внешних нагрузок и/или геологических процессов напряженное состояние массива грунтов изменяется, возникают дополнительные факторы, влияющие на общее состояние массива.

Для понимания этих вопросов важно учитывать, что матричное всасывание влияет на поведение ненасыщенных грунтов. Экспериментальные исследования показывают, что увеличение матричного всасывания приводит к повышению величины общего сцепления и эффективного угла внутреннего трения, в то время как угол внутреннего трения адсорбции постепенно уменьшается.

Ответы на вышестоящие вопросы играют ключевую роль в формировании теории, объясняющей явления эффективных напряжений и деформаций в ненасыщенных грунтах. На основании изучения и анализа литературных данных по теории механики ненасыщенных грунтов и собственных исследований дана попытка ответить на поставленные вопросы.

История развития механики ненасыщенных грунтов

Механика ненасыщенных грунтов как раздел науки начала формироваться в середине XIX в., когда возникла необходимость прогнозирования

процессов в массивах грунтов, взаимодействующих с сооружениями. В основе её формирования лежат исследования в области механики деформируемого тела, а также в области геологии и гидрогеологии.

Большое влияние на развитие механики ненасыщенных грунтов оказали работы таких учёных, как Ш. Кулон, А. Дарси, Е. Винклер, Ж. Буссинеск, М. Леви, Д. Друкер, В. Прагер, Л. Прандтль, К. Терцаги и многих других. В России значительный вклад в развитие этой области внесли В.М. Карлович, В.И. Курдюмов, Н.М. Герсевич, Н.А. Цытович, З.Г. Тер-Мартirosян, Н.Н. Маслов, В.А. Флорин, Е.М. Сергеев, Н.Я. Денисов и другие.

В 1928 г. П.А. Ребиндер открыл эффект адсорбционного понижения прочности твёрдых тел, получившего в советской научной литературе наименование «Эффекта Ребиндера». Суть эффекта заключается в облегчении деформирования и разрушения твёрдых тел при контакте со средой, содержащей вещества, способные к адсорбции на межфазной поверхности. Это явление проявляется только при совместном действии среды и механических напряжений.

Важным этапом в развитии механики ненасыщенных грунтов стало издание в 1934 г. учебника Н.А. Цытовича, который впоследствии переиздавался семь раз и был переведён на многие языки мира. В настоящее время эта дисциплина обладает развитой экспериментальной базой и мощным механико-математическим аппаратом.

В 1943 г. Карл Терцаги предложил теорию поведения ненасыщенных грунтов в двух главах своей монографии (Главы 14 и 15) [3].

Н.А. Качинский, Е.М. Сергеев и А.Ф. Лебедев, а также другие учёные внесли значительный вклад в изучение вопросов содержания воды в грунте в 40–50-е гг. XX в. Их работы охватывали широкий спектр тем, связанных с физикой почв, включая изучение влажности почв, разработку систем агротехнических мероприятий для сохранения влаги, исследование водного режима чернозёмов и типов водного режима почв. Н.А. Качинский занимался изучением физических свойств почв, в том числе их гранулометрического состава. Е.М. Сергеев внёс значительный вклад в развитие физики почв, особенно в области изучения структуры и физических свойств. Он исследовал роль органического вещества и катиона кальция в формировании агрегатов.

А.Ф. Лебедев занимался вопросами почвенной гидрологии, в частности, формами и передвижением влаги в почве и грунтах. Он предложил классификацию форм воды в почве и установил понятия о пленочной влаге и максимальной молекулярной влагоёмкости почв.

В 70-е гг. XX в. Р.С. Зиангиров, Р.И. Злочевская, Б.В. Дерягин, М.С. Мецик и другие продолжили детальное изучение поведения и свойств воды в грунтах. Их исследования были направлены на углубление понимания механизмов взаимодействия воды с грунтами, что имело важное значение для различных областей, включая строительство, сельское хозяйство и экологию.

В 1993 г. Д.Г. Фредлунд и Г. Рахаджо описали теорию ненасыщенных грунтов, которая позволила лучше понять процессы, происходящие в них. Эта теория учитывала взаимодействие между воздухом и водой в порах грунта, а также влияние этого взаимодействия на прочность и устойчивость грунта. В 1994 г. Д.Г. Фредлунд и А. Син предложили уравнение, которое связывает количество воды в грунте с общим всасыванием на основании модели Ван Генухтена-Муалема и уравнения Ричардса [4]. Это уравнение стало важным инструментом для моделирования поведения ненасыщенных грунтов и прогнозирования их свойств в различных условиях. Теория ненасыщенных грунтов и уравнение для связи количества воды и всасывания позволили инженерам и учёным лучше понимать поведение грунтов в различных условиях и разрабатывать более сложные модели поведения грунтов, где важно учитывать их свойства в различных состояниях.

В настоящее время теория ненасыщенных грунтов продолжает развиваться благодаря усилиям многих исследовательских групп из разных стран.

Теория поведения ненасыщенных грунтов

Теория поведения ненасыщенных грунтов описывает процессы, происходящие в грунтах, у которых поровое пространство частично заполнено водой, частично воздухом (рис. 1). Эти грунты характеризуются наличием отрицательного порового давления воды, которое возникает из-за сил поверхностного натяжения и способствует сжатию частиц грунта, увеличивая его прочность [5, 6].

Одним из ключевых параметров теории является давление всасывания. Давление всасывания и капиллярность играют важную роль в определении физико-механических свойств глинистых грунтов, включая их способность удерживать влагу и сохранять свою структуру.

В результате всасывающего эффекта на окружающие частицы грунта возникает такое явление, как эффективное напряжение. Эффективное напряжение в грунте выше общего напряжения из-за отрицательного порового давления воды, которое возникает вследствие поверхностного натяжения поровой воды в пустотах грунта.

Связь между матричным всасыванием и эффективным напряжением в грунте обусловлена капиллярным действием и поверхностным натяжением поровой воды в зоне аэрации (рис. 2).

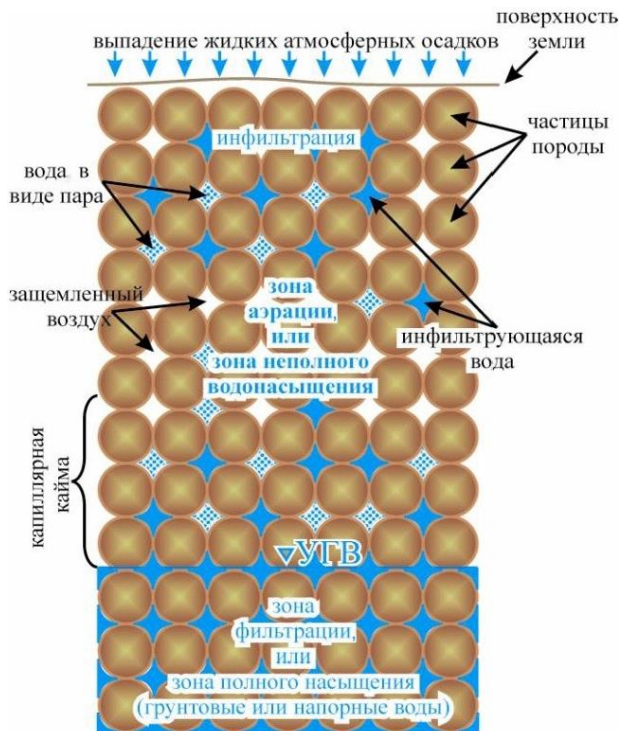


Рис. 1. Схема перехода от ненасыщенного грунта к насыщенному [7]

Fig. 1. Diagram of the transition from unsaturated soil to saturated [7]

Эффективное напряжение в грунте – это напряжение, действующее в скелете грунта, определяемое как разность между полным напряжением в образце грунта и давлением в поровой жидкости. Этот параметр важен для понимания поведения грунта под нагрузкой, поскольку он отражает влияние эффективных сил на скелет грунта, исключая влияние порового давления воды. Эффективное напряжение влияет на такие свойства грунта, как деформация, прочность на сдвиг и устойчивость,

что критически важно для проектирования и строительства на ненасыщенных грунтах [10].

Повышенное инфильтрационное воздействие, к примеру, сезонные дожди, приводит к уменьшению матричного всасывания, что, в свою очередь, снижает прочность грунта на сдвиг и устойчивость склонов. Это связано с изменением характеристик порового давления воды в грунте, описываемых характеристической кривой грунт–вода (Soil Water Characteristic Curve – SWCC) [11]. Таким образом, матричное всасывание и эффективное напряжение тесно связаны через капиллярные эффекты в грунте, влияющие на его механические свойства и устойчивость.

Матричное всасывание, в свою очередь, является результатом действия капиллярных сил в ненасыщенных грунтах и представляет собой изменение свободной энергии в единице объема воды при изотермическом переходе из состояния связанной воды в состояние свободной, и определяется в репрезентативном элементарном объеме грунт–вода–воздух.

В классической механике твёрдого тела есть концепция Representative Elementary Volume (REV – репрезентативный элементарный объем) – минимальный объем материала, при измерении которого получают значения, репрезентативные для всего образца (рис. 3) [12], которая помогает понять макроскопическое механическое поведение материала. Такое представление устанавливает объем, выше которого механическое поведение материала не зависит от масштаба или является непрерывным. Механическая связь между этим объемом и окружающей средой заменяется всеми существующими физическими напряжениями. Нормальные напряжения и напряжения сдвига, вызванные различными причинами (термическими, механическими, гидрогеологическими и др.), могут быть определены как переменные напряжения [13].

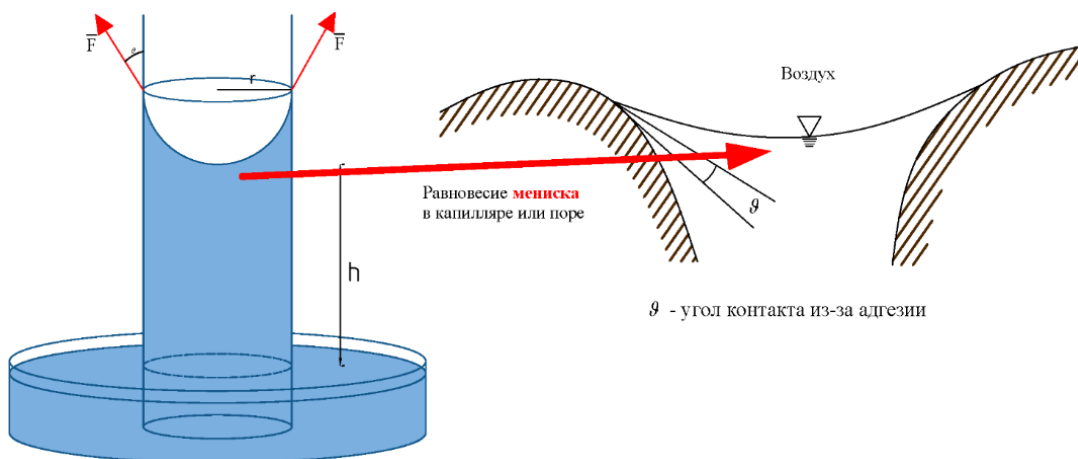


Рис. 2. Поверхностное натяжение поровой воды в зоне аэрации [8, 9]

Fig. 2. Surface tension of pore water in aeration zone [8, 9]

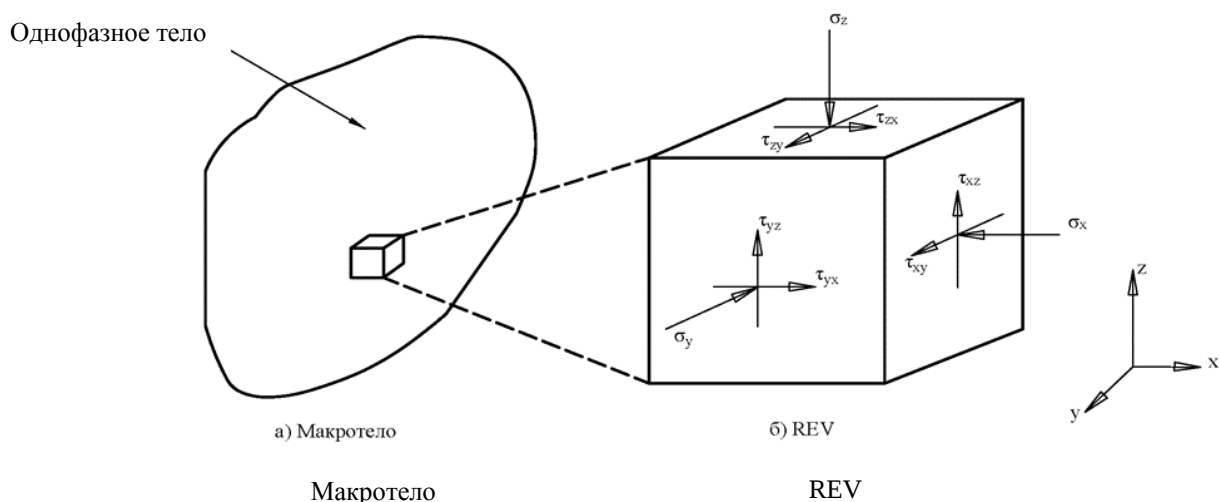


Рис. 3. Однофазный REV в декартовых координатах, где REV обычно принимается в масштабе молекулы
Fig. 3. Single-phase REV in Cartesian coordinates, where the REV volume is usually on the molecular scale

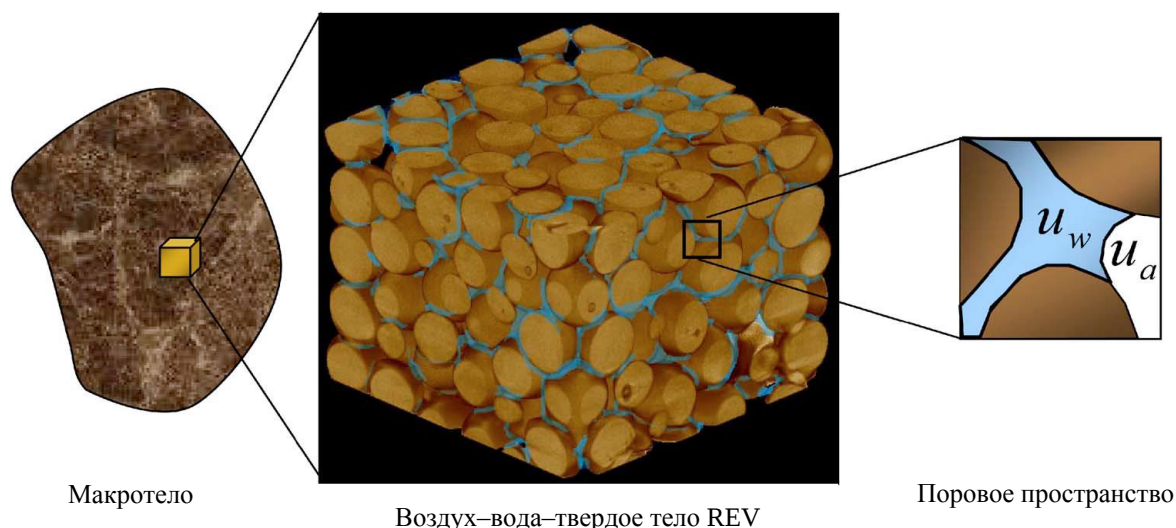


Рис. 4. Многофазный REV: воздух–вода–твёрдое тело в декартовых координатах, где объем обычно принимается в масштабе намного большем, чем масштаб пор [14]

Fig. 4. Multiphase air–water–solid REV in Cartesian coordinates, where the REV volume is typically at a scale much larger than the pore one [14]

Для многофазных материалов, таких как система воздух–вода–твёрдое вещество, показанных на рис. 3, приведённое выше определение остаётся точным. Однако в системе ненасыщенного грунта при непостоянных значениях напряжений, таких как давление воздуха и воды, становится необходимым учитывать все действующие силы, а не только начальные или действующие напряжения (рис. 4, 5). Любые непостоянные значения напряжений, определённые в меньшем масштабе, чем REV, должны быть преобразованы в соответствующие силы с учётом занимаемой ими площади. Эти силы нужно суммировать с другими физическими силами, такими как поверхностное натяжение, электрическое двухслойное отталкивание или

Ван-дер-Ваальсово притяжение, а также с внешней нагрузкой, чтобы получить суммарную силу, действующую на поверхности REV.

Следуя этому классическому подходу механики сплошной среды, переменная напряжения в ненасыщенном грунте может быть определена как сила на единицу площади REV воздух–вода–твёрдое тело. Поскольку матричное всасывание сначала необходимо умножить на соответствующую площадь, чтобы получить необходимую переменную напряжения, что явно требует учета площадей компонентов порового воздуха и поровой воды, всасывание не является переменной напряжения для REV типичной системы воздух–вода–твёрдое тело для ненасыщенного грунта.

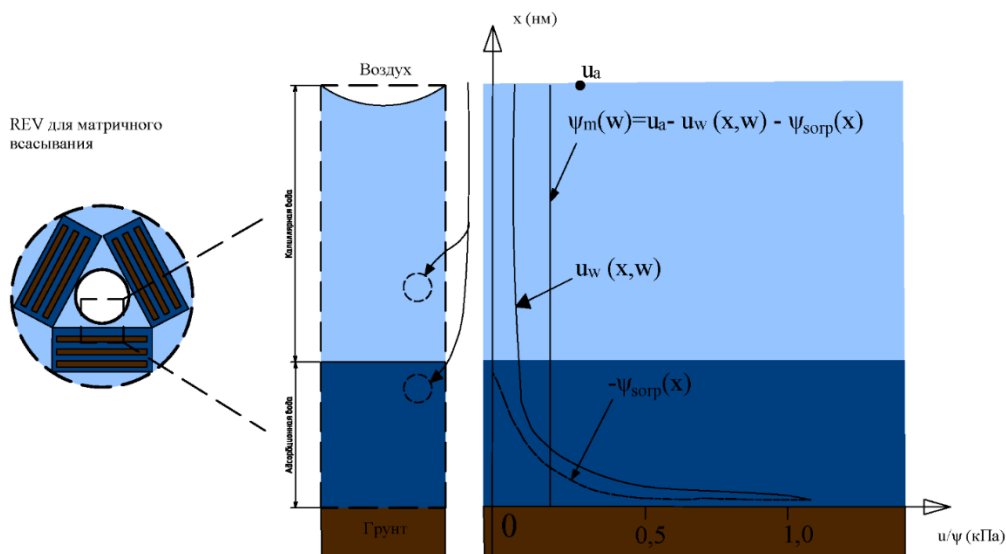


Рис. 5. REV для матричного всасывания и переход к SWCC [8, 9], где u_a – давление воздуха, u_w – давление воды, ψ_m – матричное всасывание, ψ_{sorp} – сорбция

Fig. 5. REV for matrix suction and transition to SWCC [8, 9], where u_a is the air pressure, u_w is the water pressure, ψ_m is the matrix suction, ψ_{sorp} is the sorption

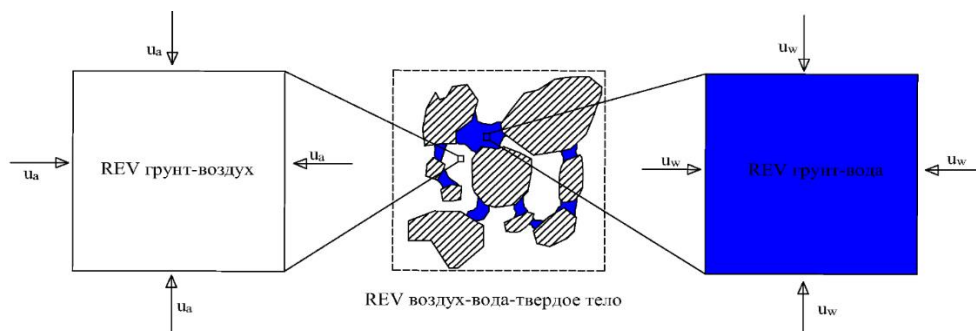


Рис. 6. Иллюстрация разницы в определении масштаба между REV воздух-вода-твердое тело, REV грунт-вода и REV грунт-воздух, где REV воздух-вода-твердое тело включают систему воздух-вода-твердое тело, REV грунт-вода и REV грунт-воздух, содержащую только масштаб пор

Fig. 6. Illustration of the difference in scale definition between air–water–solid REV, soil–water REV, and soil–air REV, where air–water–solid REV includes the air–water–solid system, soil–water REV, and soil–air REV comprises only the pore scale

Для того чтобы всасывание отвечало за переменную напряжения в масштабе REV воздух–вода–твердое тело, должен быть изначально задействован масштабный коэффициент, который включает количественную оценку площадей поровой воздуха и поровой воды.

Следуя тому же логическому аргументу, давление поровой воды для грунта в условиях насыщения является переменной напряжения, поскольку переход от компонента «поровая вода» до многофазного элементарного объема «твердое тело–вода» включает незначительную площадь контакта твердого тела с твердым телом для пористых сред, таких как грунты.

Матричное всасывание – это переменная, которая количественно определяет энергетический по-

тенциал воды в грунте при окружающих атмосферных условиях. По определению, матричное всасывание – это разница давлений между давлением воздуха (u_a) и давлением воды в порах (u_w), т. е. $u_a - u_w$. Следовательно, значение структурного всасывания – это дефицит давления воды в грунте относительно давления воздуха или дефицит потенциала воды в грунте относительно потенциала воды в грунте при давлении окружающего воздуха [11]. Например, значение 1 Па матричного всасывания указывает на то, что давление воды в грунте на 1 Па ниже давления окружающего воздуха, или на 1 Дж/м³ ниже потенциала давления воды при давлении окружающего воздуха. Важно признать, что матричное всасывание представляет собой энергию Дж на единицу объема воды в грунте м³, а

не на единицу объема ненасыщенного грунта, как это определено на уровне пор по отношению к компонентам воздуха и воды [15]. Рис. 6 иллюстрирует необходимый достаточный REV для матричного всасывания. Таким образом, можно предположить, что матричное всасывание не может полностью определить удельную энергию или давление поровой воды относительно многофазного объема воздух–вода–твердое тело, ранее обозначенного для ненасыщенного грунта, где переменные напряжения учитываются в соответствии с классической механикой.

Например, чтобы вычислить потенциал давления или энергию на единицу объема грунта, т. е. в масштабе REV, всасывание должно быть умножено на объемное содержание воды θ , определяемое как объем воды по объему REV, т. е. $(u_a - u_w) \cdot \theta$. Для грунтов с матричным всасыванием, равным 1 Па, общая энергия, запасенная в 1 м³ грунта–воды, одинакова, а именно 1 Дж. Однако общая энергия, запасенная в 1 м³ ненасыщенного грунта, в значительной степени зависит от содержания воды, которое варьируется.

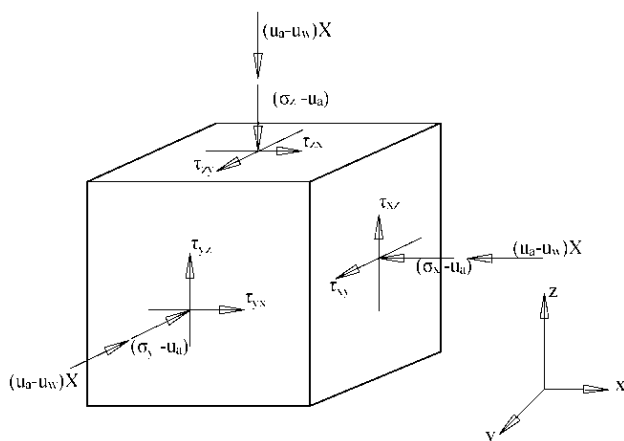


Рис. 7. Объем REV, где обобщенная функция передачи напряжения включает три основных механизма для давления всасывания: поровое давление, поверхностное натяжение и межчастичные физико-химические силы [14]

Fig. 7. REV volume, where the generalized stress transfer function includes three main mechanisms for suction pressure: pore pressure, surface tension and interparticle physicochemical forces [14]

Вычисление вклада этого потенциала давления $u_a - u_w$ в макроскопическое напряжение, действующее на поверхность грунта REV, требует еще одной функции переноса или масштабирования. Эта функция масштабирования, которая может быть обозначена как X , переносит удельную энергию воды из REV масштаба пор, т. е. $(u_a - u_w) \cdot X$, в REV воздух–вода–твердое тело и, как правило, зависит

от внутренних свойств всех трех фаз, их взаимодействий, структуры частиц и пор, а также содержания воды или степени насыщения. Широко признано, что функция масштабирования X коррелирует с влажностью грунта и была приравнена к параметру Бишоп χ (1959 г.) [16].

Однако в более общем смысле функция масштабирования X включает, но не равна параметру Бишоп χ , которая изначально зависит от степени водонасыщения. Другие физические механизмы, такие как притяжение Ван-дер-Ваальса, могут стать доминирующими в относительно сухом глинистом грунте, что указывает на то, что X включает в себя гораздо больше взаимодействий, чем может быть охвачено только степенью насыщения. Различные формы передаточной функции X были предложены для учета этих взаимодействий с использованием неявных или эмпирических подходов (например, N. Khalili and M.H. Khabbaz, E.J. Murray, N. Lu and W.J. Likos [17–19]). Лу и Ликос определяют передаточную функцию X , чтобы включить все известные физические механизмы: межчастичные физико-химические силы, поверхностное натяжение и давление поровой воды в матричном всасывании. Определение передаточной функции X , независимо от подхода, становится необходимым, если всасывание должно быть масштабировано до макроскопической переменной напряжения, действующей на грани REV воздух–вода–твердое тело. Тот факт, что структурное всасывание имеет единицы напряжения, недостаточен для того, чтобы квалифицировать его как переменную напряжения в рамках классической механики сплошной среды. Поэтому, чтобы ответить на наш исходный вопрос, можно предположить, что всасывание не является ни переменной напряжения на уровне REV воздух–вода–твердое тело, ни физическим напряжением, действующим на грани REV воздух–вода–твердое тело. С другой стороны, величина $(u_a - u_w) \cdot X$, как показано на Рис. 7, является физическим напряжением, действующим на гранях REV воздух–вода–твердое тело. Эта переменная может быть напрямую использована в качестве переменной напряжения в сочетании с соответствующей деформацией для фиксации изменений энергии в ненасыщенных грунтах. Например, общий подход использования допустимых переменных напряжения и их сопряженных по работе деформаций для описания механического поведения грунта требует, чтобы переменные напряжения на гранях REV были определены в первую очередь (например, G.T Houlsby [20, 21]; K.K. Muraleetharan и C. Wei [22]). Этот факт имеет несколько важных последствий в отношении разработки механически обоснованных моделей для определения REV в ненасыщенной системе грунта и соответствующего прочностного поведения.

Заключение

Таким образом, теория поведения ненасыщенных грунтов представляет собой сложную систему взаимодействий между матричным всасыванием, эффективным напряжением и капиллярными силами. Эти параметры играют ключевую роль в опре-

делении физико-механических свойств грунтов и их устойчивости под нагрузкой. Понимание и учёт этих взаимодействий являются важной составляющей для успешного проектирования и строительства на ненасыщенных грунтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fredlund D.G. Soil suction monitoring for roads and air fields // Symposium on the State of the Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields. – 1989. – P. 113–121.
2. Скоробогатко К.В. Моделирование свойств грунта в неводонасыщенной области выше уровня грунтовых вод // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyschennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (дата обращения: 08.10.2024)
3. Terzaghi. K. Theoretical Soil Mechanics. – New York: Wiley, 1943. – 510 p.
4. Fredlund D.G., Xing A. A relationship for determining the soil–water characteristic curve from the van Genuchten–Mualem model and Richards equation // Canadian Geotechnical Journal. – 1994. – Vol. 31. – № 4. – P. 590–598.
5. Новгородова М.А., Горобцов Д.Н., Ушаков А.С. Влияние давления всасывания глинистых неполностью водонасыщенных грунтов на устойчивость склона // Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. – 2024. – № 66 (2) – С. 69–79. DOI: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79
6. Новгородова М.А., Горобцов Д.Н. Экспериментальное определение давления всасывания ненасыщенных глинистых грунтов // Глины и глинистые минералы-2023. VI Российское Собрание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023». – СПб, 2023. – М.: ИГЕМ РАН, 2023. – С. 111–113.
7. Белов К.В., Лисенков А.Б. Методические рекомендации по курсу «Основы гидрогеологии». – М.: МГРИ, 2019. – 47 с.
8. Greco R. Rainfall-induced landslides in shallow granular soil covers: hydrological processes controlling slope response to seasonal climatic forcing (Microsoft PowerPoint Presentation) // iRALL School, Chengdu University of Technology. – 2021.
9. Chao Zhang, Ning Lu. Unitary definition of matric suction // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2019. – Vol. 145. – Iss. 2. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002004](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002004)
10. Скоробогатко К.В. Механика грунтов насыщенной и неводонасыщенной области грунта // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyschennoy-oblasti-grunta/> (дата обращения: 02.03.2024).
11. Fredlund D.G., Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. – New York: Wiley, 1993. – 544 p.
12. Томин П.Ю. О понятии Representative elementary volume // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2011. – № 13. – С. 23. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-13> (дата обращения: 02.03.2024).
13. Дугарцыренов А.В. Физико-химическая модель связанной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 8. – С. 80–88.
14. Ning Lu. Is matric suction a stress variable? // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2008. – Vol. 134. – Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(899)
15. Бахаев А.Н., Машенькин П.А., Сидоров М.Л. Модели насыщенно-ненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации в комплексе программ «НИМФА» // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2019. – № 3. – С. 73–83.
16. Bishop A.W. The principle of effective stress // Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk. – 1959. – № 106 (39) – P. 859–863.
17. Khalili N., Khabbaz M.H. A unique relationship for X for the determination of shear strength of unsaturated soils // Geotechnique. – 1998. – № 48 (5) – P. 681–688.
18. Murray E.J. An equation of state for unsaturated soils // Can. Geotech. J. – 2002. – Vol. 39. – P. 125–140.
19. Lu N., Likos W.J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil // J. Geotech. Geoenviron. Eng. – 2006. – Vol. 132 (2). – P. 131–142.
20. Houlsby G.T. The work input to a granular material // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29 (3). – P. 354–358.
21. Houlsby G.T. The work input to an unsaturated granular material // Geotechnique. – 1997. – Vol. 47 (1) – P. 193–196.
22. Muraleetharan K.K., Wei C. Dynamic behaviour of unsaturated porous media: governing equations using the theory of mixtures with interfaces (TMI) // Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech. – 1999. – Vol. 23 – P. 1579–1608.

Информация об авторах

Маргарита Алексеевна Новгородова, старший преподаватель кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Россия, 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, 23; novgorodovama@mgri.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Людмила Александровна Ярг, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель высшего образования РФ, профессор кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Россия, 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, 23; liudmila.yarg@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7501-3304>

Денис Николаевич Горобцов, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии Гидрогеологического факультета, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Россия, 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, 23; gorobtsovdn@mgri.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Поступила в редакцию: 11.12.2024

Поступила после рецензирования: 06.01.2025

Принята к публикации: 16.09.2025

REFERENCES

1. Fredlund D.G. Soil suction monitoring for roads and air fields. *Symposium on the State of the Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, 1989. pp. 113–121.
2. Skorobogatko K.V. Modeling of soil properties in the unsaturated zone above the groundwater level. *Specialized calculation complexes MIDAS*, 2022. (In Russ.) Available at: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyschennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (accessed 8 October 2024).
3. K. Terzaghi. *Theoretical Soil Mechanics*. – New York: Wiley, 1943. – 510 p.
4. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N., Ushakov A.S. Effect of suction pressure of clayey incompletely saturated soils on slope stability. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*, 2024, no. 66 (2), pp. 69–79. (In Russ.) DOI: 10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79
5. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N. Experimental determination of suction pressure of unsaturated clayey soils. *Clays and Clay Minerals – 2023. VI Russian Conference on Clays and Clay Minerals "CLAY-2023"*. St. Petersburg, 2023. Moscow, IGEM RAS Publ., 2023. 111–113 p. (In Russ.)
6. Belov K.V., Lisenkov A.B. *Guidelines for the course "Fundamentals of Hydrogeology"*. Moscow, MGRI Publ., 2019. 47 p. (In Russ.)
7. Greco R. *Rainfall-induced landslides in shallow granular soil covers: hydrological processes controlling slope response to seasonal climatic forcing (Microsoft PowerPoint Presentation)*. iRALL School, Chengdu University of Technology, 2021.
8. Chao Zhang, Ning Lu. Unitary definition of matric suction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, vol. 145, Iss. 2. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002004](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002004)
9. Skorobogatko K.V. Soil mechanics of saturated and unsaturated soil regions. *Specialized calculation complexes MIDAS*, 2022. (In Russ.) Available at: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyschennoy-oblasti-grunta/> (accessed 2 March 2024).
10. Tomin P.Y. On the concept of Representative elementary volume. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*, 2011, no. 13, 23 p. (In Russ.) Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-13> (accessed 2 March 2024).
11. Fredlund D.G., Xing A. A relationship for determining the soil–water characteristic curve from the van Genuchten–Mualem model and Richards equation. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, vol. 31, no. 4, pp. 590–598.
12. Dugartsyrenov A.V. Physicochemical model of cohesive rock. *Mining information and analytical bulletin*, 2007, no. 8, pp. 80–88. (In Russ.)
13. Ning Lu. Is matric suction a stress variable? *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, vol. 134, Iss. 7. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(899)
14. Fredlund D.G., Rahardjo H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York, Wiley, 1993. 544 p.
15. Bakhaev A.N., Mashenkin P.A., Sidorov M.L. Models of saturated-unsaturated and pressure-free filtration in the NIMFA software package. *Issues of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes*, 2019, no. 3, pp. 73–83. (In Russ.)
16. Bishop A.W. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk*, 1959, no. 106 (39), pp. 859–863.
17. Khalili N., Khabbaz M.H. A unique relationship for the determination of shear strength of unsaturated soils. *Geotechnique*, 1998, no. 48 (5), pp. 681–688.
18. Murray E.J. An equation of state for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 2002, vol. 39, pp. 125–140.
19. Lu N., Likos W.J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2006, vol. 132, no. 2, pp. 131–142.
20. Houlby G.T. The work input to a granular material. *Geotechnique*, 1979, vol. 29, no. 3, pp. 354–358.
21. Houlby G.T. The work input to an unsaturated granular material. *Geotechnique*, 1997, vol. 47, no. 1, pp. 193–196.
22. Muraleetharan K.K., Wei C. Dynamic behavior of unsaturated porous media: governing equations using the theory of mixtures with interfaces (TMI). *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 1999, vol. 23, pp. 1579–1608.

Information about the authors

Margarita A. Novgorodova, Senior Lecturer, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russian Federation; novgorodovama@mgri.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Lyudmila A. Yarg, Dr. Sc., Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russian Federation; lyudmila.yarg@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7501-3304>

Denis N. Gorobtsov, Cand. Sc., Head of the Engineering Geology Department, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 23, Miklukho-Maklay street, Moscow, 117997, Russian Federation; gorobtsovdn@mgri.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Received: 11.12.2024

Revised: 06.01.2025

Accepted: 16.09.2025