

КАПИЛЛЯРНОЕ УВЛАЖНЕНИЕ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Л. А. Смоляницкий

Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщений

Поступила в редакцию 3 октября 2011 г.

Аннотация. Насыпные земляные сооружения плотины, дамбы, земляное полотно железных и автомобильных дорог в процессе эксплуатации подвержены природным воздействиям: атмосферным осадкам, подтоплению при паводках, замерзанию в зимний период. При этом влажность грунта изменяется в широких пределах, что приводит к изменению прочности и сжимаемости грунта, к пучению при отрицательных температурах воздуха. Указанные факторы вызывают деформации, а иногда и потерю устойчивости сооружений. В данной статье рассматриваются условия увлажнения грунта и предлагается расчет максимально возможного его капиллярного увлажнения.

Ключевые слова: грунт, глина, песок, суглинок, вода, поры, влага, фильтрация, поровое давление, земляные сооружения, капилляры.

Abstract. The bulk earthen structures of a dam, dam, earthen cloth iron and highways are while in service subject to natural influences to atmospheric precipitation, at high waters, freezing in the winter period. Thus the humidity of a ground changes over a wide range, that results in change of durability and compressibility of a ground, soil heaving at negative temperatures of air. The specified factors cause deformations, and sometimes and loss of stability of structures. In given clause the conditions of humidifying of a ground are considered and the account maximum is offered its possible probable capillary humidifying.

Key words: soil, clay, sandy, sandy-clay, water, porous, moisture, percolation, porous pressure, soil construction, capillary

Земляные сооружения (плотины и дамбы, земляное полотно железных и автомобильных дорог) увлажняются атмосферными осадками, при подъеме уровня подземных вод и при подтоплении, например, при паводках или подпоре воды в верхнем бьефе. Этой проблеме посвящены работы многих авторов. В частности почвоведы изучали капиллярный подъем воды над уровнем подземных вод в почвах с точки зрения доступности влаги растениям. Дорожники и гидротехники изучали этот процесс на предмет устойчивости земляного сооружения. При этом следует отметить, что в отличие от почвоведов ими рассматривались насыпные земляные сооружения, при возведении которых нарушена природная структура грунта и возможна разная степень его уплотнения. Впитывание влаги характеризуется коэффициентом впитывания, или поглощения. Впитывание (водопоглощение) принципиально отличается от фильтрации. Впитывание происходит под действием капиллярных сил, а фильтрация – под действием гравитационных сил, создающих градиент фильтрационного потока воды. Коэффициент поглощения K_f – величина динамическая, изменяющаяся в

процессе заполнения пор грунта водой. $K_f = k_n / t^a$, где: $k_n = \kappa T^u$, где κ – коэффициент фильтрации, T – время, в течение которого устанавливается постоянный расход воды, то есть начинается фильтрация воды.

Фильтрация следует за поглощением, когда поры грунта заполнятся водой и создастся градиент потока. При этом, скорость фильтрации зависит, как от градиента, так и фильтрационного свойства грунта – коэффициента фильтрации κ , имеющего размерность скорости.

В общем, процесс инфильтрации воды в грунт представляет собой очень сложное явление, происходящее под действием гравитационных, капиллярных, молекулярных сил, сил, обусловленных трением, вязкостью жидкости, наличием заземленного воздуха в порах грунта. Основной характеристикой этого процесса является интенсивность инфильтрации под которой понимается количество воды, просачивающейся в грунт в единицу времени q_i , а общее количество равно произведению интенсивности на время просачивания: $Q = q_i T$.

Экспериментально установлено, что процесс инфильтрации атмосферных осадков при постоянной интенсивности дождя имеет три характерные фазы:

- интенсивность инфильтрации равна интенсивности дождя,
- интенсивность инфильтрации резко уменьшается,
- интенсивность просачивания постоянна.

В первой фазе инфильтрации все выпавшие на поверхность атмосферные осадки расходуются на смачивание и заполнение крупных пор. Продолжительность этой фазы зависит от первоначальной влажности (степени водонасыщения) грунта, плотности и интенсивности дождя, то есть продолжительность тем больше, чем меньше влажность грунта, тем короче, чем плотнее и интенсивнее осадки. Во второй фазе интенсивность инфильтрации уменьшается в связи с заполнением водой вор верхнего слоя грунта. В этот период часть осадков стекает с поверхности земляного полотна. В третьей фазе, когда грунт на достаточную глубину заполнен водой, начинается процесс фильтрации. Разными авторами предложены формулы для расчета интенсивности инфильтрации, однако они были получены для инфильтрации воды в почву.

Поглощение воды под действием капиллярных сил возможно только в том случае, когда капиллярное давление превысит поровое давление воды в грунте, соответствующее напряжениям от объемных сил (бытового давления) и внешних сил (давления от верхнего строения пути или дорожной одежды) и подвижного состава или автотранспорта, а при фильтрации воды градиент, созданный гравитационными силами, превысит критический градиент грунта, который в глинистом грунте может быть достаточно большим. Когда уплотнение грунта завершается поровое давление исчезает.

Перераспределение влаги протекает по-разному в разных грунтах и зависит от механического состава, влажности и других факторов. В глинистых грунтах большая часть поступающей на поверхность грунта влаги задерживается в верхнем слое, занимая 60–75 % пор. В тяжелых глинистых грунтах почти вся влага остается в верхнем слое.

Увлажнение грунта земляного полотна может происходить при плохом водоотводе из водоотводных канав или при подтоплении насыпи в период паводков. Исследованию миграции воды в ненасыщенных грунтах посвящены работы Н.Н. Павловского, А.А. Роде, И.И. Судницына, В.М. Сиденко, И.А. Носича, А.Я. Тулаева, Н.А. Пузакова, И.А. Золотаря, Ричардса, Филиппа и др. [1].

Анализ фактического материала позволил авторам сделать вывод о том, что интенсивное водо-

насыщение грунта происходит первые пять суток, потом, постепенно уменьшаясь, почти прекращается через 15–20 суток. На участках, удаленных от источников увлажнения более 50 см, увлажнение идет сначала медленно, потом скорость увлажнения возрастает.

Проведенные, перечисленными выше авторами, исследования дали им возможность установить предельные расстояния от источника увлажнения, на которое способна передвинуться вода за период действия источника увлажнения, например, 20 суток. Это расстояние для глинистых грунтов 2,5–3,5 м, для суглинистых 3–4 м, супесчаных 7–9 м, для песка 27–36 м. Авторы считают, что увлажнение из боковых канав незначительно и зависит от плотности грунта земляного полотна.

Повышение бровки земляного полотна над уровнем грунтовых вод эффективно, так как уменьшает поступление капиллярной воды в верхнюю часть насыпи.

Наблюдениями за реальным увлажнением грунта тела насыпей при их подтоплении, например, во время паводков установлены следующие случаи:

а) грунт насыпи увлажняется только на незначительную глубину в откосной части насыпей и несколько глубже вода проникает в глубину откоса у его подошвы,

б) грунт насыпи увлажняется в основном в нижней части откоса,

в) грунт насыпи увлажняется во всем поперечном профиле, возможна фильтрация воды через тело насыпи.

Причина такого различия в увлажнении грунтов тела насыпей при паводках авторами не объясняется. Объяснение этого факта будет дано нами ниже.

Автором данной работы в процессе практической деятельности пришлось обследовать большое количество давно эксплуатируемых гидротехнических и мелиоративных насыпей (дамб) высотой от 2–3 до 10 и более метров в Краснодарском крае и в Воронежской области. Эти дамбы были возведены из средних и тяжелых суглинков и глин аллювиального и делювиального генезиса, как правило, без тщательного послойного уплотнения грунтов в процессе строительства. По гребню на многих дамбах были проложены автодороги местного значения [2]. Заполнение мелиоративных прудов или распределительных каналов оросительных систем водой осуществлялось на теплый период года, а прудов накопителей техногенных вод

на промышленных предприятиях по мере необходимости независимо от времени года.

Несмотря на невысокую степень уплотнения глинистых грунтов в теле дамб, фильтрация нигде не замечалась, увлажнение грунта в откосах происходило на небольшую глубину до 1,0–1,5 м.

На некоторых дамбах зафиксированы глубокие сквозные размывы грунта, приведшие к разрушению дамб. По свидетельству местных жителей, эти промоины образованы паводковой водой в результате ее перелива через гребни дамб.

Для исследования возможности увлажнения грунта капиллярной водой через подошву насыпи автором этой работы еще в 1961 году в НИЛ ДИ-ИТа были проведен следующий опыт.

Глинистый грунт, отобранный из откоса одной из деформирующихся железнодорожных насыпей, был уложен в обсадные буровые трубы диаметром 127 мм с разной плотностью. Всего было установлено три колонны трехметровых труб. Все трубы заполнялись грунтом с одинаковой влажностью (полутвердая консистенция), но с разным уплотнением. Грунт в первой трубе уплотнялся слоями не более 10 см трамбовкой до отказа, то есть до максимально плотного состояния, во второй – только постукиванием по стенкам трубы, в третьей – было выполнено уплотнение трамбовкой тоже слоями по 10 см, но не тщательно. Эти колонны труб были установлены в помещении вертикально нижним концом в емкость с водой. Под торцы труб был уложен гравелистый песок. В емкости поддерживался постоянный уровень воды в течение года. Результаты опыта оказались следующими. В максимально уплотненном грунте вода поднялась только на высоту 10–12 см. В рыхлом грунте при подъеме на высоту около метра вода утяжелила грунт, он осел, а грунт, расположенный выше завис, и образовался разрыв в столбе грунта, поэтому вода выше места разрыва подняться не смогла. В колонне со средне уплотненным грунтом вода поднялась на высоту 2,2 м.

Казалось бы, этот опыт ничего существенного не внес в, известную из литературных источников, информацию о капиллярном подъеме воды в грунтах. Это не совсем так. Изучением капиллярных явлений в природных условиях основательно занимались почвоведы. Они изучали подъем капиллярной воды в почвах, имеющих определенную структуру.

Нами исследовалось это известное явление в грунте нарушенной структуры и даже в хорошо

уплотненном грунте. Это испытание позволило сделать вывод о том, что глинистый тщательно уплотненный грунт (испытывался тяжелый суглинок) не впитывает капиллярную воду. Доказательством этому является и известный опыт из гидротехнического строительства. Из перемятой и уплотненной глины устраивается водонепроницаемое ядро плотин, его заполняются «пазухи» вокруг бетонных конструкций.

В порах грунта может находиться сжатый воздух, и через поры такого грунта может вода даже фильтровать, если будет преодолен «критический» градиент. Оболочки связанной воды вокруг глинистых частиц могут смыкаться между собой, защемляя воздух и инертные частицы грунта. Такое возможно, когда грунт подвержен внешнему давлению, создающему соответствующее напряжение внутри поры. В этом случае в земляное полотно, возведенное из суглинка или глины, вода не проникает при паводке, так как капиллярного давления недостаточно, для преодоления внутренних напряжений, а градиент фильтрации меньше критического градиента данного грунта.

Когда фактический градиент превышает критический градиент для конкретного глинистого грунта, начинает перемещаться слабо связанная вода верхних слоев оболочек на глинистых частицах – возникает движение воды в порах грунта. Постепенно основная часть, защемленного в порах грунта, воздуха растворится в фильтрующей воде, и грунт станет водонасыщенным.

Глубина возможного увлажнения грунта капиллярной водой может быть рассчитана при известном капиллярном давлении грунта из равенства бытового давления и капиллярного. При поступлении воды в поры грунта всестороннее капиллярное давление исчезает и может быть записано равенство:

$$\gamma h = \sigma_k, \text{ откуда: } h = \sigma_k / \gamma,$$

где h – глубина промачивания грунта по вертикали, (м); γ – удельный вес грунта ($\text{кН}/\text{м}^3$), σ_k – капиллярное давление (кПа). Например, при $\sigma_k = 40$ кПа, удельном весе грунта $\gamma = 19$ $\text{кН}/\text{м}^3$ глубина промачивания составит $h = 40/19 = 2,1$ м.

Как видно из приведенной формулы, чем больше капиллярное давление грунта, тем глубже может быть промочен грунт. А капиллярное давление у более глинистых грунтов больше, чем, например, у супеси. Значит, супесь промокнет на меньшую глубину? Совершенно не так. В вещественном составе супеси значительно меньше глинистых частиц, поэтому там очень мало закрытых оболоч-

ками связанной воды пор. Здесь капиллярная вода может проникать вовнутрь пор грунта, выдавливая из них воздух. Более того, у таких грунтов невысокий критический градиент и возможно, что после заполнения пор капиллярной водой начнется нормальная фильтрация с постепенным выдавливанием и растворением воздуха.

Высота увлажнения грунта насыпей капиллярной водой через подошву зависит, как видно из приведенного материала, от бытового давления, степени уплотнения и связности грунта. Если грунтовая вода подступила к самой подошве насыпи, высота подъема воды в ней может быть рассчитана по приведенной выше формуле. Подъем воды через подошву в насыпях, возведенных из легких глинистых грунтов и песка, соответствует высоте капиллярного подъема воды в этих грунтах и может быть выше подъема воды в насыпи из глины.

Кажущееся противоречие здесь вызвано терминологией. Следует учесть, что по отношению к частицам грунта капиллярное давление является *положительным* – оно сжимает частицы грунта, а по отношению к поровой воде *отрицательным* – оно растягивает воду. Глины обладают большим капиллярным давлением, сжимающим минеральные частицы, которое, суммируясь с внешним давлением, закрывает (закрывает) поры грунта, соприкасающимися оболочками связанной воды на глинистых частицах. При поступлении воды извне, капиллярное давление снимается (исчезает), но, оставшееся поровое давление, может быть достаточным, чтобы поры грунта остались закрытыми.

В супесях и песках капиллярное давление невелико, а глинистых частиц недостаточно, чтобы «замкнуть» поры.

С целью установления **максимально возможного** капиллярного увлажнения грунта автором статьи выполнены лабораторные исследования с разными глинистыми грунтами и песком средней крупности.

Кольца, заполненные грунтом с разной начальной плотностью и влажностью, устанавливались на поверхность фильтровальной бумаги, в которую подавалась вода с возвышением над ее поверхностью не более 1–2 мм. Для предотвращения или уменьшения набухания грунта сверху грунт загружался небольшой нагрузкой порядка 2–3 кПа, которая соответствует бытовому давлению в откосе насыпи в поверхностном слое.

Результаты опытов для пяти глинистых грунтов в координатах начальной (до увлажнения) и конеч-

ной (после увлажнения) степени водонасыщения грунта (в %) показаны на рис. 1. Здесь обозначены: кружками легкий суглинок ($w_L = 20,0$ и $w_p = 12,5$), квадратиками – средний суглинок ($w_L = 31,1$ и $w_p = 18,2$), ромбами и прямыми крестиками – тощая глина ($w_L = 43,4$, $w_p = 23,3$) и ($w_L = 46,0$ и $w_p = 28,5$), косыми крестиками – жирная монтмориллонитовая глина ($w_L = 78,7$, и $w_p = 32,0$). Увлажнение образцов высотой 25 мм снизу продолжалось в течение суток. Как видно, на указанном рисунке имеет место разброс точек, тем не менее, заметно, что чем меньше начальная степень влажности S_k , тем больше поступление капиллярной влаги, так как больше капиллярное давление. Разброс точек на графике в первую очередь объясняется сложностью удаления защемленного воздуха из глинистых грунтов, так как часть защемленного воздуха растворена в воде и его количество так же зависит от температуры и атмосферного давления. Заметим, что значки, обозначающие разные грунты на графике, расположились практически вперемешку.

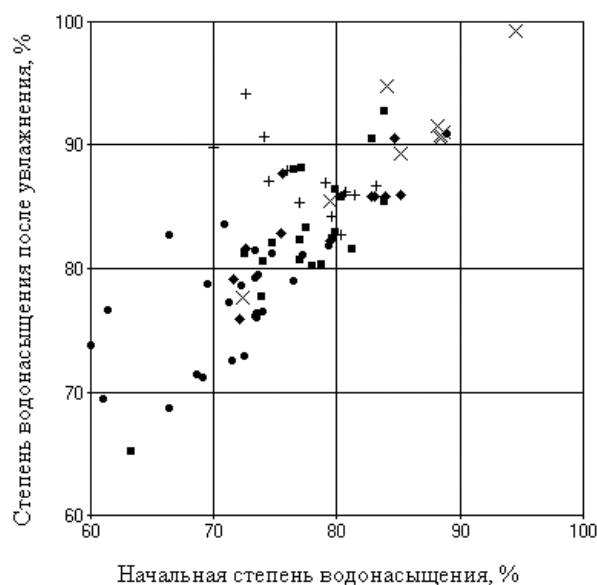


Рис. 1. Изменение водонасыщения глинистых грунтов при капиллярном увлажнении

Нас интересует **максимально возможное** увлажнение, поэтому на рис. 2, построенном в координатах – начальная степень влажности и коэффициент увлажнения как отношение конечной влажности к начальной, проведена линия, условно ограничивающая увлажнение грунта. Уравнение этой линии имеет вид: $K = w_k / w_n = 3,34 - 0,024 S_r$. Здесь значения влажностей и степени водонасыщения выражены в процентах. Из уравнения следует:

$$w_k = w_n (3,34 - 0,0234 S_r).$$

Выражая S_r в долях единицы, получим:

$$w_k = w_n (3,34 - 2,34 S_r).$$

В жирных набухающих глинах при свободном набухании конечная влажность может быть выше.

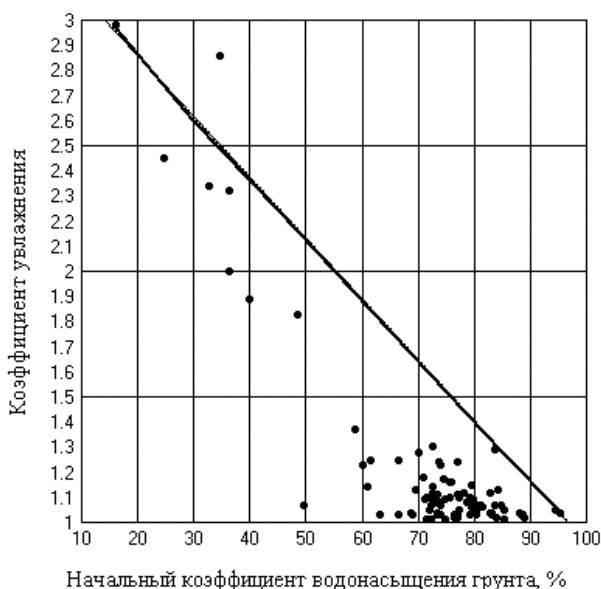


Рис. 2. Зависимость капиллярного увлажнения грунта от начального водонасыщения

Знание максимально возможного увлажнения грунта при капиллярном перемещении влаги имеет большое практическое значение, во-первых, при

увлажнении уменьшается прочность грунта и увеличивается его сжимаемость, во-вторых, при увеличении влажности в зоне сезонного промерзания увеличивается величина пучин. Оба указанных фактора следует учитывать при проектировании и эксплуатации земляного полотна автомобильных и железных дорог.

Следует отметить, что в песках при капиллярном увлажнении, как показали наши опыты, происходит практически полное водонасыщение грунта, так как зацементированный в порах воздух, достаточно легко из них выдавливается водой.

Выводы

1. Величина капиллярного увлажнения грунта тем больше, чем меньше его начальная степень водонасыщения.
2. Предложенный метод расчета максимального капиллярного увлажнения грунта позволяет прогнозировать уменьшение прочности и увеличение сжимаемости грунта, а также его пучение при замерзании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злотарь И.А. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / И.А. Злотарь, Н.А. Пузаков, В.М. Сиденко. – М., 1971, – 415 с.
2. Смоляницкий Л.А. Прогноз состояния земляного полотна / Л.А. Смоляницкий ; науч. ред. А.Э. Курилович. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2006. – 146 с. – (Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского государственного университета; Вып. 40).

Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщений

Л. А. Смоляницкий, кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения»

Тел. 8 (473) 271-35-08

L.smol37@list.ru

Voronezh branch of Moscow State University of railway engineering

L. A. Smolianitsky, Candidate Technical Sciences, senior lecturer of chair «Building and constructions»

Тел. 8 (473) 271-35-08

L.smol37@list.ru