

К. П. Моргунов, Д. Н. Антюшеня

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала  
С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

## **ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ, ЗАЛЕГАЮЩИХ В ОСНОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Выбор конструкции гидротехнических сооружений, технологии их строительства и режимов дальнейшей эксплуатации в значительной степени определяется характеристиками грунтов, на которых располагаются такие сооружения. Как правило, сооружения судопропускных гидроузлов располагаются в руслах естественных водотоков (рек), либо на искусственных водных путях (каналах). Судходные каналы трассируются по пониженным отметкам местности, представляющим собой русла или долины небольших рек или старицы. Аллювиальные грунты речных долин обычно представляют собой слабые дисперсные несвязные структуры. На поведение грунтов и изменение их свойств под нагрузкой оказывают влияние две основные группы факторов: структура и состояние грунта; параметры внешней нагрузки. Эти факторы определяют тенденции грунта к уплотнению либо разуплотнению при изменении структурных связей между частицами грунта, а также степень таких изменений.

Несвязные дисперсные (крупнообломочные и песчаные) грунты принято характеризовать по их механическому составу и плотности сложения.

По составу – это в основном обломки горных пород, первичных минералов и результатов их выветривания. Крупнообломочные грунты состоят из окатанных или угловатых обломков горных пород размером более 2 мм (более 50 % грунта), имеющих полиминеральный состав. Песчаные грунты характеризуются преобладанием мономинеральных частиц размером 0,05 – 0,2 мм, количество глинистых частиц в них не превышает 3 %.

По плотности сложения (коэффициенту пористости) песчаные грунты разделяются на плотные, средней плотности и рыхлые.

Плотное сложение характеризуется устойчивым положением частиц, относительно небольшим объемом пор. Песчаные грунты в рыхлом состоянии обладают повышенной способностью к деформации под воздействием внешней динамической нагрузки. Степень плотности таких грунтов может колебаться в очень широких пределах, и поэтому способность их к деформации также значительно изменяется. Основная деформация происходит из-за сближения частиц скелета (песчинок), при котором происходит переукладка песчинок и

выжимание воды, содержащейся в порах грунта. Причем такое уплотнение в песчаных грунтах имеет необратимый характер.

В природных условиях стабильное состояние слоя рыхлого песка сохраняется до тех пор, пока не появится причина, вызывающая уплотнение слоя. Такой причиной может явиться динамическое воздействие, возникновение давления в наклонном или горизонтальном направлении, гидродинамическое давление и т. п. Реакцией песчаного грунта на такие воздействия зачастую является разжижение грунта.

Под *разжижением грунта* понимается переход грунта в текучее состояние под действием внешних нагрузок, при котором происходит полная или частичная потеря грунтом несущей способности в результате разрушения структуры и смещения частиц грунта друг относительно друга [1]. Такое смещение возможно лишь при условии сокращения объема пор, то есть отжатия из них воды. Так как отжатие воды не может произойти мгновенно, в порах возникает напор, который взвешивает частицы, трение между частицами исчезает и грунт переходит в состояние суспензии. Напор грунтовой воды быстро распространяется в стороны и вызывает нарушение структуры значительного объема грунтового массива в пределах слоя с неустойчивой структурой.

Явление разжижения песков тесно связано с сопротивлением грунта сдвигающим усилиям, которое является основной характеристикой прочности грунта. Как известно, взаимоотношение касательных  $\tau$  и нормальных  $\sigma$  напряжений в грунте описывается линейным уравнением, представляющим собой закон Кулона

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c;$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения;  $c$  – сцепление, МПа.

Угол внутреннего трения у чистых (неглинистых) песков примерно равен углу естественного откоса. Коэффициент внутреннего трения зависит от размера частиц, их шероховатости и пористости песка. Поэтому эти характеристики, наряду с водонасыщенностью, могут быть использованы при оценке устойчивости песчаных грунтов к разжижению.

Грунты, располагающиеся в основании гидротехнических сооружений, изначально могут быть водонасыщенными, кроме того, при создании напорного фронта (разницы уровней верхнего и нижнего бьефов) водонасыщенность грунтов, как правило, повышается, и в грунтах основания возникают фильтрационные потоки.

На частицы грунта, окруженные водой, действует взвешивающая (Архимедова) сила. Помимо этого, при движении фильтрационного потока в грунте его частицы оказывают задерживающее (тормозящее) воздействие на поток. Тормозящее влияние скелета грунта вызывает снижение скорости воды по пути фильтрации, вследствие чего появляется фильтрационное давление на скелет, так называемое гидродинамическое давление. Это давление представляет собой силу, с которой движущаяся вода воздействует на грунтовый скелет. Сила гидродинамического давления направлена по касательной к линии тока и действует в ту же сторону, в которую движется вода, гидродинамическое давление стремится продвинуть частицы скелета по направлению движения воды.

Взвешивающая сила и сила гидростатического давления совместно воздействуют на частицы скелета грунта. Результирующее действие этих двух сил определяется в результате их векторного сложения. При восходящем фильтрационном потоке фильтрационное и взвешивающее воздействия будут действовать в одном направлении, и их влияние будет суммироваться. Под влиянием такого совместного действия взвешивающих и фильтрационных сил возможны следующие явления:

- разрыхление грунтов при восходящем потоке грунтовых вод и уплотнение при инфильтрации;
- нарушение устойчивости грунтовых откосов и природных склонов;
- выпор водонасыщенного грунта из-под основания сооружений и прорыв (выпор) dna котлована.

Реакция песчаных и гравелистых грунтов на нагрузку существенным образом зависит от их пористости. Немалое значение имеет также и гранулометрический состав грунта.

Для крупного песка величина критической пористости близка к наиболее рыхлому его состоянию, для среднего и мелкого песка критическая пористость приблизительно равна средней величине между его рыхлым и плотным состоянием. При очень тонком скелете грунта, как, например, у неорганического ила, критическая пористость близка к наиболее плотному состоянию этого грунта. Сдвиг грунта, имеющего пористость выше критической, сопровождается стремлением грунта уменьшить свою пористость. Таким образом, критическая пористость в определенной степени может быть использована как критерий для оценки устойчивости грунта в отношении разжижения.

При описании процесса разжижения необходимо учитывать следующие особенности поведения грунтов.

Процесс деформации грунтового массива, связанный с изменением касательных напряжений, имеет нелинейный характер. В работах [1], [2]

отмечено, что угол внутреннего трения, примерно равный для песков углу естественного откоса, и определяющий в соответствии с формулой Кулона касательные напряжения в массиве грунта, при влажности 13 – 14 % имеет обычное для соответствующих песков и супесей значение; при повышении влажности угол естественного откоса резко уменьшается, доходя при влажности 17 – 20 % почти до нуля – рисунок 1.

При циклическом изменении нагрузки на диаграммах «напряжение – деформация» наблюдаются петли гистерезиса [3] – рисунок 2.

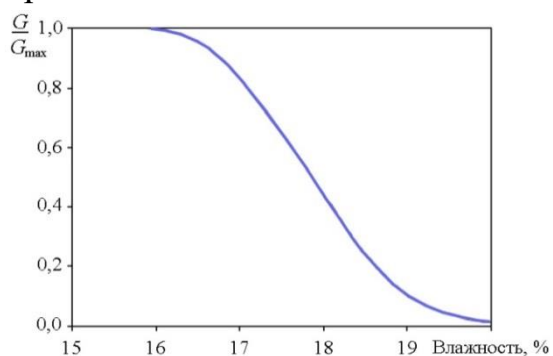


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента внутреннего трения ( $G = \text{tg } \varphi$ ) от влажности

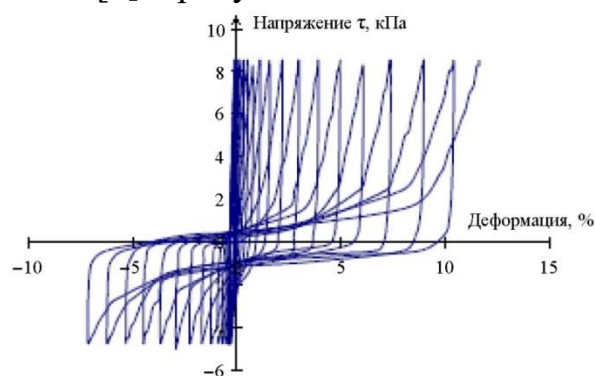


Рисунок 2 – Зависимость деформации от нагружения при циклическом изменении нагрузки

Разжижение грунта может иметь и тиксотропную природу, при которой под влиянием внешнего воздействия (вибрации, встряхивания) грунт разжижается, переходит в состояние «тяжелой жидкости», а затем, когда воздействие прекращается, возвращается в первоначальное состояние, сгущается и упрочняется. Механизм тиксотропии обусловлен тем, что в случае механического воздействия на коллоидную систему вода, связанная с частицами грунта, переходит в свободное состояние. При этом водные оболочки в местах бывших контактов резко утолщаются, из-за чего структурные связи между частицами нарушаются, и коллоидная система быстро разжижается.

Отмечено [4], что грунты, в которых возникают процессы тиксотропии, характеризуются следующим:

- преобладанием частиц размером не более 0,01 мм;
- наличием в составе не менее 2 % глинистых частиц.

Это позволяет объяснить, почему не обладают тиксотропностью чистые песчаные и гравийно-галечниковые грунты. А добавление небольшого количества тиксотропного грунта с наличием глинистых частиц к нетиксотропному сообщает последнему тиксотропные свойства.

Существенное влияние на тиксотропные превращения оказывает влажность грунта. При влажности менее оптимальной и равной ей тиксотропные превращения наблюдаются только у супесей. С повышением влажности сверх ее

оптимального значения интенсивность тиксотропных превращений заметно и непрерывно возрастает.

Процессы разупрочнения, являясь следствием механических воздействий, протекают весьма быстро. По прекращении внешнего воздействия начинается обратный процесс – упрочнение грунта. Длительность тиксотропного восстановления и упрочнения структурных связей существенно зависит от химико-минерального состава, дисперсности и влажности грунтов и может изменяться от десятков минут до десятков суток [3]. Явление тиксотропии может повторяться много раз для одного и того же грунта при механических воздействиях, однако установлено [5], что у некоторых тиксотропных систем наблюдается потеря со временем тиксотропных свойств.

Особый интерес представляют процессы разжижения в слабосвязных существенно пылеватых грунтах – от песков до легких суглинков и лёссовых грунтов. Реакция на динамические воздействия таких грунтов в целом подчиняется тем же закономерностям, но имеет ряд особенностей.

Во-первых, наблюдается резкая потеря прочности даже при незначительной интенсивности динамического воздействия, выражающаяся в быстром разжижении водонасыщенных грунтов. Это обусловлено особенностями смешанной по своему типу структуры – кулоновское трение меньше, чем в чистом песке, а коагуляционная сетка чрезвычайно слабая и часто прерывистая. Относительно низкая проницаемость затрудняет уменьшение порового давления и облегчает быстрое разжижение грунта.

Вторая особенность – постепенное и очень медленное увеличение прочности после прекращения динамического воздействия, складывающееся из двух процессов: слабого уплотнения грунта (из-за низкой скорости отдачи влаги) и упрочнения коагуляционной структурной сетки, имеющего тиксотропную природу. Уплотнение тормозится низкой фильтрационной способностью и определяется скоростью выравнивания порового давления, а тиксотропное упрочнение завершается в течение нескольких часов (до суток).

Особенность поведения лёссовых грунтов – резкое (в 2–3 раза) падение прочности при увеличении их влажности всего на 1–3 % вблизи ее критического значения, близкого к пределу текучести. Такое поведение связано, во-первых, с важной ролью свободной воды в возникновении лавинообразного разрушения структурных связей грунта; во-вторых, с низкой суммарной площадью его межчастичных контактов смешанного типа при высокой начальной пористости; в-третьих, с низкой водопроницаемостью, замедляющей диссипацию порового давления. При докритических влажностях разупрочнение, как правило, невелико – потери прочности обычно не превышают 15–20 %. Чувствительность лёссовых

грунтов к динамическим нагрузкам повышается с уменьшением содержания глинистых частиц.

Плывунные явления – наиболее сложные по своей природе и обусловлены одновременным развитием процессов коагуляционного структурообразования и гравитационного уплотнения. Эти явления характерны для «переходных» (от чистых песков к глинам) видов грунтов, таких как пылеватые пески, супеси и некоторые разновидности легких суглинков и связаны с разрушением в динамических условиях как коагуляционных, так и механических контактов. При этом специфический состав этих грунтов способствует взаимному усилению разрушения обоих видов контактов. Поэтому плывунные грунты в разжиженном состоянии обладают минимальной вязкостью (меньшей, чем у разжиженных глин или песков) и наибольшей подвижностью среди всех дисперсных грунтов. Такие особенности плывунных грунтов делают их наиболее опасными в динамическом отношении. Развитие плывунных явлений сопровождается медленным уплотнением грунта после снятия внешнего воздействия, небольшой его водоотдачей и постепенным снижением порового давления.

Выполненный анализ изменения свойств грунтов оснований гидротехнических сооружений при изменении нагрузки на них показал, что учет структуры грунтов необходим не только для прочностных расчетов и расчетов статической устойчивости конструкций. Учет характера грунтов, их водонасыщенности и реакции на динамические воздействия позволяет спрогнозировать возможность потери несущей способности грунтов.

Слабые аллювиальные грунты, на которых, как правило, располагаются судопропускные и подпорные сооружения гидроузлов, проявляют тенденции к разжижению, поскольку строительство гидроузлов с формированием напорного фронта способствует повышению содержания воды в грунте и формированию фильтрационных потоков с существенными градиентами.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Моргунов К. П. Проблемы разжижения грунтов в основаниях гидротехнических сооружений / К. П. Моргунов, М. А. Колосов. – Наука и техника. 2022. Т. 21, № 3. – с. 201–210.

2. Болдырев Г. Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования / Г. Г. Болдырев. – Москва: Изд-во ООО Прондо. 2017. – 476 с.

3. Динамика грунтов: учебное пособие / сост. Л. А. Строкова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 190 с.

4. Ступников В. С. Тиксотропия глинистых грунтов / В. С. Ступников, Е. М. Данчук, Л. И. Черкасова. – Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral», 2019. № 1. с. 16 – 21.

5. Осипов В. И. Природа прочности и деформационных свойств глинистых грунтов / В. И. Осипов. – Москва: Изд-во МГУ, 2019. – 232 с.

УДК 626.44

В.Г. Богатырев

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала  
С.О. Макарова Санкт-Петербург, Российская Федерация

### **ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ БЕСШВАРТОВНОГО ШЛЮЗОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Эксплуатация судоходных шлюзов в период продленной навигации сопряжена со сложностями использования устройств и оборудования в условиях отрицательных температур, на которые они изначально не проектировались. Опыт наблюдений и эксплуатации показывает, что в камере шлюза по линии разделения сред воздух-вода образуется сплошной контур наледи, особенно интенсивно наледь образуется по отметкам верхнего и нижнего бьефа [1]. Образовавшаяся наледь уменьшает габарит ширины шлюза, препятствует полному заходу двустворчатых ворот в шкафные ниши и препятствует свободному перемещению плавучих рымов, вплоть до полного ограничения возможности их перемещения по причине примерзания к направляющим рельсам. Данные ограничения вызывают различные сложности при шлюзовании и требуют организации дополнительных мероприятий по их устранению, что в свою очередь усложняет процесс шлюзования и увеличивает его продолжительность. Для обеспечения работы плавучих рымов в зимних условиях предлагались варианты оборудования, как самих рымов, так и направляющих конструкций, по которым рымы перемещаются, системами обогрева. Однако в настоящее время ни на одном судоходном шлюзе России плавучие рымы не оборудованы системами обогрева и судопропуск в зимний период, в условиях обмерзания движущихся частей швартовных устройств не может осуществляться с их использованием. Нет отработанных и прошедших практические испытания систем, обеспечивающих работу обледеневших рымов, не разработаны режимы функционирования систем обогрева, не разработаны варианты их размещения на плавучих рымах, не исследовано поведение механизмов швартовки в зимних условиях. Реализация таких систем на шлюзе