

весь нелинейный процесс деформирования во всем интервале действующих напряжений. Установлено, что начальная влажность оказывает существенное влияние на удельную работу упругого и упругопластического деформирования, а также работу диссипации, причем чем выше исходная влажность песков, тем выше значения величин перечисленных удельных работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособие / С. С. Вялов. – М. : Высш. шк., 1978. – 447 с.
2. Зиангиров, Р. С. Объемная деформируемость глинистых грунтов / Р. С. Зиангиров. – М. : Наука, 1979. – 164 с.
3. Кульчицкий, Л. И. Физико-химический основы формирования свойств глинистых пород / Л. И. Кульчицкий, О. Г. Усыяров. – М. : Недра, 1981. – 178 с.
4. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / под ред. Е. Д. Щукина [и др.]. – М. : МГУ, 1985. – 266 с.
5. Термодинамические аспекты механики мерзлых грунтов / под ред. С. С. Вялова. – М. : Наука, 1988. – 103 с.
6. Deformation behaviour of clay under repeated one-dimensional unloading–reloading. (2015) Canadian Geotechnical Journal / A. Suddepong, J. Chai, S. Shen, J. Carter. – Vol. 52 (8). – P. 1035–1044.
7. Песчаные грунты России : в 2 т. / под ред. В. Т. Трофимова [и др.]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2021. – Т. 1. – 394 с.
8. Королев, В. А. Термодинамика грунтов : учебник / В. А. Королев. – М. : Сам полиграфист, 2016. – 258 с.
9. Лабораторные работы по грунтоведению : учеб. пособие / под ред. В. Т. Трофимова [и др.]. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : КДУ, 2017. – 654 с.

УДК 624.131 (476)

В. Л. МОЛЯРЕНКО¹, И. А. КРАСОВСКАЯ², А. И. ПАВЛОВСКИЙ³

¹Беларусь, Гомель, ГГУ имени Ф. Скорины

²Беларусь, Витебск, ВГУ имени П. М. Машерова

³Беларусь, Минск, БНТУ

E-mail: molyarenko-vova@bk.ru, iakrasovskaya@yandex.ru, aipavlovsky@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Добыча и переработка твердых полезных ископаемых открытым и подземным способами предполагает складирование на поверхности вскрышных и вмещающих горных пород, отходов переработки и обогащения. Как следствие, формируются массивы техногенных грунтов, которые на поверхности земли представлены в виде внутренних и внешних отвалов при карьерной разработке полезного ископаемого и в виде терриконов или площадных отвалов при шахтной добыче, переработке и обогащении. При разработке месторождений

общераспространенных полезных ископаемых накапливаются техногенно переотложенные грунты, в основном песчано-глинистого состава, реже крупнообломочные, возникшие при дроблении скальных грунтов.

В Беларуси функционирует целый ряд предприятий по добыче, переработке и обогащению полезных ископаемых. Крупнейшие горнопромышленные комплексы: производственное объединение «Доломит» (месторождение доломитов «Руба»); ОАО «Беларуськалий» (Старобинское и Петриковское месторождения калийных солей); РУПП «Гранит» (карьер по добыче строительного камня «Микашевичи»); ОАО «Гомельский химический завод» (предприятие по производству фосфоросодержащих минеральных удобрений, серной и фосфорной кислот), а также целый ряд предприятий по разработке общераспространенных полезных ископаемых (пески, песчано-гравийные смеси, глины и т. д.).

Формирующийся техногенный рельеф является структурной основой (каркасом) и определяет основные направления пространственно-временной дифференциации вещества и энергии в морфолито-технических системах, определяя движение поверхностных и подземных вод, гравитационных потоков обломочного материала и воздушных суспензий, образующихся в результате горных работ. Разнообразие доставки вскрышных пород и отходов переработки, мест расположения, строение, морфология и морфометрические характеристики отвалов и терриконов существенно влияют на состав и свойства формирующихся техногенных грунтов.

Техногенные грунты отвалов, формирующиеся в процессе карьерной разработки полезных ископаемых, состоят из смеси местных естественных грунтов, сложение которых нарушено в результате производства горнотехнических работ. В частности отвалы вскрышных пород отработанного доломитового карьера «Руба» в окрестностях Витебска, сформированные в разные годы эксплуатации карьера, сложены преимущественно глинистыми грунтами, по составу представленными моренными суглинками и супесями с гравийно-галечным материалом, линзами песков и обломками доломитов различного размера, суммарной мощностью более 17 м. Местами техногенные глинистые грунты перекрыты маломощными (2–4 м) переотложенными аллювиальными серовато-бурыми пылеватыми песками, иногда мелкими и средними, часто с супесчано-суглинистыми гнездами и линзами. К песчаным отвалам повсеместно приурочен горизонт грунтовых вод, вскрываемый на глубине 0,5–0,6 м.

По результатам инженерных изысканий, проведенных Витебским отделом РУП «Геосервис», песчаные грунты этих отвалов преимущественно рыхлого сложения, коэффициент пористости их в среднем составляет 0,73, коэффициент фильтрации – 0,52 м/сут, угол естественного откоса в сухом состоянии – 44°, под водой – 32°.

Отвальные глинистые грунты обладают высокой плотностью и находятся преимущественно в полутвердой и тугопластичной консистенции, имеют умеренную естественную влажность, слабоводопроницаемы, при промерзании склонны к пучению. Сжимаемость насыпных глинистых грунтов в основном средняя, их модуль деформации по компрессионным испытаниям в интервале

нагрузок $1-2 \times 10^5$ Па составляет 3,2–5,9 МПа, сцепление – $0,18-0,31 \times 10^5$ Па, коэффициент внутреннего трения – 0,195–0,28.

Техногенные грунты отвалов ОАО «Гомельский химический завод» представляют собой отвалы фосфогипса. Исходя из результатов, полученных методом ситового анализа, преобладают фракции в размерах 0,2–0,1 мм и менее 0,1 мм и на основе гранулометрической классификации глинистых и песчаных грунтов исследуемые грунты можно отнести к суглинистым.

От гранулометрического состава грунтов зависят: процессы перемещения, превращения и накопления веществ; физические, физико-механические и водные свойства грунтов, такие как пористость, влагоемкость, водопроницаемость, водоподъемность, структурность, воздушный и тепловой режим. Пористость грунтовых отвалов фосфогипса в рыхлом сложении составляет 43,3 %, а коэффициент пористости – 0,7636. Грунт является сильнопористым (пористость больше 30 %), величина плотности грунта составляет $0,8-1,05$ г/см³. На показатели плотности грунта оказывает влияние степень его влажности и пористость. Коэффициент фильтрации в среднем составляет 5,216 см/с, что относит его к водопроницаемым грунтам. Величина коэффициента фильтрации грунтов зависит от ряда факторов: гранулометрического состава, структуры и пористости грунта, проницаемости, формы частиц, влажности, температуры воды и содержания в ней растворенных веществ, в т. ч. и воздуха (газов). Чем больше окатанность частиц, слагающих грунт, тем больше его водопроницаемость. С повышением содержания пылеватых и глинистых частиц в грунте величина коэффициента фильтрации резко снижается. Также коэффициент фильтрации определяется размером пор или раскрытием трещин, а также сильно зависит от извилистости поровых ходов. Размер пор и их форма в значительной степени определяются дисперсностью грунтов. Увеличение дисперсности грунтов уменьшает водопроницаемость грунтов.

Число пластичности соответствует численным показателям глины (> 17), а влажность грунта на границе текучести составляет 65,78–67,61 % (в среднем 66,69 %), на границе раскатывания – 49,40 %. Величина свободного набухания грунта равна 0,097 (средненабухающий).

Набухание грунтов зависит от минерального, гранулометрического и химического состава грунта, влажности и плотности сложения, состава и концентрации взаимодействующего с грунтом раствора. Набухание обусловлено капиллярными, осмотическими и адсорбционными процессами поглощения влаги грунтом, среди которых основную роль играют осмотические процессы. Благодаря им при гидратации постепенно увеличивается влажность грунта, возрастает толщина водных пленок вокруг частиц и одновременно растет толщина двойного электрического слоя, что приводит к проявлению сил расклинивающего давления между частицами, вызывающих разрушение структурных связей между ними, их разъединение и увеличение объема системы в целом. В набухших грунтах преобладают коагуляционные контакты.

Угол естественного откоса грунта в воздушно-сухом состоянии и под водой составил более 45°. Фосфогипс является сильно сжимаемым материалом. При его сжатии и приложении давления происходит уменьшение пористости, выжимание

или перемещение влаги по его массе и наблюдается увеличение относительной деформации грунта. Модуль деформации варьируется в широких пределах во всем диапазоне уплотняющих давлений (от 0,016 до 0,1 МПа). Техногенный грунт обладает большими силами сцепления частиц. Разрушающее напряжение – разрывная прочность грунта, уплотненного под вертикальной нагрузкой, составляет 0,105 МПа. Грунт по своей структуре относится к связным материалам.

Внутреннее трение в грунте проявляется при деформациях сдвига вследствие заклинивания и зацепления отдельных частиц друг за друга. Нормальным давлениям 0,05, 0,1 и 0,15 МПа соответствуют предельные касательные напряжения 0,035, 0,0725, 0,105 МПа. Для этих условий справедливы следующие средние показатели: угол внутреннего трения $tg\varphi = 0,7$, $\varphi = 34^\circ$ и удельное сцепление $c = 0,00083$ МПа. Сдвиг происходит под действием касательных сил; при сдвиге одна часть тела перемещается относительно другой. Разрыв тела происходит под действием нормальных растягивающих сил и морфологически выражается в виде трещин и отделении одной части тела от другой.

Техногенные грунты терриконов формируются при отсыпке на поверхности земли вскрышных и вмещающих пород при подземной добыче полезных ископаемых и последующей их переработке. К таким техногенным грунтам относятся терриконы солеотвалов ОАО «Беларуськалий» в Солигорске. В отходы попадает галитовая рыхлая масса, формирующая солеотвалы (терриконы) высотой более 120 м. По механическому составу галитовые отходы сходны со средне- и разнородными песками. Плотность частиц галитовых техногенных отложений находится в пределах 2,1–2,2 г/см³ и обусловлена их минеральным составом. Высокая пористость верхних слоев солеотвалов создает благоприятные условия для вертикальной миграции атмосферных осадков в глубь массива. Величина коэффициента фильтрации техногенных галитовых образований в верхней части массивов превышает 90–100 м/сут.

Техногенные грунты, формирующиеся в районах добычи и переработки полезных ископаемых, в виде отвалов и терриконов по своим свойствам отличаются от грунтов в естественном залегании. Происходящие при разработке, транспортировке и складировании нарушения структурных связей грунтов, гранулометрического состава и влажности приводят к тому, что техногенные грунты обладают меньшей плотностью и прочностью по сравнению с природными.

Необходимо отметить, что по мере увеличения мощности отвалов с глубиной происходит закономерное уплотнение грунтов и повышение показателей их прочности. Однако с течением длительного времени в отвале могут происходить различные химико-минеральные преобразования состава грунтов за счет процессов выветривания и некоторое разуплотнение, что необходимо учитывать при оценке свойств отвалов. Активно развиваются различные процессы, влияющие на состав, состояние и свойства отсыпанных грунтов: выветривание; обвалы и оползни, плоскостной смыв и ручейковая эрозия на откосах отвалов и терриконов; формирование техногенных водоносных горизонтов; образование суффозионных провалов и т. д.