

Н. П. Вырко, профессор; И. И. Тумашик, канд. техн. наук; С. В. Ярмолик, ассистент

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ, УСТРОЕННЫХ НА СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ

The article is devoted to problems of the modeling process of the carrying the temperature warmth. A give the new method temperature stabilization forest roads for types to relationship claying soils in this article. On the grounds of result of the experimental studies possible to draw a conclusion on that chosen a way temperature stabilization soils provides necessary warm-up parameters for modification micro unit structures of the soil.

Практика строительства и эксплуатации транспортно-технологических путей в лесных массивах показывает, что особые трудности возникают, когда основанием дороги служат суглинистые и глинистые грунты, которые относятся к условно-пригодным и непригодным (в основном жирные глины и тяжелые суглинки) для укрепления вяжущими материалами. Необходимо также отметить, что при укреплении грунтов дозировка вяжущего для каждого типа грунта неодинакова. К примеру, песчаные грунты требуют для достижения наилучшего укрепления 8...10%, а глинистые – 12...15% цемента от массы грунта. Большой расход вяжущих материалов при укреплении глинистых грунтов наблюдается в связи со значительной удельной внутренней поверхностью, т. е. они имеют больший объем пор по сравнению с песчаными грунтами. Вообще существует несколько особенностей, связанных с возможностью применения глинистых грунтов в качестве дорожно-строительных материалов. Этот тип грунтов во многом отличается от остальных при определении основных показателей, характеризующих несущую способность грунтов и их пригодность. Возникает также ряд вопросов при прогнозировании колебания на грунтовых дорогах, построенных на основе глин и суглинков. В частности, во многих случаях могут быть поставлены под сомнение результаты расчетов сопротивляемости грунтов сдвигу [1, 2].

Для улучшения условий проезжаемости транспортных средств по дорогам, устраиваемым на таких грунтах, необходимо разработать методы их укрепления и стабилизации последних. Одним из перспективных способов является термостабилизация. Группы суглинков и глин обладают активной тонкодисперсной частью. В этих грунтах явления сорбции, коагуляции, электрофореза и т. д. будут способствовать образованию новой структуры грунта с заданными свойствами, отвечающими требованиям дорожного строительства. Процессы, происходящие при термической обработке глинистых грунтов и смесей на их основе при различных температурных режимах, значительно отличаются друг от друга.

При низкотемпературном режиме обработки (порядка 90–200°C) – первый температурный

режим – происходит удаление влаги из грунта и выгорание всех органических примесей, входящих в его состав.

При более высоких температурных показателях (200–500°C) – второй температурный режим – происходят некоторые химические преобразования в содержащихся в грунте минеральных примесях. Кроме того, частично удаляется химически связанная влага (теряются водные адсорбционные пленки, состоящие из ориентированных молекул воды в пространстве электрического поля глинистых частиц). В процессе удаления воды происходит притягивание глинистых частиц друг к другу и полностью теряется адсорбционная способность. Вследствие процесса стягивания грунтовых частиц уменьшается процент тонкодисперсных частиц и, как следствие, существенно снижается пылимость грунтов. Меняется отношение глинистой системы к воде, теряется способность к смачиванию и гидратации.

При высокотемпературном обжиге (500–900°C) – третий температурный режим – происходит ряд изменений не только на поверхности микрочастиц, но и в их структуре. Под влиянием высоких температур происходят сложные физико-химические превращения, протекают реакции дегидратации, легкоплавкие компоненты расплавляются и образуют сложные соединения с перестройкой кристаллических решеток (в частности, при температуре 573°C α -кварц переходит в β -кварц). В результате всех этих процессов обожженные глинистые грунты приобретают высокую прочность, водо- и морозостойкость, а также другие положительные свойства, которыми должны обладать материалы, применяемые в дорожном строительстве.

Для проведения эффективной термической стабилизации грунтов необходимо знать глубину проникновения расчетной температуры обработки и расстояние от источника нагрева. Только в этом случае по всей толщине обрабатываемого грунтового слоя произойдут необходимые структурные преобразования грунта.

Одной из основных характеристик грунтов при теплотехнических расчетах является их теплоемкость, т. е. способность аккумулировать или отдавать тепловую энергию при теплообмене. Теплоемкость грунта зависит от соотноше-

ния в нем глинистых и песчаных частиц: чем больше в грунте глинистых частиц, тем больше величина его теплоемкости. Объемная теплоемкость грунта численно равна количеству тепла, необходимого для изменения единицы объема грунта на 1°C в заданном интервале температур:

$$c_{об} = \gamma_0 c_y, \quad (1)$$

где $c_{об}$ – объемная теплоемкость грунта, $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{K}$; γ_0 – объемная масса грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_y – удельная теплоемкость грунта, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$, которая может быть определена по формуле

$$c_y = c_{ск} + \frac{W}{100} c_v, \quad (2)$$

где $c_{ск}$ – удельная теплоемкость скелетных частиц, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$ (для глинистых грунтов $c_{ск} = 879,3 \dots 921,1 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$, для суглинков – $c_{ск} = 795,5 \dots 837,9 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$, для супесей – $c_{ск} = 753,7 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$, для песчаных грунтов – $c_{ск} = 711,8 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$); W – общая весовая влажность грунта; c_v – удельная теплоемкость воды, принимаемая в зависимости от температуры, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$.

При наличии фазовых переходов в грунтах величину удельной теплоемкости можно заменить на величину удельной эффективной теплоемкости, т. е. на суммарное количество тепла, идущее на изменение температуры единицы веса грунта и фазовые превращения. Теплопроводностью грунтов является их способность проводить тепло от нагретых участков к более холодным. Теплопроводность грунта определяется соотношением твердой, жидкой и газообразной составляющих, структурой, текстурой (дисперсностью, пористостью и др.), влажностью, агрегатным состоянием воды и температурой. Теплопроводность грунтов возрастает с увеличением влажности грунтов, однако при этом существенно увеличится расход тепловой энергии для осуществления структурных преобразований грунта термической обработкой.

Одним из важнейших показателей при проведении термической стабилизации грунтов является температуропроводность. Температуропроводностью грунтов называется скорость распространения изменения температуры вследствие поглощения или отдачи тепла [3, с. 102]. Она оценивается коэффициентом температуропроводности, который численно равен отношению теплопроводности грунта к его объемной теплоемкости. Температуропроводность грунтов, как и теплопроводность, зависит от текстурных и структурных особенностей грунта, состояния влаги и температуры.

Явление теплопроводности возникает при наличии градиента температуры и в одномерном стационарном случае ($T = T(x)$) может быть описано уравнением Фурье:

$$dQ = -k \frac{dT}{dx} ds dt, \quad (3)$$

где dQ – количество теплоты, переносимое за время dt через площадку ds в направлении нормали x к этой площадке в сторону убывания температуры; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры; k –

коэффициент теплопроводности, численно равный количеству теплоты, перенесенному через единицу поверхности за единицу времени при градиенте температур $1 \text{ K}/\text{м}$, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$.

Согласно элементарной кинетической теории,

$$k = \frac{1}{3} u \lambda \rho C_p, \quad (4)$$

где u – средняя скорость теплового движения молекул; λ – средняя длина свободного пробега молекул; ρ – плотность газа; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Известно, что явление теплопроводности твердых тел состоит в передаче энергии в форме теплоты, при которой температура T в различных точках тела измеряется с течением времени, т. е. $T = f(x, y, z, t)$, где x, y, z – координаты точки; t – время нагрева.

Решая дифференциальное уравнение Фурье однородного изотропного тела, можно установить вид функции f :

$$\frac{dT}{dt} = a \Delta T + \frac{q}{c\delta}, \quad (5)$$

где q – количество теплоты, выделяемой внутренним источником теплоты в единице объема тела за единицу времени; c – удельная теплоемкость тела; δ – плотность тела; Δ – дифференциальный оператор Лапласа; a – коэффициент температуропроводности, равный $a = \frac{k}{c\delta}$.

Для стационарной теплопроводности (при $\frac{dT}{dt} = 0$) соответственно $a \Delta T + \frac{q}{c\delta} = 0$. При отсутствии внутренних источников тепла $\Delta T = 0$ (при $q = 0$).

Для практического решения уравнения теплопроводности должны быть заданы начальные условия $T = f(x, y, z, t)$ и условия теплообмена на границе грунтового массива.

В нашем случае для бесконечного полупространства, разделяющего две среды (воздушная среда и грунтовый массив) с постоянными температурами $T_{1и}$ и $T_{2гр}$ (причем $T_{1и} > T_{2гр}$), удельный тепловой поток (количество теплоты, переносимое в единицу времени через единицу поверхности постоянной температуры в направлении нормали к ней) через грунтовый слой определенной толщины может быть рассчитан по формуле

$$q = \frac{k}{H} (T'_{1н} - T'_{2гр}),$$

или

$$q = \frac{T'_{1н} - T'_{2гр}}{R},$$

где $T'_{1н}$ и $T'_{2гр}$ – температуры внешних поверхностей грунтового слоя; R – термическое сопротивление грунта, определяемое по формуле

$$R = \frac{H}{a_2},$$

где H – глубина грунта, при которой его температура является постоянной (3,2 м); a_2 – коэффициент теплопередачи.

Температуры на внешних поверхностях $T'_{1н}$ и $T'_{2гр}$ грунтового слоя могут быть получены из выражений

$$T_{1н} = T'_{1н} - \frac{q}{a_1}, \quad T_{2гр} = T'_{2гр} - \frac{q}{a_2},$$

где a_1 и a_2 – коэффициенты теплопередачи.

Температура грунта на расстоянии l от его поверхности можно определить по формуле

$$T = T_{1н} - \frac{T'_{1н} - T'_{2гр}}{d} l, \quad (6)$$

где $T_{1н}$ – температура источника тепла; d – расстояние до рассматриваемой точки.

Данная формула справедлива при $L \gg H$, где L – линейные размеры полупространства, в нашем случае $L = \infty$. Однако такое аналитическое решение чрезвычайно сложно с точки зрения вычислений, не учитывает влажность грунта и соответственно затраты тепла на испарение из него влаги. Численное решение по сравнению с аналитическим гораздо проще, вследствие этого связь между влаго- и теплообменом в грунтовых слоях дорожной конструкции предлагается выразить, используя за основу уравнение, согласно которому глубина проникания изотермы структурного изменения грунта как слоистого полупространства будет равна

$$h = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{k \cdot W \cdot \delta} \left[t_{из} - (t_{п} - t_{гр}) \cdot \frac{R_{п}}{R_0} - t_{в} \right]}, \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности грунта, ккал/м · ч · град; T – время нагрева, ч; k – коэффициент, учитывающий затраты тепла на испарение влаги из грунта, ккал/кг; W – влажность грунта, доли; δ – плотность грунта, кг/м³; $t_{п}$, $t_{гр}$, $t_{из}$, $t_{в}$ – температуры соответственно источника нагрева, грунта, изменения микроагрегатной структуры грунта, воздуха, °C; $R_{п}$ – тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен грунта с окружающим воздухом, град · м² · ч/ккал; R_0 – общее тепловое сопротивление грунта, град · м² · ч/ккал.

Данные распределения температур по глубине грунтового массива с течением времени, полученные в соответствии с зависимостью (7), хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, проведенными в лабораторных условиях. При термообработке колесопроводов спаренными газовыми горелками на глубине 0,1 м температура обжига составляла не менее 590°C. При этом легкоплавкие компоненты глинистых грунтов расплавились и образовали сложные соединения с перестройкой кристаллических решеток (в частности, при температуре 573°C осуществился переход α -кварца в β -кварц). В результате процессов преобразования существенно изменяется микроагрегатная структура обожженных глинистых грунтов, они приобретают высокую прочность, водо- и морозостойкость. Установлено, что на время, необходимое для проведения термической стабилизации, существенное влияние оказывает исходная влажность грунтов. На основании результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что выбранный способ термостабилизации грунта обеспечивает необходимые температурные параметры для изменения микроагрегатной структуры грунта.

Литература

1. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. – М.: Транспорт, 1971. – 232 с.
2. Вырко Н. П., Насковец М. Г., Тумашик И. И. Способ улучшения транспортно-эксплуатационных качеств лесных дорог // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. / БГПА. – Минск, 1996. – Ч. 2. – С. 19–22.
3. Вырко Н. П., Леонович И. И., Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1977. – 224 с.