УДК 625.731

Г.Ж. Айдарбеков
Кызылординский государственный университет им. Коркыт ата, г. Кызылорда

О ВЛАГОНАКОПЛЕНИИ ГРУНТА В ТЕЛЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА (ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ)

Вопрос борьбы с пучинами на автомобильных дорогах является актуальным как для территории Казахстана, так и для различных регионов стран СНГ. Неблагоприятные грунтово-геологические условия, включающие наличие пучинистых грунтов, высокий уровень грунтовых вод или необеспеченный поверхностный сток характерные большинству дорог Казахстана, особенно на местной сети республики. Поэтому, при проектировании, для обеспечения надежной работы дороги в сложных грунтово-геологических условиях, требуется разработка комплекса противопучинистых мероприятий, приводящих к удорожанию стоимости строительства. В то же время, недоучет сложности груново-геологических условий либо несоблюдение требований проекта при строительстве нередко приводит к массовым проявлениям пучин на построенных дорогах. В результате, разрушение дорожной одежды, что затрудняет движение автотранспорта.

Одной из главных причин образования пучин на автомобильных дорогах является изменение водно-теплового режима в теле земляного полотна и в конструктивных слоях дорожной одежды. Как показывают результаты многочисленных исследований зарубежных и отечественных исследователей, появление пучин на дорогах в значительной степени зависит от влагонакопления грунта, расположенного у подножья земляного полотна автомобильных дорог или на зеленых полосах городских дорог.

Таким образом, влажность W земляного полотна находится в функциональной зависимости от суммарного воздействия климата, почвогрунтов, рельефа местности, грунтовых и поверхностных вод. В то же время на величину существенное влияние оказывают и конструктивные особенности дорожной одежды и земляного полотна, т.е. водопроницаемость покрытий, пористость нижних слоев дорожной одежды, коэффициент уплотнения земляного полотна и др. Эту зависимость можно выразить по формуле [1]:

$$W = f\left(\sum Г_i \sum D_i\right), \tag{1}$$

где $Г_i$ - суммарное воздействие географического комплекса; D_i - суммарный дорожный комплекс.

Таким образом, исследование влагонакопления в грунтах земляного полотна должно основываться на совместном учёте геокомплекса и дорожной конструкции. Известно, что расчётная влажность W_P всегда будет находиться в пределах

$$W_{MAX} \geq W_P \geq W_{ОПТ}, \tag{2}$$

$$W_{MAX} = W_{П.В.} - \nu, \tag{3}$$

где $W_{опт}$ – оптимальная влажность грунта, %; $W_{п.в.}$ – полная влагоемкость грунта, %; ν - объём защемленного воздуха в порах грунта, %.

Наиболее важной задачей для принятия оптимального проектного решения являются определение прочностных и деформационных свойств местных грунтов в широком диапазоне плотности, влажности и их фильтрационной способности. Основываясь на результатах проведенных исследований и исходя из классификации В.М. Сиденко типов водно-теплового режима [2], для рассматриваемого региона установлены следующие типы водно-теплового режима земляного полотна, аналитическое выражение которого имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + в \frac{\partial W}{\partial T}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \pm\alpha_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \alpha_1 в_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \tag{5}$$

где T, W – температура, влажность на глубине z в момент времени t, град, доли единицы; α, α_1 – соответственно коэффициенты тепло- и влагопроводности грунта, м^2/сутки; $в$, $в_1$ – коэффициенты, характеризующие теплообмен при фазовых превращениях и термомиграции влаги, град, 1/ч.

Рассмотрим математическую модель диффузно-инфильтрационного типа водно-теплового режима, представленную системой дифференциальных уравнений (1) и (2) как автомодельную задачу.

В этом случае начальные и граничные условия, полученные на основе экспериментальных исследований, можно записать следующим образом:

$$W(Z;0) = W_H, \quad W(0,Tt) = W_H(1+m_1 t), \quad W(\infty,T) = W_H, \tag{6}$$

$$t(Z;0) = T_H, \; T(0,t) = T_H(1-m_2 t), \; t(\infty,t) = T_H, \tag{7}$$

где W_H, T_H - начальное распределение влажности и температуры по глубине; m_1, m_2 – коэффициенты, характеризующие интенсивность изменения влажности и температуры во времени. Здесь $[m_1]$= 1/ч и $[m_2]$ = град/ч:

$$m_1 = \frac{W_K - W_H}{W_H T}, \; m_2 = \frac{T_H - T_K}{T_H t}, \tag{8}$$

где T_K, W_K - значения температуры и влажности в конце влагонакопления при глубине Z=0; t – время влагонакопления, сутки.

Для решения системы уравнений (1) и (2) при начальных и граничных условиях (3) и (4) проведем преобразование уравнений к виду:

$$\frac{\partial(T - вW)}{\partial t} = \frac{\partial^2(T\alpha)}{\partial Z^2}; \quad \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial^2(\alpha_1 W)}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2(T\alpha_1 в_1)}{\partial Z^2}.$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} + \alpha_1 в_1 \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$$

или

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial(T - вW)}{\partial t} &= \frac{\partial^2(\alpha T)}{\partial Z^2}; \\ \frac{\partial W}{\partial t} &= \frac{\partial^2(\alpha_1 в_1 T + \alpha_1 W)}{\partial Z^2}. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Второе уравнение системы (5) умножим на коэффициент A (A=$Const$)

$$\frac{\partial AW}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial Z^2}\left[A\alpha_1 в_1 T + \alpha_1 AW\right]. \tag{10}$$

Коэффициент A определим из условия (10) по равенству функций:

$$A = \frac{\alpha_1 + вв_1\alpha_1 - \alpha \pm \sqrt{D}}{2\alpha_1 в_1},$$

где дискриминант квадратного уравнения будет иметь вид

$$D=\left(\alpha_1+вв_1\alpha_1-\alpha\right)^2+4в\alpha>0\text{, т.к. } в>0;\alpha>0.$$

Так что α, α_1, $в$, $в_1$ - положительные величины и поэтому $D>0$ и $D\neq 0$.

Уравнение (8) напишем в безразмерном виде:

$$t=\tau\frac{H^2}{\alpha},\ Z=H\hat{Z} \tag{11}$$

или

$$\frac{\partial\psi\left(\hat{Z},\tau\right)}{\partial\tau}=a_0\frac{\partial^2}{\partial\hat{Z}^2}\psi\left(\hat{Z},T\right), \tag{12}$$

где $a_0=\left(1+Ав_1\dfrac{\alpha_1}{\alpha}\right)=\dfrac{\alpha+\alpha_1+\alpha_1вв_1+\sqrt{D}}{2\alpha}$.

Из равенства (10) и (12) находим функцию температуры в виде

$$T_{(\eta)}=F(\eta)-(A-в)W. \tag{13}$$

Введем функцию

$$\Phi(\eta)=W^1(\eta). \tag{14}$$

Тогда последнее уравнение примет вид

$$\frac{\alpha_1в_1(A-в)-\alpha_0}{\alpha a_0}\Phi^1(\eta)+\frac{1}{2}\eta\Phi(\eta)=-\frac{\alpha_1в}{\alpha a_0}F^{11}(\eta).$$

Введем величины α^* и β^*:

$$\alpha^*=\frac{\alpha_1в_1(A-в)-\alpha_1}{\alpha a_0},\ \beta_0^*=\frac{\alpha_1в}{\alpha a_0}$$

и разделим уравнение на α^*, и тогда получим обыкновенное дифференциальное уравнение Эйлера в виде

$$\Phi^1(\eta)+\frac{1}{2\alpha^*}\eta\Phi(\eta)=-\frac{\beta^*}{\alpha^*}F^{11}(\eta), \tag{15}$$

$$P(\eta)=\int\frac{1}{2\alpha^*}\eta d\eta=\frac{\eta^2}{4\alpha^*};\quad Q(\eta)=-\frac{\beta^*}{\alpha^*}F^{11}(\eta).$$

Решение уравнения (15) будет:

$$\Phi(\eta)=\exp\left[-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right]\left\{\int_0^\eta\left[\exp\left[\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right]\left[-\frac{\beta^*}{a^*}F^{11}(\xi)\right]\right]d\xi+C_1\right\},$$

т.к. $F(\eta)=(\psi_H-\psi_K)erf\left(\dfrac{\eta}{2}\right)+\psi_K$, то решение уравнения (15) напишется в виде:

$$\Phi(\eta)=exp\left(-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)\left\{C_1+\left[F^1(\eta)exp\left(+\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)-\frac{\eta}{2\alpha^*}F(\eta)exp\left(\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\int\left[F(\xi)\left(\frac{\xi}{2\alpha^*}+\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)\exp\left(\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)\right]d\xi\ \right\}. \tag{16}$$

Функции $F(\eta)=(\psi_K-\psi_H)erf\left(\dfrac{\xi}{2}\right)+\psi_H$ и $F^1(\xi)=\dfrac{1}{\sqrt{\pi}}\exp\left(-\dfrac{\xi^2}{2}\right)(\psi_K-\psi_H)$. Откуда находим, что $F(0)=\psi_K$; $F^1(0)=\dfrac{(\psi_K-\psi_H)}{\sqrt{\pi}}$.

Тогда для функции $\Phi(\eta)=W^1(\eta)$:

$$\Phi(\eta)=W^1(\eta)=C_W^*+C_1\exp\left(-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)+F^1(\eta)+$$
$$+\exp\left(-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)\left\{\int_0^{\eta}F(\xi)\left[\frac{\xi}{2\alpha^*}+\left(\frac{\xi}{2\alpha^*}\right)^2\right]\exp\left(\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)d\xi\right\}, \tag{17}$$

где C_W^* - величина обеспечивающая $\dfrac{dW}{d\eta}\Big|_{\eta=0}=0$; $W(0)=W_K$.

Интегрируя полученное равенство (17) по η с граничным условием $W(0)=W_K$ получим *распределение влаги* в рассматриваемой области [3]:

$$W(\eta)=C_W^*\eta+C_1\int_0^{\eta}\exp\left(\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)d\eta+F(\eta)-T_K-(A-в)W_K+$$
$$+\int_0^{\eta}\left\{\exp\left(-\frac{S^2}{4\alpha^*}\right)\int_0^{S}\left\{F(\xi)\left[\frac{\xi}{2\alpha^*}+\left(\frac{\xi}{2\alpha^*}\right)^2\right]\exp\left(\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)d\xi\right\}dS+W_K\right..$$

При $Z=0$, $\eta=0$ и $W(0)=W_K$; при $\tau=0$ $\eta\to\infty$ и $W_\infty\to W_H$ - согласно начальному условию. Из полученного равенства получаем коэффициент C_1 при $t=0$ в начале процесса, то $\eta\to\infty$; откуда получим $C_W=\dfrac{\psi_K-\psi_H}{\sqrt{\pi\alpha^*}}$.

$$W(\infty)=W_H=C_1\int_0^{\infty}\exp\left(-\frac{\eta^*}{4\alpha^*}\right)d\eta+\psi_H-\psi_K+I_\infty+W_K.$$

Здесь $\psi_H-\psi_K=T_H-T_K+(A-в)(W_H-W_K)$,

где
$$I_{(\infty)}=\int_0^{\infty}\left[\exp\left(-\frac{S^2}{4\alpha^*}\right)\right]\int_0^{S}F(\xi)\left[\frac{\xi}{2\alpha^*}+\left(\frac{\xi}{2\alpha^*}\right)^*\right]\exp\left(\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)d\xi\ \Big\}dS. \tag{18}$$

$$C_1=\{W_K-W_H+T_H+(A-в)W_H-T_K-(A-в)W_K+I(\infty)\}\int_0^{\infty}\exp\left(\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)d\eta,$$

$$\int_0^{\infty}\exp\left(-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)d\eta=\int_0^{\infty}e^{-\frac{S^2}{2}}\sqrt{2\alpha^*}dS=\sqrt{2\alpha^*}\int_0^{\infty}e^{-\frac{S^2}{2}}dS=\sqrt{2\alpha^*}\int_0^{\infty}e^{-\frac{S^2}{2}}dS=$$
$$=\sqrt{2\alpha^*}\Phi(\infty)\frac{\sqrt{2\pi}}{2}=\int_0^{\infty}\exp\left(-\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right)d\eta=\frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha^*}};\ \text{т.к. } \Phi(\infty)=1.$$

Так что определим коэффициент C_1 из равенства

$$C_1=\sqrt{\frac{\alpha^*}{\pi}}\left[W_K-W_H+T_H-T_K+(W_H-W_K)(A-в)+I_\infty\right],$$
$$C_W^*=W_K-\frac{(\psi_K-\psi_H)\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}.$$

Откуда получим

$$W_K = \frac{1}{\sqrt{\pi} + A - в}\left[(A - в)W_H - (T_K - T_H)\right]. \tag{19}$$

Таким образом, для изменения влажности имеем

$$W(\eta) = R(\eta) + F(\eta) + C_1 \int_0^{\eta} exp\left(\frac{\eta^2}{4\alpha^*}\right) d\eta + W_K. \tag{20}$$

При $t \to 0$, $\eta \to \infty$ и $W(\infty) = W \,\big|_{t=0} = W_H < \infty$, поэтому $C_W^* = 0$.

$$R(\eta) = \int_0^{\eta} exp\left(-\frac{S^2}{4\alpha^*}\right)\left\{\int_0^{S} F(\xi)\left[\left(\frac{\xi}{2\alpha^*} + \frac{\xi^2}{4\alpha^{*2}}\right) exp\left(\frac{\xi^2}{4\alpha^*}\right)\right] d\xi\right\} d\eta, \tag{21}$$

учитывая равенство (9) определим изменение температуры $T(\eta) = \psi(\eta) - (A - в)W(\eta)$. Откуда, из равенств (12), (17)-(19), получим изменение температуры в земляном полотне дороги с учетом тепломассообмена в ее грунтовом теле:

$$T(\eta) = \left[T_H - T_K + (A - в)W_K\right]\sqrt{\frac{\pi}{2}} erf\left(\frac{\eta}{2}\right) - (A - в)\left[R(\eta) + F(\eta) + \right.$$

$$\left. + \sqrt{\frac{\pi\alpha^*}{2}} C_1 erf\left(\frac{\eta}{2\sqrt{\alpha^*}}\right)\right]\sqrt{\frac{\pi}{2}} - (A - в)W_K + T_K,$$

здесь $C_1 = \sqrt{\frac{\alpha^*}{\pi}\left[W_K - W_H + T_H - T_K + (W_H - W_K)(A - в) + I_{\infty}\right]}$.

Из условия $C_W^* = 0$ находим

$$W_K = \frac{T_K - T_H}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} + в - A\acute{r}} - \frac{A - в}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} + в - A} W_H.$$

По результатам расчета получена номограмма, в которой можно выбрать тип грунта в зависимости влагонакопления от естественной влажности грунта (рис. 1).

Таким образом, на автомобильных дорогах пучинообразования прямым образом зависят от содержания влаги в теле земляного полотна и грунтовом основании дорожной одежды, а также его морозоустойчивости. В связи с этим предлагаемый алгоритм устанавливает закономерные связи между температурой и естественной влажностью грунта, между влагой и морозоустойчивостью. В конечном счете – эти результаты также могут быть полезными при выборе конструкции основания дорожной одежды из укрепленных различными теплоустойчивыми и прочными материалами.

Рисунок 1 – Зависимость влагонакопления от естественной влажности грунта:
1 – супесь пылеватая; 2 – суглинок легкий; 3 – суглинок тяжелый; 4 - глина

Список литературы

1. Корсунский М.Б. Исследование водно-теплового режима земляного полотна и дорожных одежд на постоянных станциях / М.Б. Корсунский, П.Д. Россовский, В.Н. Гайворонский //Материалы V Всесоюзного науч.-техн. совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. - 1971. - № 3. - М.: МАДИ, 1971. - С. 17-26.
2. Сиденко В.М. Расчёт и регулирование водно-теплового режима дорожных одежд и земляного полотна. - М.: Автотрансиздат, 1962. - С. 116.
3. Попова З.А. Исследование грунтов для дорожного строительства. Лабораторные и практические работы. - М.: Транспорт, 1985. - 126 с.

Получено 03.12.2010

УДК 626.8:631

Р.Т. Байтелиев
АО «Мойнакская ГЭС», г. Алматы
С.К. Шилибеков
Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати, г. Тараз

ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОЙНАКСКОЙ ГЭС

Основные сооружения Мойнакской ГЭС расположены на юго-востоке Казахстана на территории Райымбекского района Алматинской области на западной петле р. Чарын (рис. 1).

Мойнакская ГЭС представляет собой гидроэнергетический комплекс с регулированием Бестюбинского водохранилища, предназначенный для обеспечения потребности в электроэнергии и ирригации. Гидроузел состоит из каменной плотины с глинистым водопроницаемым ядром, подводящей деривации и зданий ГЭС, а также водоотводящего сооружения. При отметке НПУ 1770 м, высота плотины составляет 94 м, отметка вершины плотины – 1776 м, общий объем водохранилища составляет 238 млн м^3. Применяется туннельная деривация на правом берегу, общая протяженность трассы туннеля составляет около 9,213 км, в том числе: длина деривационного туннеля – около 4,912 км, длина турбинного водовода – 4,301 км. Максимальный напор 473 м, установленная мощность 300 МВт.