

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБЪЕМНЫХ ГЕОРЕШЕТОК В КОНСТРУКЦИЯХ ЛЕСНЫХ ДОРОГ

Calculation of durability of a solid geolattice in a design of forest road is resulted. Two groups of factors on which service life of a geosynthetic material depends are allocated. As parameter for an estimation of durability of a solid geolattice activation energy thermal-oxidative degradation polymer is accepted. The exploitation factors influencing value of activation energy of polymer and durability of a solid geolattice are marked.

Введение. Использование геосинтетических материалов в качестве элемента усиления конструкций лесных дорог все шире внедряется в практику дорожного строительства. Поэтому наряду с прогнозированием сроков службы конструкции на основе свойств дорожно-строительных материалов большое значение имеет расчет долговечности геосинтетических материалов строительного назначения.

Долговечность полимерных материалов, и в частности объемной георешетки, определяется двумя основными группами факторов:

1) свойства исходного полимера – надлежащее качество сырья и правильный подбор материала с учетом требований к конструкции георешетки;

2) условия эксплуатации – тепло, кислород, вода, УФ-излучение, химические среды, механические нагрузки и др.

В качестве параметра, связанного с химическим строением, составом и структурой полимерного материала и одновременно со временем потери работоспособности георешетки под воздействием комплекса эксплуатационных факторов, теоретически и экспериментально обосновано использование эффективной энергии активации термоокислительной деструкции полимера E_d [1].

Энергия активации E_d – избыток энергии (потенциальный барьер), необходимый для разрушения химических связей, образующих основную цепь полимера.

1. Определение энергии активации. Определение долговечности осуществляется по методике, изложенной в СТБ 1333.0-2002 [2]. Этот стандарт распространяется на полимерные изделия для строительства и устанавливает метод определения их долговечности расчетным путем по экспериментально определенному значению энергии активации термоокислительной деструкции (далее – энергии активации) материала георешетки.

Метод определения долговечности основан на взаимосвязи между долговечностью полимерного материала георешетки и значением энергии активации, определяющей качество материала и уменьшающейся под воздействием эксплуатационных факторов.

Значение энергии активации определяют расчетным путем по потере массы навески материала георешетки от воздействия температуры при нагревании с заданной скоростью в определенном интервале температур на специальном приборе (дериватографе).

Дериватограф позволяет при изменении температуры с заданной скоростью одновременно регистрировать температуру вещества, его массу, скорость изменения массы и разность температур в веществе и инертном эталоне.

Навески испытуемого и эталонного материалов массой по 200 ± 1 мг помещают в керамические тигли (их предварительно прокаливают при температуре 600°C в течение 1 ч, а потом выдерживают при комнатной температуре в течение 2 ч) и затем взвешивают.

Далее тигли с испытуемым и эталонным материалами устанавливают в дериватограф и нагревают навеску до температуры 500°C . Одновременно производят запись специального графика (дериватограммы).

На полученной дериватограмме отмечают значение потери массы навески (Δm) в процентах с точностью до 0,1% с шагом 10°C в интервале температур $350\text{--}410^\circ\text{C}$ для полиэфира.

Вычисляют значение двойного логарифма $\ln[\ln(100/(100-\Delta m))]$ для каждой температуры и строят график прямолинейной зависимости $\ln[\ln(100/(100-\Delta m))]$ от обратной температуры T_d , применяя аппроксимацию по методу наименьших квадратов.

При этом на оси абсцисс откладывают величины $(10^3/T_d)$, где T_d – значения температуры, К, при испытании, а на оси ординат – величины $\ln[\ln(100/(100-\Delta m))]$.

Вычисляют с точностью до 0,1 тангенс угла наклона φ построенной прямой линии к оси ординат. Определяют значение энергии активации E_d , кДж/моль, по формуле

$$E_d = \text{tg}\varphi R, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \cdot 10^3$ кДж/(моль · К).

В ходе исследований была испытана объемная георешетка «Комета» из полиэфирного иглопробивного полотна, для которой график по определению E_d показан на рис. 1.

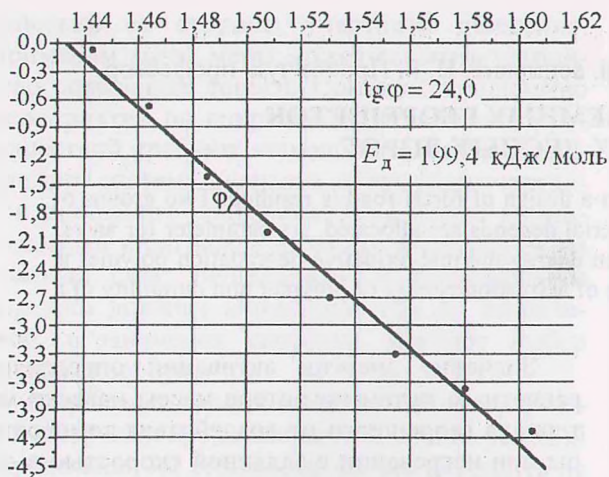


Рис. 1. Определение энергии активации E_d для георешетки «Комета» из полиэфира

Поскольку накопление во времени разрывов химических связей есть процесс старения полимера, параметр E_d связан с долговечностью георешетки экспоненциальной зависимостью:

$$\tau_{t_3} = \frac{1}{m} 10^{\alpha E_d + \beta} \cdot e^{E_d / (R t_3)}, \quad (2)$$

где τ_{t_3} – расчетная долговечность георешетки в годах при конкретном значении температуры эксплуатации (температуры грунта) t_3 , К; m – коэффициент перевода долговечности в годы, $m = 365$; α и β – коэффициенты, постоянные для данного класса полимеров, для полиэфира $\alpha = -0,1661$, $\beta = 2,590$ [3].

С учетом эксплуатационных факторов

$$\tau_{t_3} = \frac{1}{m} 10^{-\alpha(E_d - E_{mb} - E_{pH} - \gamma \sigma_{ст}) + \beta} \times e^{(E_d - E_{mb} - E_{pH} - \gamma \sigma_{ст}) / (R t_3)}, \quad (3)$$

где E_{mb} – снижение энергии межмолекулярных взаимодействий на границе «георешетка – грунт» за счет эффекта Ребиндера, кДж/моль; E_{pH} – снижение энергии активации за счет кислотности грунта, кДж/моль; γ – структурно-чувствительный коэффициент, для шва, как самого слабого элемента георешетки, равный 53,75 кДж/(моль · МПа) [4]; $\sigma_{ст}$ – напряжение в стенке ячейки георешетки, вызываемое механическими нагрузками, МПа.

Произведение $\gamma \cdot \sigma_{ст}$ представляет собой долю энергии, на которую механические напряжения, возникающие в материале, понижают потенциальный барьер разрыва химических связей полимера E_d .

Расчетная долговечность георешетки в годах $\tau_{общ}$ при переменных значениях температуры эксплуатации t_3 определяется по формуле

$$\tau_{общ} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i}{m_{i, сум}} \cdot \frac{1}{\tau_{t_3}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где m_i – число часов воздействия грунта со среднемесячной температурой t_3 ; $m_{i, сум}$ – общее число часов воздействия грунта с переменными значениями t_3 .

2. Пример расчета. Строительство лесной дороги с использованием георешетки «Комета» высотой 0,1 м (рис. 2) на территории Трилесинского лесничества Сморгонского опытного лесхоза было завершено в ноябре 2005 года. Дорожная конструкция состоит из земляного полотна высотой в среднем 0,5 м и армированной георешеткой дорожной одежды из песчано-гравийной смеси толщиной 0,18 м.

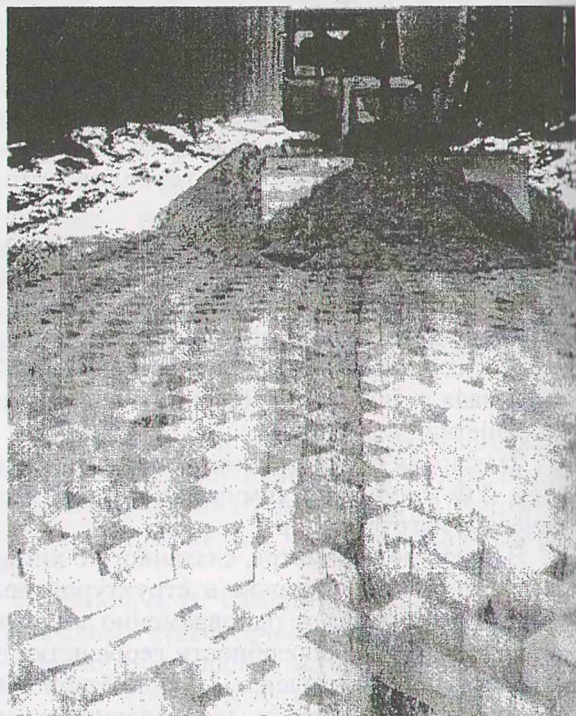


Рис. 2. Строительство лесной дороги с использованием георешетки «Комета»

При определении долговечности георешетки необходимо учесть эксплуатационные факторы, снижающие энергию активации материала георешетки и, тем самым, ее долговечность. К таким факторам относятся:

I. *Воздействие жидкой фазы грунта* выражается в эффекте адсорбционного понижения прочности полимера (эффекте Ребиндера), который означает облегчение деформации и разрушения твердого тела в результате протекания на его свободной поверхности обратимых физико-химических процессов, приводящих к понижению поверхностной энергии тела. Показатель E_{mb} составляет 59 кДж/моль [4].

II. *Кислотность грунтового массива.* Преобладающие почвы в районе строительства дерново-подзолистые и дерново-подзолистые заболоченные, для таких почв показатель кислотности составляет по всему профилю рН = 3,6–5,5 [5], а параметр E_{pH} равен 8 кДж/моль [4].

III. Механические нагрузки:

а) статические нагрузки от собственного веса грунта определяются по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma_0 z, \\ \sigma_x &= \sigma_y = \xi_0 \sigma_z,\end{aligned}\quad (5)$$

где γ_0 – объемная масса грунта, равная для песчано-гравийной смеси $2,0 \text{ г/см}^3$; z – глубина заложения георешетки (по ее верхнему краю), $z = 0,08 \text{ м}$; $\xi_0 = \mu_0 / (1 - \mu_0)$ – коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя; μ_0 – коэффициент относительной поперечной деформации, аналогичный коэффициенту Пуассона, $\mu_0 = 0,3$ [6];

б) дорожная конструкция воспринимает нагрузки от движущихся транспортных средств через упругие шины в очень короткое время – $0,1 \text{ с}$. В расчетах примем, что нагрузка действует постоянно и величина ее определяется по следующим зависимостям [7]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -q \left[1 - \frac{\eta^3}{\sqrt{(1+\eta^2)^3}} \right], \\ \sigma_y = \sigma_x &= -q \left[(1+\mu) \left(1 - \frac{\eta}{\sqrt{1+\eta^2}} \right) + \frac{\sigma_z}{2q} \right],\end{aligned}\quad (6)$$

где q – расчетное давление, МПа; $\eta = z/a$, a – радиус круга, эквивалентного по площади отпечатку колеса, м. При вычислениях принята нагрузка с параметрами $q = 0,6 \text{ МПа}$ и $a = 0,185 \text{ м}$ расчетного автомобиля группы А.

Расчетами установлено, что величина суммарного воздействия статических и динамических нагрузок составляет $\sigma_z = 0,565 \text{ МПа}$ по оси Z и $\sigma_y = 0,190 \text{ МПа}$ по оси Y . Расчетное значение механических нагрузок $\sigma_{ст}$ принимается равным сумме σ_z и σ_y , т. е. $0,755 \text{ МПа}$.

Тогда произведение $\gamma \cdot \sigma_{ст}$ будет составлять $53,75 \cdot 0,755 = 40,6 \text{ кДж/моль}$.

В результате получим, что итоговое значение энергии активации E_d с учетом $E_{мв}$, $E_{рн}$ и $\gamma \cdot \sigma_{ст}$ составит $91,8 \text{ кДж/моль}$.

IV. Температура грунта дорожной одежды определяется по формуле [8]

$$t_3 = t_{air} + (t_{soi} - t_{air}) \frac{R_{sur} + \sum_{i=1}^n (R_{sur})_i}{R_{tot}}, \quad (7)$$

где t_{air} – температура воздуха, °С; t_{soi} – температура грунта на нижней границе системы «одежда – полотно», °С. Принимаем значения t_{soi} на глубине $0,8 \text{ м}$ (поскольку общая высота дорожной конструкции составляет $0,7 \text{ м}$) и t_{air} по каждому месяцу [9]; R_{sur} – сопротивление теплопереходу покрытия, $\text{м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$, принимаемое в расчетах в зависимости от скорости ветра, м/с.

Значения скорости ветра по месяцам колеблются в пределах $2,6\text{--}3,7 \text{ м/с}$ [10], а значения R_{sur} соответственно от $0,0765$ до $0,084 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$; R_{tot} – общее тепловое сопротивление дорожной конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$.

$$R_{tot} = R_{sur} + R_{sc} + R_{rb}, \quad (8)$$

где R_{sc} – тепловое сопротивление одежды,

$$R_{sc} = \sum_{i=1}^n h_i / \lambda_i, \quad (9)$$

где h_i – толщина слоев одежды с коэффициентом теплопроводности λ_i , $h_i = 0,18 \text{ м}$. Для песчано-гравийной смеси $\lambda_i = 2,61 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$ [11]. Тогда $R_{sc} = 0,069 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$; R_{rb} – тепловое сопротивление земляного полотна,

$$R_{rb} = h_{si} / \lambda_{si}, \quad (10)$$

где h_{si} – толщина слоя грунта с коэффициентом теплопроводности λ_{si} , на нижней границе которого принята температура t_{soi} . Поскольку промерзание грунта в лесу составляет $15\text{--}20 \text{ см}$, то значение $\lambda_{si} = 2,32 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$ примем для талого грунта. Тогда $R_{rb} = 0,216 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$;

$\sum_{i=1}^n (R_{sur})_i$ – суммарное тепловое сопротивление слоев дорожной конструкции, расположенных выше плоскости, в которой определяется температура грунта. На расстоянии $0,08 \text{ м}$ от верха покрытия и до начала георешетки его величина составляет $0,031 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$.

Значения R_{tot} в зависимости от месяца колеблются в интервале $0,3615\text{--}0,369 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$.

Сведем данные по расчету t_3 в табл. 1.

Таблица 1
Значения t_{air} , t_{soi} и t_3 по месяцам, °С

Месяц	1	2	3	4	5	6
t_{air}	-6,8	-6,3	-2,4	3,9	11,0	15,6
t_{soi}	1,7	0,4	0,5	3,8	9,7	15,3
t_3	-4,3	-4,3	-1,5	3,9	10,6	15,5

Окончание табл. 1

Месяц	7	8	9	10	11	12
t_{air}	18,1	16,3	11,4	5,8	0,2	-4,6
t_{soi}	18,1	17,3	14,6	10,1	5,0	2,4
t_3	18,1	16,6	12,5	7,1	1,6	-2,5

Расчет долговечности георешетки «Комета» при конкретных значениях t_3 для наглядности покажем в виде табл. 2.

Общая долговечность георешетки в конструкции лесной дороги, рассчитанная по формуле (4) на основе данных табл. 2, составит $\tau_{общ} \approx 54 \text{ года}$.

Расчет долговечности (лет) объемной георешетки «Комета»

Показатель	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E_d	91,8 кДж/моль											
$10^{\alpha E_d + \beta}$	$10^{-0,1661E_d + 2,590} = 2,41 \cdot 10^{-37}$ ч											
m_i , ч	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
$m_{i \text{ сум}}$, ч	8760											
t_3 , °C	-4,3	-4,3	-1,5	3,9	10,6	15,5	18,1	16,6	12,5	7,1	1,6	-2,5
t_3 , °K	268,7	268,7	271,5	276,9	283,6	288,5	291,1	289,6	285,5	280,1	274,6	270,5
τ_3 , лет	431		282	128	50	26	18	22	38	81	178	328

Заключение. Большая долговечность объемной георешетки «Комета» из полиэфира обусловлена:

1) химической природой полимера, высокой устойчивостью его химических связей к внешним воздействиям;

2) отсутствием УФ-излучения – самого опасного разрушающего фактора;

3) низкими температурами эксплуатации, а значительный период времени вообще отрицательными, когда полимер находится в «законсервированном» состоянии;

4) относительно небольшими механическими нагрузками.

Описанный выше способ позволяет определить долговечность в дорожной конструкции не только объемной георешетки, но и любого другого класса геосинтетических материалов, применяемых при строительстве лесных дорог.

При этом методика расчета дает возможность комплексно учесть все основные эксплуатационные факторы, воздействию которых подвергается полимерный материал.

Литература

1. Прокопчук, Н. Р. Строим на века? / Н. Р. Прокопчук // Пластикс: индустрия переработки пластмасс. – 2003. – № 1. – С. 31–40.

2. Изделия полимерные для строительства. Методы определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0-2002. – Введ. 01.01.03. – Минск: М-во архитектуры и строительства РБ, 2002. – 8 с.

3. Прокопчук, Н. Р. Остаточный ресурс использованной ПЭТ-упаковки как основа определения рациональных направлений ее повторной переработки / Н. Р. Прокопчук // Технологии переработки и упаковки. – 2006. – № 4. – С. 33–35.

4. Прокопчук, Н. Р. Термокинетический принцип прогнозирования механических свойств полимерных пленок и волокон: дис. ... д-ра хим. наук: 01.04.19 / Н. Р. Прокопчук. – Киев, 1989. – 339 л.

5. Почвоведение с основами геологии: учеб. пособие / А. И. Горбылева [и др.]; под ред. А. И. Горбылевой. – Минск: Новое знание, 2002. – 480 с.

6. Вырко, Н. П. Дорожное грунтоведение с основами механики грунтов / Н. П. Вырко, И. И. Леонович. – Минск: Вышэйшая школа, 1977. – 224 с.

7. Лыщик, П. А. Исследование напряженного состояния в грунтовой дороге под воздействием колес лесовозного автопоезда / П. А. Лыщик, С. С. Макаревич, С. В. Красковский // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. – 2006. – Вып. XIV. – С. 56–58.

8. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения: учеб. пособие для вузов / И. И. Леонович [и др.]; под общ. ред. И. И. Леоновича. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 348 с.

9. Вырко, Н. П. Исследование водно-теплового режима земляного полотна и учет его при проектировании автомобильных лесовозных дорог Белоруссии: дис. ... канд. техн. наук: 05.420 / Н. П. Вырко. – Минск, 1970. – 187 л.

10. Леонович, И. И. Дорожная климатология: учебное пособие для студентов спец. 29.10 – «Строительство автомобильных дорог и аэродромов» / И. И. Леонович. – Минск: БГПА, 1994. – 190 с.

11. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под ред. профессоров И. А. Золотаря, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. – М.: Транспорт, 1971. – 416 с.