

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УТЕПЛИТЕЛЯ (НА ПРИМЕРЕ ЭКСТРУЗИОННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПЕНОПЛЭКС®) В ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ

В.П. Ярцев, Д.В. Иванов

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; kzis@nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** водно-тепловой режим; долговечность; дорожная одежда; кинетическая теория разрушения и деформации; пенополистирол ПЕНОПЛЭКС®; работоспособность; физические и эмпирические термофлуктуационные константы.

**Аннотация:** Определены параметры водно-теплого режима дорожного земляного полотна и напряжения в теплоизолирующем слое; предложена методика прогнозирования работоспособности теплоизолирующего слоя из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС® 45.

---

В настоящее время половина общего объема перевозок по дорогам федерального значения осуществляется в условиях превышения нормативного уровня загрузки дорожной сети, поэтому многие дороги страны по технико-экономическим показателям не удовлетворяют требованиям современного движения.

Помимо силовых воздействий от проезжающих транспортных средств, на состояние земляного полотна и дорожной одежды оказывают влияние температура воздуха, атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды, что в совокупности создает определенный водно-тепловой режим. Поэтому нерационально подобранная конструкция дорожной одежды и неправильно выбранный способ регулирования водно-теплого режима вызывают снижение прочности, разуплотнение грунта, образование пучин зимой и просадок весной, трещинообразование покрытий.

Одним из актуальных решений указанной проблемы является переход к нетрадиционным (специальным) методам регулирования водно-теплого режима земляного полотна путем введения теплоизолирующего слоя из экструзионного пенополистирола [1]. Однако такие меры требуют от российского транспорта пересмотра не только нормативных документов на проектирование и строительство дорог, но и обоснованного подхода в применении инновационных материалов. В частности, несмотря на успешный опыт применения пенополистирола в дорожных конструкциях [2, 3], отсутствуют достоверные данные о поведении физико-механических характеристик материала в процессе эксплуатации, нет четкой методики прогнозирования долговечности (работоспособности) материала в таких конструкциях в действующем эксплуатационном диапазоне температурных и силовых воздействий.

Количество влаги  $W$ , находящееся в земляном полотне, не остается в течение года постоянным и изменяется за определенный промежуток времени согласно уравнению водного баланса

$$W = (A + B + P) - (D + E + F), \quad (1)$$

где  $A$  – осадки, выпадающие на земляное полотно;  $B$  – просачивание воды, притекающей с прилегающей к дороге местности;  $C$  – приток воды от уровня грунтовых вод по капиллярам, а также в результате пленочного и парообразного перемещения влаги;  $D$  – сток воды с земляного полотна;  $E$  – испарение влаги с поверхности грунта;  $F$  – просачивание воды из земляного полотна в глубинные слои грунта.

Для защиты земляного полотна автомобильных дорог от переувлажнения прибегают к использованию экструзионного пенополистирола в качестве теплоизолирующего (морозозащитного) слоя.

Для разработки методики прогнозирования работоспособности утеплителя в конструкциях дорожных одежд предлагается использовать кинетическую концепцию разрушения и деформирования твердых тел [4].

Согласно этой концепции работоспособность материалов определяется комплексом из трех взаимно связанных параметров – долговечности, эксплуатационной нагрузки и температуры [5]. Эти параметры при разрушении и деформировании определяются рядом физических или эмпирических констант, входящих в обобщенное уравнение долговечности (2):

$$t = t_m \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (2)$$

где  $t$  – прочностная ( $t = \tau$ ) или деформационная ( $t = \theta$ ) долговечность, с;  $t_m$  – минимальная долговечность (период колебания кинетических единиц: атомов при разрушении ( $t_m = \tau_m$ ); сегментов и звеньев цепи – при деформировании, ( $t_m = \theta_m$ )), с;  $U_0$  – максимальная энергия активации разрушения (размягчения), кДж/моль;  $\gamma$  – структурно-механическая константа, кДж/(моль·МПа);  $T_m$  – предельная температура разложения (размягчения) материала, К;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·МПа);  $T$  – температура, К.

Уравнение (2) описывает зависимости логарифма долговечности материалов от напряжения и температуры, имеющие линейный характер и сходящиеся в точку (полус) в координатах « $\lg t - \sigma$ » (« $\lg t - 1/T$ ») при малых значениях долговечности («прямой» пучок). Встречаются также случаи изменения зависимостей («обратный» пучок, параллельные прямые). Для обратной зависимости справедливо уравнение (3) [6]

$$t = t_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left( \frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $t_m^* = (\tau_m^* \text{ или } \theta_m^*)$ ;  $U_0^*$ ,  $\gamma^*$ ,  $T_m^*$  – эмпирические константы.

При трансформации зависимостей к параллельным прямым используется уравнение

$$\tau = \tau^* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta \sigma), \quad (4)$$

где  $\beta$  – структурно-механический коэффициент.

В соответствии с принципом температурно-временной силовой эквивалентности из уравнений (2) – (4) могут быть выражены силовой ( $\sigma = f(t, T)$ ) и температурный ( $T = f(t, \sigma)$ ) параметры работоспособности материала. Таким образом, открывается возможность прогнозировать работоспособность утеплителя в конструкциях дорожных одежд в широких пределах.

Для определения температуры в любой точке  $x$  по глубине конструкции дорожной одежды предложена формула [7]

$$T_{(x,0)} = T_{в.ср} + (T_{г} - T_{в.ср})(R_{п} + \Sigma R_x)/R_c, \quad (5)$$

где  $T_{в.ср}$  – средняя температура воздуха за период  $\Delta t$ , °С;  $T_{г}$  – температура грунта, °С;  $R_{п}$  – тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом, м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\Sigma R_x$  – тепловое сопротивление слоев, расположенных выше глубины  $x$ , м<sup>2</sup>·К/Вт;  $R_c$  – суммарное тепловое сопротивление всех слоев дорожной конструкции и земляного полотна до глубины  $H$ , м<sup>2</sup>·К/Вт.

Для расчета по формуле (3) необходимо знать температуру грунтов открытого поля  $T_{г}$ , расположенного в непосредственной близости от рассматриваемого участка. В связи с этим для выявления закономерностей распределения температуры по глубине грунтового массива проведено натурное наблюдение в период с 20 октября по 20 апреля 2011 г. С учетом полученных данных о распределении температуры воздуха проведено математическое моделирование температурного поля земляного полотна и дорожной одежды в программном комплексе POMSOL Multiphysics 3.3.

В общем случае, температура верхней ограничивающей поверхности зависит от температуры воздуха, радиационного баланса рассматриваемой поверхности, конвективного теплообмена, наличия снегового или растительного покрова и определяется выражением

$$t_{г.п} = t_{в} + \frac{B - LE}{\alpha} + 0,07 A_M \sqrt{R_{сн}}, \quad (6)$$

где  $t_{г.п}$  – температура грунта и поверхности, К;  $t_{в}$  – температура воздуха, К;  $B$  – радиационный баланс, ккал/(м<sup>2</sup>·мес.);  $LE$  – затраты тепла на испарение, ккал/(м<sup>2</sup>·мес.);  $A_M$  – годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, град.;  $R_{сн}$  – термическое сопротивление снега, м<sup>2</sup>·с·град/ккал;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, ккал/(м<sup>2</sup>·с·град).

Формула (6) выбрана в качестве верхнего граничного условия при моделирование процессов теплопереноса. Для уточнения данной формулы отдельно рассмотрены все составляющие, оценено влияние наличия напочвенного слоя на амплитуду температурных колебаний.

Нижняя расчетная граница была выбрана на глубине 3,2 м от поверхности почвы. Изменение температуры описывается уравнением

$$T_{н.г} = T_0 + \Delta T \sin(\pi M/12), \quad (7)$$

где  $T_0$  – среднегодовая температура, °С;  $\Delta T$  – амплитуда колебаний температуры, °С;  $M$  – масса максимально осушенного грунта, кг.

Учитывая сложность поставленной задачи, за начало отсчета выбран момент максимального осушения земляного полотна (1 июня), а максимальное и минимальное значения температуры будут наблюдаться соответственно в середине июля и января.

Для определения начального распределения температуры по слоям дорожной одежды и земляного полотна  $T_{(x,0)}$  используем формулу (5). Тогда для определения температуры грунтов открытого поля  $T_{г}$  воспользуемся формулой

$$T_{г} = A_M \exp\left[-x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}\right] \cos\left(x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}} - \frac{2\pi\tau}{\tau}\right) + t_{ср}, \quad (8)$$

где  $x$  – расстояние от поверхности грунта до рассматриваемой точки ( $H'$ ), см;  $\tau$  – рассматриваемый период, с;  $t_{ср}$  – среднегодовая температура поверхности почвы, °С.

Результаты математического моделирования показывают: промерзания в конструкциях с использованием теплоизолирующих слоев нет, температура под поверхностью пенополистирольных плит в зимний период колеблется около 0 °С. В то же время в аналогичных конструкциях, но с традиционным теплоизолирующим слоем из песка, температура упала до – 5... –10 °С. Изменилось направление тепловых потоков: вместо температурно-влажностных градиентов, направленных перпендикулярно поверхности покрытия, наблюдается изменение направления в сторону менее теплоизолированных обочин и откосов. Таким образом, применение экструзионного пенополистирола позволяет предотвратить промерзание земляного полотна в активной зоне и, снизив температурно-влажностные градиенты, создать наиболее оптимальный водно-тепловой режим.

На основании проведенных теоретических исследований и анализа литературных источников предложена комбинированная методика определения распределения температуры по слоям дорожной одежды.

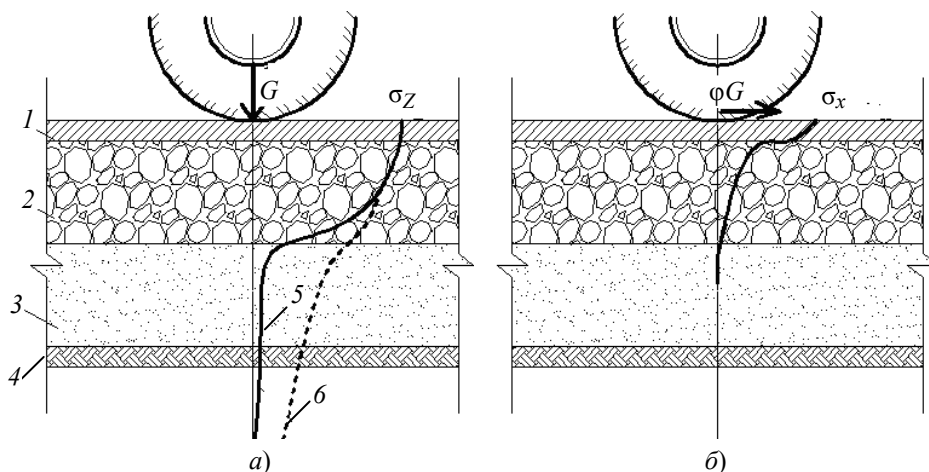
Поскольку слои дорожной одежды имеют различные свойства, которые по-разному изменяются при изменении влажности, температуры и величины нагрузки, то оценка напряженно-деформированного состояния дорожной одежды и земляного полотна в целом представляет собой большие трудности, неразрешенные дорожной наукой в должной степени до сих пор. Поэтому проведен анализ существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния дорожной одежды и земляного полотна [8, 9].

В работе [10] установлено, что под действием транспортных нагрузок в слоях дорожной одежды возникают напряжения, постепенно затухающие с глубиной (рис. 1). Для определения напряжений под нагрузкой, равномерно распределенной на круглой площадке, по вертикальной оси известно решение Ж. Буссине для изотропного массива

$$\sum \sigma_z = P \left[ 1 - \left( \frac{1}{1 + (r/Z)^2} \right)^{3/2} \right], \quad (9)$$

где  $r$  – радиус штампа, см;  $P$  – вертикальная нагрузка, кг.

Однако область применения формулы Буссине для многослойных дорожных одежд ограничена структурными особенностями интегральных формул. С учетом



**Рис. 1. Распределение напряжений в многослойной дорожной одежде:**

$a, б$  – эпюры вертикальных  $\sigma_z$  и горизонтальных  $\sigma_x$  напряжений соответственно;  
 1 – покрытие; 2 – основание; 3 – дополнительный слой основания; 4 – подстилающий грунт; 5 – напряжения в дорожной одежде; 6 – напряжения в однородном грунте

этого, М.Я. Якуниным в 30-х годах прошлого века для описания распределения напряжений в однородной среде предложена эмпирическая формула вида

$$\sigma_Z = \frac{P}{1 + a \left( \frac{Z}{D} \right)^2}, \quad (10)$$

где  $a$  – эмпирический коэффициент, связанный с закономерностью распределения напряжений;  $Z$  – глубина вдавливаемого грунта, см.

Дальнейшие исследования показали: в многослойной среде, когда жесткости соседних слоев различаются в значительной мере, распределение напряжений не подчиняется законам однородной среды. Поэтому Г.И. Покровский предложил вместо более жесткого верхнего слоя ввести слой большей толщины, дающий то же распределение напряжений в нижнем слое, но не отличающийся от него по своей жесткости (рис. 2).

В настоящее время в качестве расчетной модели дорожной одежды с покрытием капитального типа принято слоистое линейно-деформируемое упругое полупространство, на поверхность которого действует вертикальная нагрузка, распределенная равномерно по площади круга. В результате решения смешанной задачи теории упругости и механики зернистых сред при  $\sigma \rightarrow 0$ , когда на поверхности действует равномерно распределенная по площади круга диаметром  $D$  нагрузка  $P$ , В.М. Маркуцом была получена формула [9]

$$\sigma_Z/P = \operatorname{sech}^2(Z/D). \quad (11)$$

Структура полученной формулы отражает гиперболический закон распределения нормальных вертикальных напряжений по глубине в однородном изотропном массиве. Расчеты по формуле (11) наиболее адекватно описывают данные натурных испытаний типовых конструкций дорожных одежд.

Отличительной особенностью цементобетонных покрытий является то, что под воздействием нагрузки бетонная плита, образуя чашу прогиба (рис. 3), распределяет давление покрытия на большую площадь основания [11]. Поскольку  $P = \sigma \pi D^2/4$ , то  $D = 1,4H\sqrt{E_B/E_{\text{общ}}}$ , где  $E_B$  – модуль сдвига грунта на определенной толщине;  $E_{\text{общ}}$  – усредненный модуль сдвига. Далее расчет можно производить, используя вышеприведенные формулы.

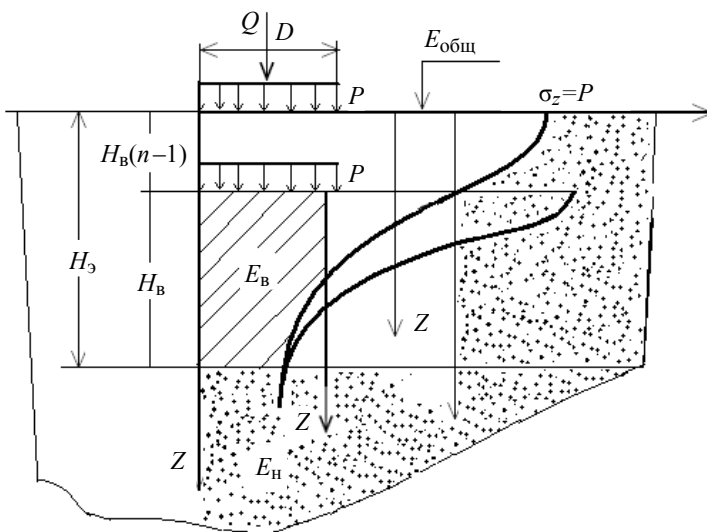
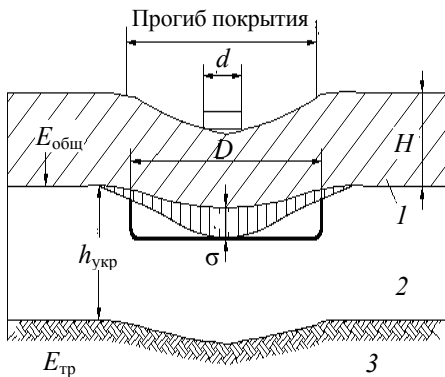
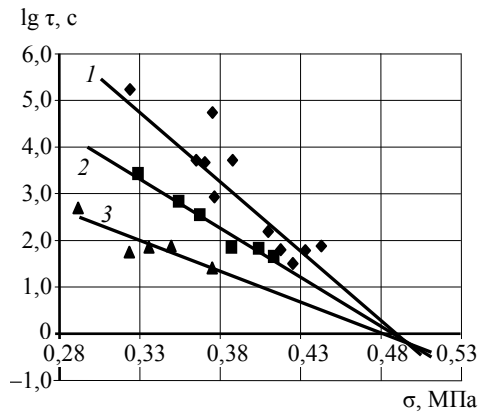


Рис. 2. Схема к определению понятия об эквивалентном модуле упругости многослойной системы



**Рис. 3. Схема к определению напряженно-деформированного состояния в жестких дорожных одеждах:**  
 1 – бетонное покрытие; 2 – укрепленное основание; 3 – грунт земляного полотна



**Рис. 4. Зависимость логарифма долговечности  $\tau$  от напряжения  $\sigma$  при сжатии ПЕНОПЛЭКС® до величины относительной деформации 5% при температуре, °С:**  
 1 – 16; 2 – 35; 3 – 50

В процессе эксплуатации в конструкциях автомобильных дорог пенополистирольные плиты подвергаются постоянному деформированию как со стороны проезжающих транспортных средств, так и от веса вышележащих слоев одежды. При деформировании сжатием в координатах « $\lg(\tau) - \sigma$ » наблюдается семейство веерообразных прямых сходящихся в точку, описываемое уравнением (2) (рис. 4). По-видимому, такой вид экспериментальной зависимости связан с характером разрушения межмолекулярных связей при деформировании. Наблюдается комбинация механизмов деформирования: вначале происходит деформирование тяжелой на высоту одной или нескольких ячеек, что приводит к переориентации структуры. При достижении материалом 10%-й относительной деформации происходит уменьшение  $U_0$ , что косвенно подтверждается резким повышением величины  $\gamma$ , отражающей неравномерность силового поля по сечению нагружаемого элемента (таблица). В результате происходит смятие поперечного слоя сразу на высоту не одной, а нескольких десятков ячеек, наблюдается обвальное нарастание деформаций. Этот слой расширяется за счет смятия прилегающего слоя и становится видимым невооруженным глазом. Это определяет кооперативность перемещения сегментов и подтверждается значительным ростом  $U_0$  при деформации 20% и снижением  $\gamma$  за счет уплотнения структуры материала (см. таблицу).

Для прогнозирования деформационных характеристик экструзионных пенополистирольных плит ПЕНОПЛЭКС® построены зависимости скорости деформирования от обратной температуры. В результате получены семейства веерообраз-

#### Физические константы при различных величинах деформирования

Величина относительной деформации, %	Константы			
	$\tau_m, c$	$T_m, K$	$U_0, кДж/моль$	$\gamma, кДж/(моль \cdot МПа)$
5	$10^{-0,2}$	356,51	399	780
10	$10^{-0,85}$	371,74	325	1600
20	$10^{-0,07}$	336,70	438	840

ных прямых сходящихся в точку. Данные зависимости имеют вид «обратного» пучка и описываются уравнением вида Аррениуса

$$V = V_m \exp \left[ \frac{U_{0\text{ТВ}} - \gamma_{\text{ТВ}} H_{\text{ТВ}}}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_{\text{мТВ}}} \right) \right], \quad (12)$$

где  $V_{\text{мТВ}}$  – начальная кажущаяся скорость внедрения индентора в поверхность материала;  $U_{0\text{ТВ}}$  – начальная энергия активации;  $\gamma_{\text{ТВ}}$  – структурно-механический фактор;  $T_{\text{мТВ}}$  – предельная температура существования материала;  $H_{\text{ТВ}}$  – твердость материала, которая определяется по формуле  $H_{\text{ТВ}} = N/(\pi Dh)$ , в которой  $N$  – сила, приложенная к шарiku (индентору);  $D$  – диаметр индентора;  $h$  – глубина внедрения индентора в поверхность материала.

Значения констант при деформировании пенополистирольных плит ПЕНОПЛЭКС®:  $\lg v_{\text{мТВ}} = 10^{-2,63}$  мм/с;  $T_{\text{мТВ}} = 346$  К;  $U_{0\text{ТВ}} = -65,47$  кДж/моль;  $\gamma_{\text{ТВ}} = 10,09$  кДж/(моль·МПа). Полученные значения эмпирических констант позволяют прогнозировать скорость деформирования пенополистирола во времени.

Эксплуатационную способность материала во многом определяет величина остаточной (необратимой) деформации. Учитывая, что явление ползучести особенно характерно для термопластов из-за их высокой чувствительности к температуре и нагрузке, проведены соответствующие испытания. Полученные зависимости представляют собой петли гистерезиса. Анализ экспериментальных данных показывает, что величина упругой (обратимой) деформации для экструзионного пенополистирола не зависит от полной и составляет порядка 1,2 %. Перестраивая экспериментальные данные, приведенные на рис. 5, в координаты « $\sigma$ – $\varepsilon$ », находим для деформации 2 % предельное значение напряжения – 0,13 МПа.

Экспериментально установлено: для исследуемого материала при деформации выше 10 % наступает «закритическая область», после которой материал в конструкции уже не работает. Поэтому необходимо ограничить величину упругой деформации величиной 2 %, а расчеты на прочность производить при линейной относительной деформации до 5 %.

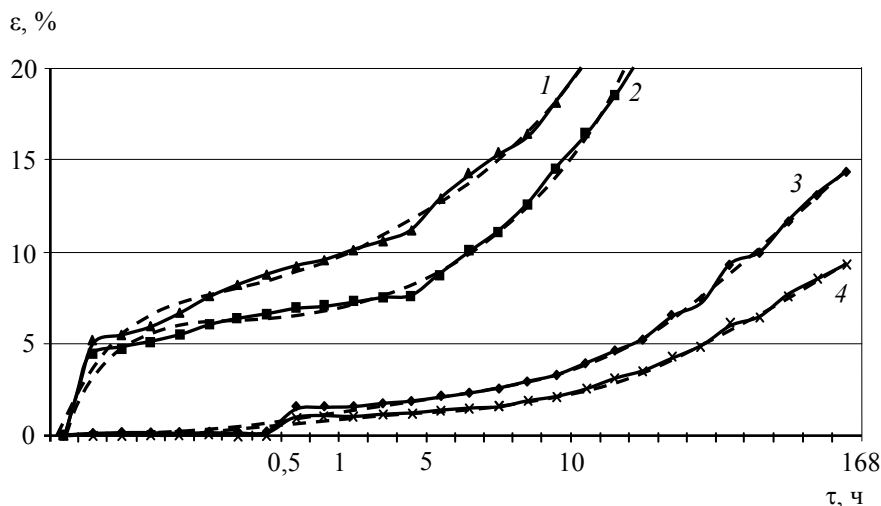


Рис. 5. Деформация ползучести экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС® ( $T = 303$  К) при различном давлении, МПа:  
1 – 0,36; 2 – 0,28; 3 – 0,19; 4 – 0,12

В дорожных конструкциях пенополистирольные плиты при определенных условиях могут также подвергаться разрушению изгибом. Проведены соответствующие экспериментальные исследования. Из рисунка 6 видно, что полученные линейные зависимости образуют семейства параллельных прямых и описываются уравнением (4).

Константы ПЕНОПЛЭКС® при изгибе:  $\tau^* = 10^{-5,3}$  с;  $U = 90,16$  кДж/моль;  $\beta = 16$  МПа<sup>-1</sup>. Эти константы показывают, что величина  $U$  соответствует энергии активации разрыва химических связей полистирола и равна энергии его деструкции, а  $\beta$  – структурно-механический фактор, аналогичный  $\gamma$  в уравнении (2).

Оценивая сложноподвиженное состояние, которому подвержены пенополистирольные плиты в конструкции дорожных одежд, необходимо учитывать также цикличность действия нагрузок.

Усталостная прочность материала определяется накоплением повреждений. В работах Б.И. Паншина получено аналитическое выражение для расчета циклической долговечности  $t_{ц}$  [12]

$$t_{ц} = \frac{\alpha \left(1 - \frac{1}{r}\right) \sigma_{\max} \tau}{1 - \exp\left(1 - \frac{1}{r}\right) \sigma_{\max}}, \quad (13)$$

где  $r$  – коэффициент асимметрии цикла,  $r = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ ;  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  – верхний и нижний пределы напряжений в цикле соответственно;  $\tau$  – долговечность при постоянном напряжении,  $\tau = A \exp(-\alpha \sigma_{\max})$ .

Таким образом, открывается путь к прогнозированию долговечности пенополистирола в реальных условиях эксплуатации. Для этого достаточно выявить константы, описывающие поведение материала при статическом растяжении с изгибом:  $\tau_m = 10^{-5,15}$  с;  $T_m = 625$  К;  $U_0 = 258$  кДж/моль;  $\gamma = 1661$  кДж/(моль·МПа).

### Основные выводы

1. Рассмотрен водно-тепловой режим земляного полотна и дорожной одежды, подробно описаны современные представления о механизмах тепло- и влагопереноса и процессах пучинообразования, приводящих к разрушению дорожной одежды. Рассмотрены методы и способы создания оптимального водно-теплового режима земляного полотна и дорожной одежды. На основании анализа литературных источников установлено, что устройство морозозащитных (теплоизолирующих) слоев – наиболее эффективный метод создания оптимального водно-теплового режима.

2. Изучено изменение температурного поля земляного полотна и дорожной одежды в годовом цикле. На основании результатов математического моделирования температурного поля земляного полотна и дорожной одежды определен температурный диапазон эксплуатации пенополистирольных плит. По результа-

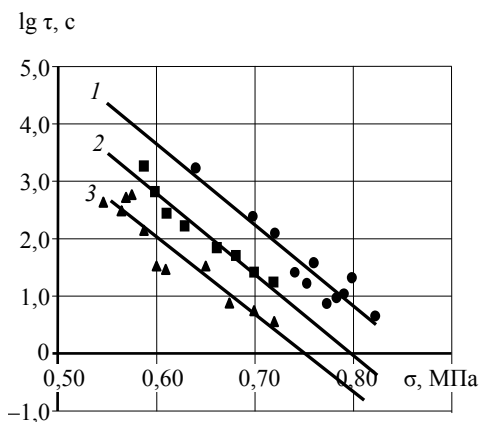


Рис. 6. Зависимость логарифма долговечности  $\tau$  от напряжения  $\sigma$  при изгибе ПЕНОПЛЭКС® при температуре, °C:  
1 – 21; 2 – 35; 3 – 50



там математического моделирования теоретически доказана целесообразность применения экструзионного пенополистирола для создания оптимального водно-теплового режима.

3. Представлены и обобщены экспериментальные закономерности изменения основных расчетных теплофизических характеристик (теплопроводности и теплоемкости) материалов полотна и дорожной одежды, полученные разными авторами. Предложена методика для определения распределения температуры по слоям дорожной одежды.

4. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние земляного полотна и дорожной одежды, на основе которого определен силовой диапазон эксплуатации пенополистирольных плит. Выбран предположительный химический состав возможных агрессивных сред, возникающих в процессе эксплуатации автомобильных дорог.

5. С позиции термофлуктуационной концепции исследованы закономерности статического разрушения и деформирования экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС® в диапазоне напряжений и температур, максимально приближенных к эксплуатационным. Определены термофлуктуационные константы при деформировании и разрушении. Получены формулы, позволяющие прогнозировать циклическую долговечность пенополистирольных плит в конструкциях дорожных одежд на основании комбинированных статических испытаний (растяжение с изгибом).

#### *Список литературы*

1. Рувинский, В.И. Пособие по устройству теплоизолирующих слоев из пенопласта Styrofoam на автомобильных дорогах России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 2000. – 71 с.
2. Романенков, И.Г. Физико-механические свойства пенных пластмасс / И.Г. Романенков. – М. : Госстандарт, 1970. – 170 с.
3. Рувинский, В.И. Эффективность применения пенопласта в дорожном строительстве России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 1996 – 72 с.
4. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.
5. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М. : Химия, 1992. – 320 с.
6. Ярцев, В.П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 ; защищена 25.12.98 ; утв. 10.03.00 / В.П. Ярцев. – Воронеж, 1998. – 350 с.
7. Сиденко, В.М. Автомобильные дороги (совершенствование методов проектирования и строительства) / В.М. Сиденко. – Киев : Будівельник, 1973. – 278 с.
8. Бируля, А.К. Проектирование автомобильных дорог. В 2 ч. Ч. 1 : учеб. для специальности «Автомоб. дороги» вузов СССР / А.К. Бируля. – М. : Авто-трансиздат, 1961. – 500 с.
9. Маркуц, В.М. Особенности расчета нежестких дорожных одежд со слоями из слабосвязных материалов / В.М. Маркуц // Автомобил. дороги. – 1991. – № 14. – С. 9–11.
10. Бабков, В.Ф. Проектирование автомобильных дорог : учеб. для вузов / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев. – М. : Транспорт, 1979. – 407 с.
11. Радовский Б.С. Напряженное состояние жестких дорожных одежд промежуточными слоями из слабосвязных зернистых материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Б.С. Радовский. – Харьков, 1966. – 21 с.
12. Паншин, Б.И. Влияние вида напряженного состояния на характеристики процесса механического стеклования полимеров / Б.И. Паншин, Б.В. Перов, А.Г. Федоренко // Механика полимеров. – 1971. – № 2. – С. 195–199.

## Forecast of Working Capacity of Heaters (Expanded Polystyrene PENOPLEKS®) in the Pavement

V.P. Yartsev, D.V. Ivanov

*Department "Construction of Buildings and Structures", TSTU;  
kzis@nnn.tstu.ru*

**Key words and phrases:** expanded polystyrene PENOPLEKS®; kinetic theory of fracture and deformation; longevity; pavement; performance; physical and empirical thermo-fluctuational constants; water and heat treatment.

**Abstract:** The parameters of the hydrothermal mode of road subgrade and tension in the heat insulating layer have been identified; the technique of forecasting of working capacity of heat insulating layer made from extruded polystyrene PENOPLEKS® 45 has been proposed.

---

## Prognostizierung der Arbeitsfähigkeit des Wärmestoffes (am Beispiel des Extrusionsschaumpolystyrols PENOPLEKS®) in den Strassendecken

**Zusammenfassung:** Es sind die Parameter des wasser-thermischen Regimes der Strassendecke und der Spannung in der thermoisolierenden Schicht bestimmt. Es ist die Methodik der Prognostizierung der Arbeitsfähigkeit der thermoisolierenden Schicht aus dem Extrusionsschaumpolystyrol (PENOPLEKS® 45) vorgeschlagen.

---

## Prévision de la capacité du travail du protecteur contre le froid (à l'exemple du polystyrène expansé d'extrusion PENOPLEX®) dans les revêtements routiers

**Résumé:** Sont définis les paramètres du régime d'eau et de chaleur de la voie de terre et de la tension dans une couche d'isolation thermique; est proposée la méthode de la prévision de la capacité du travail de la couche d'isolation thermique à partir du polystyrène expansé d'extrusion PENOPLEX® 45.

---

**Авторы:** *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструкции зданий и сооружений»; *Иванов Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Монастырев Павел Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».