Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 230–242.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 230–242.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.855.3:625.71.06
DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-230-242 EDN: YCCUPP

К ТЕОРИИ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА С УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Владимир Михайлович Картопольцев[1,2], Александр Аверьянович Алексеев[2], Батыр Анатольевич Параев[3]
[1]ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия
[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия
[3]Департамент МКУ «Городское хозяйство и лесничество», г. Горно-Алтайск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Совершенствование расчета асфальтового бетона, обладающего параметрами структурно нестабильного материала, направлено на реализацию решения задач повышения несущей способности с позиции расширения границ упругой и пластической работы материала.

Цель работы. Определение упругопластических характеристик асфальтового бетона в процессе неравновесности деформирования и эффекта упругого последействия.

Практическая значимость. Оценка прочности асфальтобетонного покрытия проезжей части рассматривается решением контактной задачи для структурно нестабильного материала.

Ключевые слова: анизотропный, упруговязкопластический, асфальтовый бетон, структурно нестабильный, энергия деформации, ортотропность, прочность, разрушение

Для цитирования: Картопольцев В.М., Алексеев А.А., Параев Б.А. К теории расчета конструктивных элементов из анизотропного материала с упруговязкопластическими свойствами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 4. С. 230–242. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-230-242. EDN: YCCUPP

ORIGINAL ARTICLE

TOWARDS CALCULATION OF ANISOTROPIC CONSTRUCTIVE ELEMENTS WITH ELASTIC-PLASTIC PROPERTIES

Vladimir M. Kartopoltsev[1], Aleksandr A. Alekseev[2], Batyr A Paraev[3]
[1]*OOO "DIAMOS", Tomsk, Russia*
[2]*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*
[3]*Municipal Public Institution Deaprtment "Urban Economy and Forestry", Gorno-Altaisk, Russia*

Abstract. Calculation improvement of asphalt concrete possessing parameters of structurally unstable material is based on the problem of increasing the bearing capacity in terms of the expansion of borders of elastic and plastic material deformation.

Purpose: Determination of elastic-plastic characteristics of asphalt concrete during non-equilibrium deformation and elastic aftereffect.

Practical implications: The estimation of strength of asphalt concrete pavement of carriageway is based on a solution of the contact problem for structurally unstable material.

Keywords: anisotropic material, elastic-viscoplastic, asphalt concrete, structurally unstable, strain energy, orthotropy, strength, failure

For citation: Kartopol'tsev V.M., Alekseev A.A., Paraev B.A. Towards Calculation of Anisotropic Constructive Elements with Elastic-Plastic Properties. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (4): 230–242. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-230-242. EDN: YCCUPP

Асфальтовый бетон рассматривается как упруговязкий анизотропный неоднородный материал, плохо сопротивляющийся растяжению и ударам. Он чувствителен к местным напряжениям и не приспособлен к исправлению формы первоначально изготовленного элемента в качестве материала плиты проезжей части, как правило, автомобильных дорог и мостов [1, 2]. Асфальтовый бетон – это самостоятельный, испытывающий максимальное объемное напряжённо-деформированное состояние конструктивный элемент дорожной одежды на упругоподатливом основании, который рассматривается как структурно нестабильный материал плиты проезжей части, обладающей характерно выраженным отклонением прямолинейной зависимости lg $\tau(\sigma)$ от прочности в виде нелинейности, отображающейся нестабильностью структуры материала [3, 4]. Рассматривается направление решения контактной задачи при оценке прочности покрытий проезжей части дорог и мостов, представленной в виде плиты с граничными условиями и законами деформирования на основе теории упругости и пластичности с учетом термофлуктуационного характера поведения асфальтового бетона. Реализация нестандартных подходов к решению задачи затрагивает рассмотрение всех эксплуатационных факторов, вызывающих локальные перенапряжения и разрушения, связанные не только с естественными концентраторами напряжения, но и достигающие критических значений энергии деформации.

Энергетическая флуктуация асфальтового бетона как материала плиты проезжей части представлена закономерностями теории термоупругости и термодинамики, а также теплопроводности в условиях проявления сжимающих или растягивающих напряжений в теории кинетической прочности и разрушения, развивающихся во времени [5, 6].

Конструктивная ортотропность асфальтобетонной плиты проезжей части отличается от элементов упругости или упругопластического сопротивления вследствие трех причин:

1. Рассеяние механической энергии в результате ее взаимодействия с потоками немеханической (например, тепловой) энергии или с потоками деформаций частиц тела.

2. Рассеяние механической энергии вследствие вязкого или квазивязкого течения компонентов анизотропного неоднородного состава тела плиты из асфальтового бетона, а также взаимодействия жидких или вязких компонентов с упругой твердой средой.

3. Рассеяние механической энергии вследствие внутреннего трения при скольжении множества неоднородных произвольно ориентированных кристалловидных упругих и квазиизотропных поликристаллов.

Конструктивная ортотропность асфальтобетонной плиты проезжей части рассматривается преимущественно в плоском напряженном состоянии. Анизотропность и неоднородность выражаются через связь компонентов тензора коэффициентов упругости и компонентов тензора модулей упругости при растяжении, сжатии и сдвиге. Для упругого анизотропного тела связь тензоров имеет вид

$$\begin{cases} \varepsilon_\chi = \left(\dfrac{\sigma_\chi}{E_\chi}\right) - \mu_{\chi\gamma}\left(\dfrac{\sigma_\gamma}{E_\gamma}\right); \\ \varepsilon_\gamma = -\mu_{\gamma\chi}\left(\dfrac{\sigma_\gamma}{E_\gamma}\right) + \left(\dfrac{\sigma_\gamma}{E_\gamma}\right); \end{cases} \tag{1}$$

$$\varepsilon_{\chi\gamma} = \frac{\tau_{\chi\gamma}}{2G_{\chi\gamma}}. \tag{2}$$

После соответствующих преобразований имеем:

$$\begin{cases} \varepsilon_\chi = \left(\dfrac{1}{E_\chi}\right)\left(\sigma_\chi - \mu_{\gamma\chi}\cdot\sigma_\gamma\right); \\ \varepsilon_\gamma = \left(\dfrac{1}{E_y}\right)\left(\sigma_\gamma - \mu_{\chi\gamma}\cdot\sigma_{\gamma\chi}\right); \end{cases} \tag{3}$$

$$\gamma_{\chi y} = \frac{\tau_{\chi\gamma}}{G_{\chi\gamma}}, \tag{4}$$

где $E_\chi, E_y, \mu_{\gamma\chi}, \mu_{\chi\gamma}, G_{\chi\gamma}$ определяются из работы [7].

В случае упругопластического деформирования необходимо соблюдать следующие условия (рис. 1):

1. Процесс загружения рассматривается как равновесный.
2. Процесс разгрузки следует закону Гука.
3. Деформации плиты считаются малыми.
4. Анизотропность плиты считается неизменной в процессе деформирования.
5. Деформации плиты происходят по закону простого нагружения.
6. Деформации изменения объема упругопластического анизотропного тела следуют закону упругости при напряжениях, близких к σ_T (рис. 1, *б*).

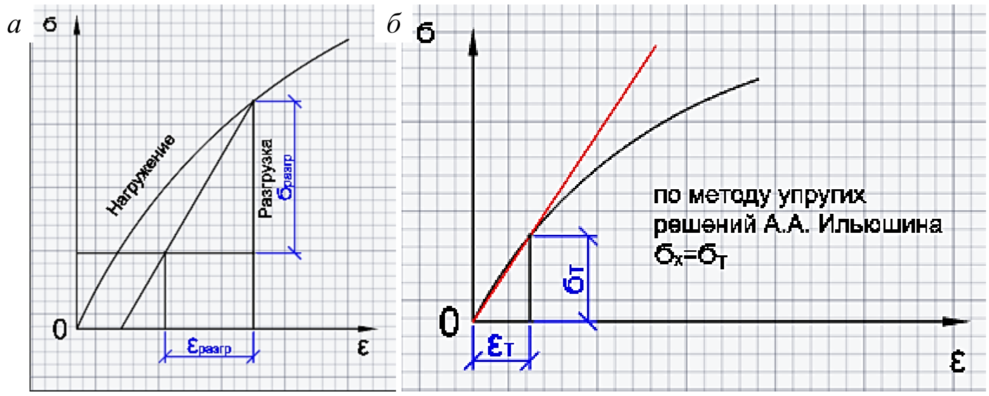

Рис. 1. Диаграмма «σ – ε» упругопластического деформирования анизотропного тела: *а* – стадия «нагружение-разгрузка»; *б* – зависимость между ε_i и σ_i на участке деформирования, равная σ_T

Fig. 1. σ – ε curves of elastic–plastic deformation of anisotropic body: *a* – loading-unloading; *b* – equals to σ_T

Для упруговязкого анизотропного неоднородного материала асфальтобетонной плиты проезжей части достаточно применение диаграммы «σ – ε» Прандтля. Тогда зависимость для определения напряжений и деформаций с учетом сдвига на нейтральной оси плиты будет иметь вид

$$\left.\begin{aligned} &\sigma_x = E\varepsilon_x;\ \tau_{zx} = \frac{1}{3}E\cdot\gamma_{zx}\cdot\alpha;\\ &\alpha = \frac{1}{1+E\dfrac{\varepsilon_{\text{пл}}}{\sigma_i}};\ \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{zx}^2};\\ &\tau_{zx} = \gamma_{zx}\frac{G}{2\left(\varepsilon_T + \varepsilon_{\text{пл}}\right)};\ G = \frac{E}{2}, \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

где γ_{zx} – деформация сдвига в рассматриваемом сечении плиты.

При напряжении $\sigma_i = E\cdot\varepsilon_T$; $\quad \sigma_x = \varepsilon_x\dfrac{\sigma_T}{\varepsilon_T + \varepsilon_{\text{пл}}}$. (6)

Рассматривая упругое и упругопластическое состояние плиты без учета сдвига, воспользуемся функцией А. Ильюшина:

$$\Phi = \lambda\left(1 - \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_i}\right), \tag{7}$$

где $\varepsilon_T = \frac{R_1}{E}$ – деформация, соответствующая началу пластичности; в пределах упругой зоны $\sigma_i = E \cdot \varepsilon_T$, за пределом упругости $\sigma_i = E\left(\varepsilon_{\text{пол}} - \varepsilon_{\text{пл}}\right)$, $\varepsilon_{\text{пол}} - \frac{R_1}{E} + 0{,}00001$ при $\lambda = 1$.

В процессе растяжения или сжатия наряду с удлинением и укорочением в направлении *x*, *y* асфальтобетонная плита претерпевает общее «перекашивание-сдвиг». В связи с этим при переходе анизотропного неоднородного материала в упруговязкое пластическое состояние свойство асфальтового бетона при малых упругопластических деформациях определяется неким потенциалом деформаций, который, в отличие от теории упругости, различен для процессов загружения и разгрузки и характеризуется энергетическим показателем в виде удельной энергии деформации [8, 9]. Изменение формы при величине объемной деформации, равной нулю, характеризуется объемным модулем упругости материала E_Θ:

$$E_\Theta = \lambda + \frac{2G}{3}. \tag{8}$$

Для определения упругопластических характеристик асфальтобетонной плиты воспользуемся параметрами зависимости «$\sigma_i - \varepsilon_i$» для анизотропных неоднородных материалов (рис. 2).

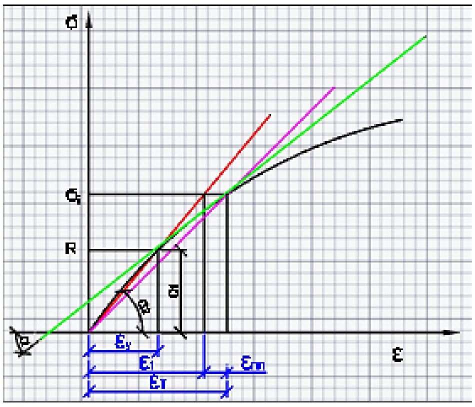

Рис. 2. Зависимости «$\sigma_i - \varepsilon_i$» упругопластического состояния асфальтового бетона
Fig. 2. $\sigma_i - \varepsilon_i$ curves for asphalt concrete

Напряжение за пределом упругости σ_i равно:

$$\sigma_i = E^{/} \cdot \varepsilon_i, \tag{9}$$

где $E^{/} = E\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_i}$ – упругопластический модуль деформации.

При $\lambda = \dfrac{\varepsilon_{\text{пл}}}{\varepsilon_i} E^{/} = (1-\lambda)E$; $\lambda = \dfrac{\mu \cdot E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ – константа Ламе [10].

E_k – касательный модуль упругости определяется по формуле М.М. Фридмана[1]:

$$E_k = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = E\left[1 - \left(\frac{\sigma_i - R}{\sigma_T - R}\right)^2\right].$$

E^I – секущий модуль упругости, равен $E_c = E\left(\dfrac{1}{1 + \dfrac{\varepsilon_y \cdot E}{\sigma_i}}\right)$.

Изменения коэффициента Пуассона (μ) в зависимости от реологии и событития деформированного тела отражаются на величине модулей упругости E_i, E_θ и λ:

$$\left.\begin{aligned} E_i &= \frac{(3\lambda + 2G)\mu}{\lambda + G}; \\ E_\Theta &= \frac{2G(1+\mu)}{3(1-2\mu)}; \\ \lambda &= \frac{\mu \cdot E}{(1+\mu)(1-2\mu)}. \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Взаимосвязь между E_i E_θ выражается в виде $E_\Theta = \dfrac{E \cdot G}{3(3G - E)}$.

При $\mu = \dfrac{1}{2}\dfrac{E}{G} - 1$, $E = E_i = \dfrac{9E_\Theta \cdot G}{3E_\Theta + G}$.

В стадии объемного напряженного состояния за пределом упругости анизотропное неоднородное тело обладает следующими характеристиками:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3}; \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0; \\ \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z &= (2G + 3\lambda)\varepsilon_i = \frac{E}{1-2\mu}\varepsilon_i. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

С учетом касательных напряжений в асфальтобетонной плите τ_{xy} и сдвига запишем отношения в виде [11]:

[1] Фридман М.М. Математическая теория упругости анизотропных сред // Прикладная математика и механика. 1950. Том XIV. Вып. 3. С. 93–102.

$$\left.\begin{aligned}\frac{\sigma_{xT}}{\sigma_{yT}} &= \frac{\sqrt{E_x}}{\sqrt{E_y}};\\ \frac{\sigma_{xT}}{\tau_{xy}\cdot T} &= \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{G}}.\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

Увеличение расчетного сопротивления асфальтового бетона с учетом влияния касательных напряжений рекомендуется определять коэффициентом K_R, равным

$$K_R = \frac{\sigma_{xT}}{\tau_T}\frac{W_{\text{упр}} + 2S_{\text{пл}}}{W}, \quad (13)$$

где $\tau_T = \frac{\sqrt{G}}{\sqrt{3G}}\sigma_T = 0{,}578\sigma_T$; $W_{\text{упр}}$ – момент сопротивления упругой части высоты плиты при сдвиге; $S_{\text{пл}}$ – статический момент зоны сдвига до оси, разделяющей упругую и пластическую зоны плиты; W – момент сопротивления плиты; $\sigma_{xT} = \sigma_T\left[1-(1-\lambda)\left(\frac{Z}{h_{\text{упр}}}-1\right)\right]$; $Z = \frac{H - h_{\text{пл}}}{2}$; $h_{\text{пл}}$ – высота зоны пластичности плиты; $\sigma_T = \tau_T\sqrt{3}$; $\lambda = 0$–1 – принимается в зависимости от вида напряженного состояния; H – высота (толщина) плиты.

При $\frac{h_{\text{упр}}}{H} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{i,\max}(\varepsilon_T + \varepsilon_{\text{пл}})}$ и $\varepsilon_T = \frac{\sigma_{xT}}{E}$ значения $h_{\text{упр}} = K_\sigma \cdot H$; $K_\sigma = \frac{1}{1 + \frac{1}{\lambda}\frac{\varepsilon_{i,\max}}{\varepsilon_T}}$.

Аналогично можно провести сравнительный анализ для значений E и E_Θ при условии

$$\sigma_{xT} = R_1\frac{Z}{h_{\text{упр}}}, \quad (14)$$

где R_1 – расчетное сопротивление асфальтового бетона при растяжении со сдвигом.

$$h_i = K_\gamma \cdot H/2, \quad (15)$$

где $K_\gamma = \sqrt{\frac{G\cdot\gamma_{\text{пл}}}{\alpha_m(\tau_T + G\cdot\gamma_{\text{пл}})}}$; $\tau_{\min} = \frac{Q\cdot S_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}}\cdot b}$; Q_θ – поперечная сила, вызывающая сдвиг в сечении плиты (параметр сдвигоустойчивости), равна:

$$Q_\theta = \frac{1}{3}\frac{H}{2}b\left(\tau_{\min} + 2\tau_{\max} + 2G\gamma_\theta - 2G\cdot\gamma_{\text{пл}}\cdot K_\gamma\right), \quad (16)$$

где b – расчетная ширина плиты; γ_θ – угловая деформация сдвига в плите, отвечающая пределу текучести касательного напряжения τ_T при сдвиге, равна:

$$\gamma_\theta = \gamma_{\max}\left(1 - \alpha \cdot \beta^2\right);\ \beta = \frac{Z}{H};\ \gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G};\ \tau_{\max} = \frac{\sigma_{пл}}{3\sqrt{\frac{1}{3} + \left(\frac{\varepsilon_{y+пл} \cdot \beta}{\gamma_{ср}}\right)^2}};\ \gamma_{ср} = \frac{Q_\theta \cdot S_{бр}}{J_{бр} \cdot b},$$

где α – отношение статического момента площади половины высоты асфальтобетонной плиты $\left(\frac{H}{2}\right)$ к статическому моменту полной высоты сечения (H), $\alpha = \frac{S_{\frac{H}{2}}}{S_H}$; $\gamma_{пл} = \frac{Q_\theta}{A \cdot G}$; A – площадь поперечного сечения плиты; $\sigma_{пл} = \sigma_T\left[1 - 0{,}5\left(\frac{Z}{h_{упр}} - 1\right)\right]$.

Максимальный упругопластический изгибающий момент в сечении с $\sigma_i = \sigma_{пл}$ в момент сдвиговых деформаций равен [11, 12]:

$$M^x_{упр.пл} = 2EI\frac{\varepsilon_T}{h_{упр}} - E_I \cdot \varepsilon_T\left(\frac{2I}{h_{упр}} - \frac{bH^2}{4} + \frac{b \cdot h^2_{упр}}{12}\right); \tag{17}$$

$$E_I = (1 - \lambda)E.$$

Известно, что сдвиг в плите пропорционален сдвигающей силе, расстоянию между центрами тяжести сдвигающих элементов (плоскостей) и обратно пропорционален площади сечения элементов и модулю сдвига G (рис. 3).

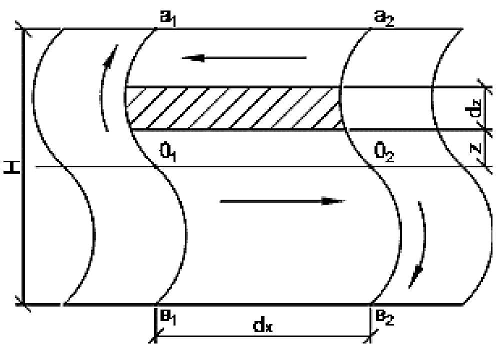

Рис. 3. Сдвиговые деформации в асфальтобетонной плите
Fig. 3. Shear strain in asphalt concrete slab

Приравнивание перерезывающей силы Q сдвигающей Q_θ, вызывающей сдвиг в плите (см. формулу (16)), запишем в виде следующего условия:

$$Q_\theta = \tau \cdot A, \tag{18}$$

где $\tau = \gamma_{\max} \cdot G$; $\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G}$.

Тогда прогиб плиты с учетом сдвига равен:

$$y_{\max} = y_M + \Delta y_\theta. \qquad (19)$$

Обозначая для прямоугольной плиты $\frac{I}{A} = \frac{h^2}{12}$, приравнивая $G = \frac{E}{2}$, величину Δy_θ получаем на основании работы [2]:

$$\Delta y_\theta = 1 + \frac{3h^2}{5l^2}, \qquad (20)$$

где y_M – прогиб плиты от изгибающего момента $M_{\text{упр.пл}}$, определенного в зависимости от расчетной схемы и граничных условий для плиты; l – расчетная длина плиты с шириной b.

Для упруговязких анизотропных неоднородных материалов, каким является асфальтовый бетон, деформации зависят не только от характеристик (см. формулы (10) – (12)), но и от приложения нагрузки во времени и от момента их замера. Процесс деформирования для таких материалов относится к неравновесным, т. е. это такой процесс, при котором в каждый момент времени нагружения не соблюдаются условия равновесия, для которого справедливы статические методы механики деформируемого тела. В таких материалах наряду с упругими деформациями возникают необратимые деформации релаксирующего характера – ползучести, нарастающие под нагрузкой с течением времени, описываемые средой Максвелла при соотношении 30 % упругих и 70 % пластических необратимых деформаций.

Таким образом, асфальтовый бетон как материал, деформирование которого относится к неравновесным, обладающий упругими и упруговязкими пластическими свойствами, описываемыми законами плоских сечений Бернулли в строительной механике, нормальными линейными закономерностями в прикладной теории упругости, термоупругости и термодинамики, остающиеся справедливыми в пределах и за пределом упругости, однозначно отвечают зависимостям между напряжениями и деформациями, которые рассматриваются для плит. Релаксирующая среда Максвелла и закон деформирования упруговязкой среды выражается дифференциальным уравнением [13, 14, 15]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}, \qquad (21)$$

где E – модуль упругости асфальтового бетона; η – коэффициент вязкости среды по Ньютону, равен $t_\theta \cdot E$; $t_\theta = \eta / E_{\text{ср}}$; $E_{\text{ср}} = E_{\text{дл}} = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$; $E_{\text{дл}}$ – длительный модуль деформации [16], t_θ – время релаксации.

Релаксирующее напряжение σ в течение времени $t - t_\theta$ равно [17]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t_0}{t_\theta}}. \qquad (22)$$

Уравнение (22) основано на линейной зависимости (закон Гука) между σ и ε, а линейная зависимость (по Ньютону) соответствует зависимости напряжения от скорости деформации по закону ползучести. Обозначая начальные деформации, сообщенные асфальтобетонной плите покрытия проезжей части из упруговязкого анизотропного неоднородного материала, равными $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$, выражение для полной деформации в период релаксации $t - t_\theta$ запишем в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_{\text{ср}}}\left(1 + \frac{t_0}{t_\theta}\right). \tag{23}$$

Напряжение (σ), возрастающее в этот период от нуля с постоянной скоростью V_0 до некоторой величины, определяется по формуле

$$\sigma = V_0 \cdot \Delta t; \qquad \Delta t = t_\theta - t_0. \tag{24}$$

Деформация в упруговязком теле (деформация Максвелла) равна:

$$\varepsilon = \frac{V_0 \cdot \Delta t}{E_{\text{ср}}} + \frac{V_0 \cdot \Delta t^2}{2E_{\text{ср}} \cdot t_\theta}, \tag{25}$$

где $E_{\text{ср}} = \dfrac{E \cdot E_{\text{мгн}}}{E + E_{\text{мгн}}}$; $E_{\text{мгн}} = E + E_{\text{дл}}$; $E_{\text{мгн}}$ – мгновенный модуль упругости; $E_{\text{дл}}$ – длительный модуль упругости.

Тогда для определения напряжения (σ_i) с учетом пластического деформирования и релаксации воспользуемся равенством [18, 19]:

$$\sigma_{i,\max} = \sigma_T + t_\theta \cdot E \cdot V_0 \cdot Z \left(1 - \mathrm{e}^{\frac{\varepsilon_i - V_0 \cdot Z \cdot t_\theta}{t_{\theta \cdot V \cdot Z}}}\right), \tag{26}$$

где $Z = \dfrac{\varepsilon_T}{V_0 \cdot t_\theta}$, $\varepsilon_T = \dfrac{\sigma_T}{E}$.

Равенство (26) указывает на некоторое упрочнение материала плиты за счет эффекта последействия показателем E^I (рис. 4) [20] при условии, что $\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_{i,\max} = E^I \cdot \sigma_{i,\max}$.

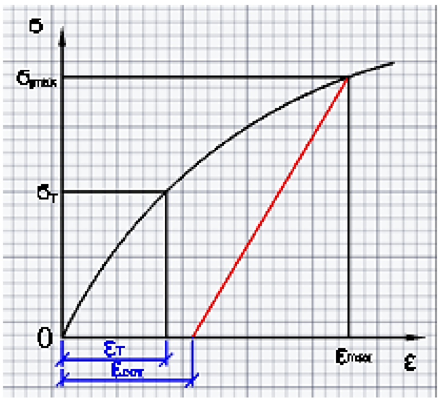

Рис. 4. Зависимость «$\sigma_i - \varepsilon_i$» упруговязкого тела с учетом последействия
Fig. 4. $\sigma_i - \varepsilon_i$ curves of elastic-viscous body with aftereffect

В стадии упругопластического деформирования E^I равен модулю упрочнения, изменения которого способствуют повышению границы упругости работы в результате срабатывания так называемого эффекта упругого последействия. В этом случае E^I равен:

$$E^I = \text{tg}\alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E \cdot \varepsilon_i \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_{\text{упр}}}{V}. \tag{27}$$

Таким образом, материал асфальтобетонной плиты дорожной одежды проезжей части рассматривается по аналогии с гидродинамикой вязкой среды как упруговязкий анизотропный неоднородный материал (ньютоново тело) (рис. 5)

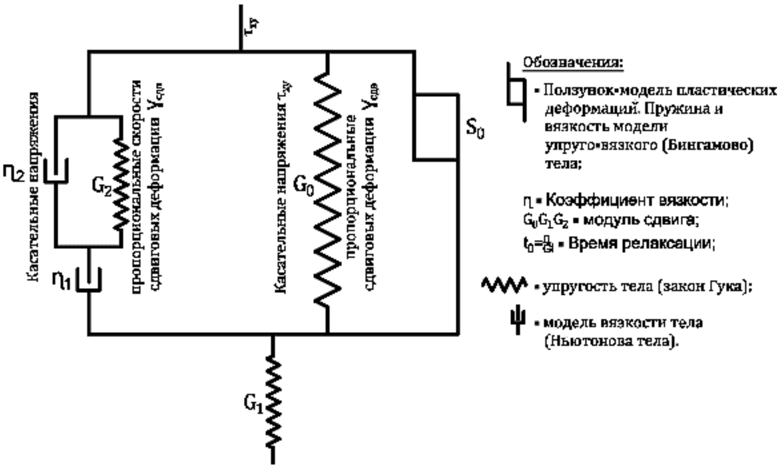

Рис. 5. Обобщенная реологическая модель асфальтового бетона
Fig. 5. Generalised rheological model of asphalt concrete

В обобщенной реологической модели асфальтового бетона (рис. 5) зависимости, в которых касательные напряжения (τ_{xy}) пропорциональны скорости деформации сдвига, а упрочнение, пропорциональное пластической деформации (линейное упрочнение), характеризуемое зависимостью напряжения от скорости пластических деформаций, рассматривается по аналогии с поведением упруговязкого «бингамова тела» [20].

Список источников

1. *Телегин М.А.* Методика расчета дорожной одежды на ортотропной плите стальных мостов // Дороги и мосты. 2011. № 2 (26). С. 205–230.
2. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1945. 750 с.
3. *Кац А.М.* Теория упругости. Санкт-Петербург : Лань, 2002. 208 с.
4. *Снеддон И.Н, Берри Д.С.* Классическая теория упругости. Москва : Государственное изд-во физико-математической литературы, 1961. 219 с.
5. *Регель В.Р, Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. 560 с.
6. *Безухов Н.И., Лужин О.В.* Приложение метода теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. Москва : Высшая школа, 1974. 200 с.

7. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. 416 с.
8. *Гольденблат И.И.* Некоторые вопросы механики деформируемой среды. Москва : Гостехиздат, 1955. 416 с.
9. *Губанов А.И.* Механика упруговязкопластических тел // Журнал технической физики. 1949. Т. XIX. Вып. 1. С. 34–42.
10. *Риз П.М.* Об упругих константах в нелинейной теории упругости // Прикладная математика и механика / Институт механики Академии наук Союза ССР. 1947. Т. XI. С. 493–494.
11. *Милейковский И.Е.* О возможном условии пластичности анизотропного тела // Исследование по вопросам строительной механики и теории пластичности : сборник статей / под ред. А.Р. Ржаницына. Москва : Госстройиздат, 1956. С. 169–179.
12. *Лукаш П.А.* Основы нелинейной строительной механики. Москва : Стройиздат, 1978, 204 с.
13. *Rimrott F.* Verlagenszeitbeim Kriechen // Ingn – Frch. 1959. V. 27. № 3. P. 189–178.
14. *Чернышов А.И., Алексеев А.А., Мокшин Д.И., Гаусс К.С., Тарбеева Ю.В.* Асфальтовый бетон повышенной водо- и морозостойкости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (54). С. 180–189.
15. *Ду Цин-Хуа*. Плоская задача теории изотропной неоднородной упругой среды // Проблемы механики сплошной среды. Москва : Изд-во АН СССР, 1968. С. 152–156.
16. *Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд* / под ред. Н.Н. Иванова. Москва : Транспорт, 1973. 328 с.
17. *Справочник проектировщика*. Расчетно-теоретический. Москва, 1961. 1040 с.
18. *Theodrescn P.P., Predeleaun M.* Uber das leben Problem nicht homogener elastischer Korper Acta // Techn Acad. Scient hung. 1959. № 3–4. P. 16–22.
19. *Srinivasan V.* On the Generalized M Lijer Transform // Bull Acad. Polen Scice III. 1963. № 7, 11. P. 32–43.
20. *Ростовцев Н.А.* К теории упругости неоднородной среды // Прикладная математика и механика. Москва : Изд-во Академии наук СССР, 1964. Т. 28. С. 601–611.

References

1. *Telegin M.A.* Calculation Technique of Pavement on Orthotropic Plate of Steel Bridges. *Dorogi i mosty*. 2011; (26/2): 205. (In Russian)
2. *Belyaev N.M.* Resistance of Materials. Gostekhizdat, 1945. 750 p. (In Russian)
3. *Katz A.M.* Theory of Elasticity. Staint-Petersburg, 2002. 207 p. (In Russian)
4. *Sneddon I.N., Berry D.S.* Classical Theory of Elasticity. Moscow, 1961, 219 p. (Russian translation)
5. *Regel V.R, Slutsker L.I., Tomashevsky E.E.* Kinetic Nature of Strength of Solids. Moscow: Nauka, 1974. 560 p. (In Russian)
6. *Bezukhov N.I., Luzhin O.V.* Elasticity and Plasticity Theory in Engineering Problems. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 200 p. (In Russian)
7. *Lehnitsky S.G.* Theory of Elasticity of Anisotropic Body. Moscow: Nauka, 1977, 415 p. (In Russian)
8. *Goldenblat I.I.* Some Questions of Mechanics of Deformable Medium. Moscow: Gostekhizdat, 1955. 416 p. (In Russian)
9. *Gubanov A.I.* Mechanics of Elastic-Visco-Plastic Bodies. *ZHTF*. 1949; 19 (1): 34–42. (In Russian)
10. *Riz P.M.* Elastic Constants in Nonlinear Theory of Elasticity. *PMMM*. 1947; 11: 493–494. (In Russian)
11. *Mileikovsky I.E.* Possible Condition of Plasticity of Anisotropic Body. In: Problems of Structural Mechanics and Theory of Plasticity. Moscow, 1956. Pp. 169–179. (In Russian)
12. *Lukash I.A.* Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1978. 204 p. (In Russian)
13. *Rimrott F.* Verlagenszeitbeim Kriechen. *Ingn – Frch*. 1959; 27 (3):189–178.
14. *Chernyshov A.I., Alekseev A.A., Mokshin D.I., Gauss K.S., Tarbeeva Yu.V.* Asphalt Concrete of Increased Water and Frost Resistance. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016; 1 (54): 180–189. (In Russian)
15. *Du Qing-Hua*. Planar Problem of Theory of Elasticity of Inhomogeneous Elastic Medium. In: Problems of Continuum Mechanics. Moscow, 1968. Pp. 80–84. (In Russian)

Вестник ТГАСУ. 2024. Т. 26. № 4

16. *Ivanova N.N (Ed.)* Design and Calculation of Non-Rigid Road Clothes. Moscow: Transport. 1973. 323 p. (In Russian)
17. Computational and Theoretical Designer's Handbook. Moscow, 1961. 1040 p. (In Russian)
18. *Theodrescn P.P., Predeleaun M.* Uber das leben Problem nicht homogener elastischer Korper Acta. *Techn Acad. Scient hung*. 1959; (3–4): 16–22.
19. *Srinivasan V.* On the Generalized M Lijer Transform. *Bull Acad. Polen Scice III*. 1963; (7, 11): 32–43.
20. *Rostovtsev N.A.* On the Theory of Elasticity of Inhomogeneous Media. *PMM*. 1964; 28: 601–611. (In Russian)

Сведения об авторах

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1; Томский государственный архитектурно-строительный университет. 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, diamos@mail.ru

Алексеев Александр Аверьянович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет. 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, alekseev10@yandex.ru

Параев Батыр Анатольевич, магистр, зам. директора по капитальному строительству. Департамент МКУ «Городское хозяйство и лесничество». г. Горно-Алтайск, ул. Строителей, 3/1.

Authors Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, OOO "DIAMOS", 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Aleksandr A. Alekseev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, alekseev10@yandex.ru

Batyr A Paraev, Master, Municipal Public Institution Department "Urban Economy and Forestry", 3/1, Stroitelei Str., Gorno-Altaisk, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024
Одобрена после рецензирования 16.04.2024
Принята к публикации 14.06.2024

Submitted for publication 03.04.2024
Approved after review 16.04.2024
Accepted for publication 14.06.2024