

Носов С. В., канд. техн. наук, доц.  
Липецкий государственный технический университет

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ГРУНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

[nosovsergej@mail.ru](mailto:nosovsergej@mail.ru)

*Разработана методология оценки реологических характеристик уплотняемых дорожных материалов: модулей линейной и сдвиговой деформаций и коэффициента поперечной деформации, которые являются инвариантными к методам их определения. Показано, что компоненты тензора деформаций уплотняемого материала должны определяться в соответствии с особенностями развития деформаций в каждом направлении и закономерностями изменения соответствующей составляющей нагрузки со стороны уплотнителей.*

**Ключевые слова:** модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, ползучесть.

При оценке деформационных характеристик грунтов земляного полотна и дорожных асфальтобетонных смесей необходимо знать как начальные характеристики их соответствующих свойств, так и характер их изменения под действием внешних силовых воздействий со стороны уплотнителей. В подобных изменениях большую роль играют особенности взаимодействия конкретных по типу и форме уплотнителей со средой уплотняемого слоя, а также характерное перераспределение напряжений в ходе его деформирования.

Будем рассматривать только такое состояние материала уплотняемого слоя, при котором его деформации будут носить затухающий характер, уплотняя тем самым дорожно-строительный материал, не нарушая его сплошности. Такое весьма значительное допущение широко применяется при исследовании напряженно-деформированного состояния деформируемых сред, в частности в грунтоведении.

Состояние уплотняемого материала оценивают с помощью характеристик, которые не являются физическими константами, так как их значения меняются в зависимости от условий, в которых находится уплотняемый материал. Как правило, все характеристики подразделяют на два класса: к первому относятся те, которые непосредственно используются в расчетных формулах (физико-механические характеристики, параметры или показатели), ко второму – те, которые характеризуют уплотняемый материал по его составу и строению (физические характеристики, показатели или свойства).

Основными характеристиками деформационных свойств грунтов земляного полотна и дорожных асфальтобетонных смесей являются модуль линейной деформации  $E$ , модуль сдвиговой деформации  $G$  и коэффициент поперечной деформации  $\mu$ , которые, в отличие от модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона, применяемых в теории деформирова-

ния упругих материалов, учитывают не только упругие, но и вязкопластические части деформации, развивающиеся во времени нагружения. Именно поэтому при взаимодействии уплотнителей со слоем грунта или асфальтобетонной смеси параметры  $E$ ,  $G$  и  $\mu$  могут быть представлены как их реологические характеристики.

Для оценки показателей взаимодействия уплотнителей с грунтами или асфальтобетонными смесями используют, как правило, закономерности сжатия и сдвига. Для реализации моделей более высокого уровня представляется несомненным совместное использование этих закономерностей, имея в виду, что может быть реализован любой характер такого взаимодействия.

В основе предложенного подхода лежат известные положения механики сплошных сред, механики грунтов, теории наследственной ползучести, разработанные принципы построения расчетных моделей уплотняемой среды [1] и результаты экспериментальных исследований.

Численные значения характеристик грунтов и асфальтобетонных смесей должны быть инвариантны к методам их определения. На основе сложившегося почти векового опыта закономерности сжатия и сдвига определяют соответствующими перемещениями деформаторов (штампов). Именно моделируя процесс нагружения уплотняемого слоя посредством плоского штампа, имеется реальная возможность перехода к описанию процесса деформирования при взаимодействии его с различными ходовыми системами и другими уплотнителями транспортно-технологических машин.

В случаях когда грунт земляного полотна или асфальтобетонная смесь работают в условиях сложного напряженного состояния, согласно теории наследственной ползучести закон деформирования можно представить в виде уравнения сдвигов и уравнения объемного деформирования [2]:

$$e_{ij}(t) = \frac{S_{ij}(t)}{2G} + \frac{1}{2G} \cdot \int_0^t K_c(t-\tau) S_{ij}(\tau) d\tau; \quad (1)$$

$$\theta(t) = \frac{\tilde{\sigma}(t)}{B} + \frac{1}{B} \cdot \int_0^t K_v(t-\tau) \tilde{\sigma}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $e_{ij}(t)$  - компоненты девиатора тензора деформаций;  $S_{ij}(t)$  - компоненты девиатора тензора напряжений;  $\theta(t)$  - контракция (объемная деформация при уплотнении);  $\tilde{\sigma}(t)$  - шаровой тензор напряжений;  $K_c(t)$  - функция скорости сдвиговой ползучести;  $K_v(t)$  - функция скорости объемной ползучести;  $G$  и  $B$  - модуль сдвига и объемный модуль упругости.

Для случая одноосного деформирования можно получить выражения для продольной и поперечной деформаций через функции сдвиговой и объемной ползучести:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{9} \int_0^t [6P_c(t-\tau) + P_v(t-\tau)] d\sigma_{11};$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{9} \int_0^t [-3P_c(t-\tau) + P_v(t-\tau)] d\sigma_{11}.$$

Зная выражения для функций продольной и поперечной ползучести

$$P_{11}(t) = -\frac{\varepsilon_{11}(t)}{\sigma_{11}}; \quad P_{21}(t) = \frac{\varepsilon_{22}(t)}{\sigma_{11}} \quad (3)$$

и определив их связь с функциями сдвиговой и объемной ползучести

$$6P_c(t) + P_v(t) = -9P_{11}(t);$$

$$-3P_c(t) + P_v(t) = 9P_{21}(t),$$

можно определить коэффициент поперечной деформации, выраженный через реологические характеристики

$$\mu(t) = \frac{-3P_c(t) + P_v(t)}{-6P_c(t) - P_v(t)} \quad (4)$$

а через него – связь между функциями объемной и сдвиговой ползучести

$$P_v(t) = \frac{3(1-2\mu)}{1+\mu} \cdot P_c(t). \quad (5)$$

Для сжатого цилиндрического образца имеем

$$\varepsilon_{11}(t) = -\frac{1}{E} \cdot \left[ \sigma_{11}(t) + \int_0^t K_{11}(t-\tau) \sigma_{11}(\tau) d\tau \right], \quad (6)$$

$$\varepsilon_{22}(t) = +\frac{\mu_0}{E} \cdot \left[ \sigma_{11}(t) + \int_0^t K_{21}(t-\tau) \sigma_{11}(\tau) d\tau \right], \quad (7)$$

где  $\mu_0 = \mu(t)$  при  $t=0$ ;  $K_{11}(t-\tau)$  и  $K_{21}(t-\tau)$  – функции скоростей продольной и поперечной деформации материала, определяемые экспериментальным путем при тестовых испытаниях под нагрузкой, изменяющейся в соответствии с законом Хевисайда (когда материал мгновенно нагружается максимальной нагрузкой, выдерживается под этой нагрузкой в течение некоторого времени, а затем мгновенно разгружается до нуля).

По найденным функциям скоростей продольной  $K_{11}(t-\tau)$  и поперечной  $K_{21}(t-\tau)$  ползучести определены функции скоростей сдвиговой  $K_c(t)$  и объемной  $K_v(t)$  ползучести:

$$K_c(t-\tau) = \frac{K_{11}(t-\tau) + \mu_0 \cdot K_{21}(t-\tau)}{1 + \mu_0}, \quad (8)$$

$$K_v(t-\tau) = \frac{2\mu_0 K_{21} - K_{11}}{1 - 2\mu_0} = -\frac{K_{11} - 2\mu_0 K_{21}}{1 - 2\mu_0}, \quad (9)$$

т.е. объемная деформация уменьшается вследствие уплотнения.

Таким образом, по измеренным величинам продольной и поперечной деформаций можно построить функции продольной и поперечной ползучести, зная которые нетрудно получить функции сдвиговой и объемной ползучести. При этом получаем значения параметров материала уплотняемого слоя, инвариантные методам их определения для получения универсальной модели, пригодной для моделирования процесса взаимодействия земляного полотна и дорожных одежд с уплотнителями.

Используя различные законы нагружения уплотняемого слоя, наиболее близко описывающие процесс его взаимодействия с уплотнителями (рис. 1), определив в соответствии с ними законы развития деформации [3], используя вычислительную технику, можно определить параметры ядер ползучести уплотняемых грунтов и асфальтобетонных смесей.

Для наиболее общего случая, когда материал уплотняемого слоя работает в условиях сложного напряженного состояния, компоненты  $\varepsilon_{ij}(t)$  девиатора тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}(t)$  определяются каждая в отдельности в соответствии с особенностями развития деформаций в каждом направлении и закономерностями изменения соответствующей составляющей нагрузки со стороны уплотнителей машин. Это основное отличие представленного подхода от известных ранее, которое определяет его универсальность.

Главные деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , определяющие объемную деформацию и приращение плотности после однократного воздействия уплотнителя находятся из известного уравнения

$$\varepsilon^3 - J_1 \varepsilon^2 + J_2 \varepsilon - J_3 = 0, \quad (10)$$

коэффициентами которого являются инварианты деформированного состояния

$$J_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33};$$

$$J_2 = \varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{22}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{12}^2 - \varepsilon_{13}^2 - \varepsilon_{23}^2; \quad (11)$$

$$J_3 = \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\varepsilon_{33} + 2\varepsilon_{12}\varepsilon_{13}\varepsilon_{23} - \varepsilon_{11}\varepsilon_{23}^2 - \varepsilon_{22}\varepsilon_{13}^2 - \varepsilon_{33}\varepsilon_{12}^2.$$

Модуль деформации характеризует способность уплотняемого слоя сопротивляться прикладываемым нагрузкам. Так, модуль линейной вертикальной деформации определяется известным выражением

$$E(t) = \frac{\sigma \cdot D_{шт}}{\lambda(t)} = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  - среднее контактное напряжение под штампом, равное отношению прикладываемой согласно закону Хевисайда нагрузки к площади штампа;  $D_{шт}$  - диаметр круглого или длина сто-

роны квадратного штампа;  $\lambda(t)$  - полная деформация (осадка) штампа;  $\varepsilon(t) = \lambda(t) / D_{шт}$  - относительная деформация уплотняемого слоя;  $t$  - время действия нагрузки.

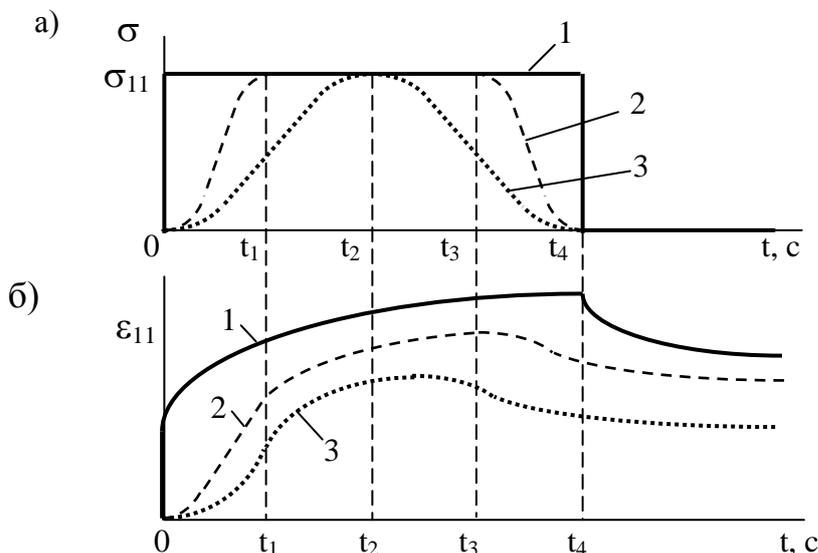


Рис. 1. Законы нагружения и развития деформаций уплотняемого слоя:

1 - прямоугольный; 2 - сплюснутая парабола; 3 - парабола

Аналогично для модуля сдвиговой деформации можно записать

$$G(t) = \frac{\tau}{\gamma(t)}, \quad (13)$$

где  $\tau$  - среднее касательное напряжение под штампом, равное отношению прикладываемой согласно закону Хевисайда сдвиговой нагрузки к площади штампа;  $\gamma(t)$  - полная угловая деформация (относительный сдвиг) уплотняемого слоя толщиной  $h_{сн}$ . Так, если обозначить через  $\alpha$  угол скашивания параллелепипеда высотой  $h_{сн}$  под действием в течение времени  $t$  постоянного касательного напряжения, определяемого через площадь штампа и сдвиговое усилие, прикладываемое к штампу, а через  $\lambda_r(t)$  - горизонтальное смещение верхней грани параллелепипеда вдоль линии действия касательного напряжения, то угловая деформация может быть выражена как

$$\gamma(t) = tg \alpha = \lambda_r(t) / h_{сн}. \quad (14)$$

Следует заметить, что в системе выражений (1) и (2), принимаемой для описания напряженно-деформированного состояния деформируемых сред, обладающих реологическими свойствами, модули деформации  $E$  и  $G$  по всем трем направлениям осей координат будут иметь различные численные значения даже в конкретный момент времени  $t$ , что объясняется нелинейными свойствами материалов уплотняемого слоя, характером и последовательностью приложения

действующих нагрузок, различными состояниями пространственных ограничений массива уплотняемого слоя, участвующего во взаимодействии с уплотнителями, и т.п. Поэтому необходимо проводить оценку этих реологических характеристик в каждом конкретном случае в зависимости от принимаемой схемы взаимодействия.

В теории упругости взаимосвязь между модулями  $E$  и  $G$ , а также коэффициентом Пуассона  $\mu$  описывается известным выражением

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (15)$$

Однако, для оценки взаимосвязи реологических характеристик уплотняемого слоя оно теряет конкретный физический смысл. Здесь необходимы более точные соотношения, определяемые, в первую очередь, временным фактором (или фактором времени).

В зависимости от времени действия нагрузки будем различать мгновенные ( $E, G$  и  $\mu$ ), текущие ( $E_t, G_t$  и  $\mu_t$ ) и длительные ( $E_\infty, G_\infty$  и  $\mu_\infty$ ) модули деформации и коэффициент поперечной деформации.

На примере развития вертикальной деформации уплотняемого слоя под действием вертикальной нагрузки рассмотрим особенности изменения модуля вертикальной деформации, а также методику его определения. Остальные

модули деформации уплотняемого слоя определяются аналогично.

При  $\sigma = \text{const}$  для нелинейных систем имеем:

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma}{\chi_0 \cdot \chi_k[x_i] \cdot f(t)}. \quad (16)$$

Мгновенный модуль деформации

$$E = \frac{1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau}{\chi_k[x_i] \cdot \varepsilon(t) / \sigma}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon(t) / \sigma = \bar{\varepsilon}_3(t)$  - величина экспериментальной кривой податливости в момент времени  $t$ ; применяется при наложении экспериментальных кривых податливости на семейство теоретических кривых по методике [2];  $\chi_0$  - коэффициент подобия между базовой и теоретической кривыми ползучести;  $\chi_k[x_i]$  - функция подобия между базовой и любой другой кривыми ползучести;  $f(t) = 1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau$ .

Величина длительного модуля деформации  $E_\infty$  может быть определена по выражению (16) при  $t \rightarrow \infty$ .

Таким образом, величины мгновенных модулей деформаций  $E$  и  $G$ , используемых совместно с функциями скоростей ползучести для определения деформаций в любой момент времени, можно определить, имея значения коэффициентов подобия, трансформирующихся в функцию подобия  $\chi_k[x_i]$ , коэффициента подобия  $\chi_0$  и данные по развитию деформации базовой кривой ползучести, полученные экспериментальным путем в лабораторных или полевых условиях при исследовании реологических характеристик уплотняемого материала.

Так как процесс уплотнения практически любого дорожно-строительного материала как упруго-вязко-пластичного материала протекает и при его нагружении, и после снятия нагрузки, то принято говорить о развитии его полной, обратимой и необратимой частей деформации. При этом полная деформация за время нагружения  $t$  постоянной нагрузкой определяется как сумма

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_n + \varepsilon_{nt} + \varepsilon_{об} + \varepsilon_{обt}, \quad (18)$$

т.е. включает необратимую  $\varepsilon_n$  и обратимую  $\varepsilon_{об}$  части деформации, а также необратимую  $\varepsilon_{nt}$  и обратимую  $\varepsilon_{обt}$  составляющие деформации, развивающиеся в процессе ползучести. Причем полная деформация за время  $t$  характеризуется модулем деформации (16), обратимая деформация - модулем обратимой деформации, необратимая деформация - модулем необратимой де-

формации. Последние два модуля деформации могут быть определены аналогично выражению (16), а их мгновенные значения - аналогично выражению (17), при этом необходимо обработать соответствующим образом кривые обратной и необратимой деформаций.

Для любого другого закона нагружения (например, рис. 1,б) также выделяются составляющие деформаций аналогично выражению (16), однако их величины будут определяться по другим выражениям [3]. При этом модуль деформации, согласно классическому определению (12) или выражению (16), а также мгновенный модуль деформации согласно уравнению (17) должны быть определены при режиме нагружения согласно закону Хевисайда.

Проанализировав выражение (16), можно сделать вывод, что сами по себе модули полной, обратимой и необратимой деформаций могут иметь различные значения не только в различные моменты времени развития деформаций, но также и в конкретный момент времени при различных значениях факторов  $x_i$ , характеризующих внешние силовые воздействия, даже при постоянных параметрах состояния слоя уплотняемого материала.

Кроме модулей линейной деформации  $E$ ,  $E_t$  и  $E_\infty$  и модулей сдвиговой деформации  $G$ ,  $G_t$  и  $G_\infty$  еще одной реологической характеристикой является коэффициент поперечной деформации

$$\mu = \varepsilon_\Gamma / \varepsilon_B, \quad (19)$$

где  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon_\Gamma$  - продольная (вертикальная для уплотняемого слоя) и поперечная (горизонтальная для уплотняемого слоя) относительные деформации относительно действующей нагрузки (вертикальной со стороны штампа).

Как правило, коэффициент поперечной деформации  $\mu$  выбирают из рекомендуемых значений на основе статистических данных, полученных в лабораторно-полевых условиях, методика определения которых удовлетворяет далеко не всем условиям функционирования различных систем. Коэффициент поперечной деформации  $\mu$  считают постоянной величиной. Однако это допущение может привести к большим погрешностям, особенно при оценке взаимодействия уплотнителей соответствующих машин и земляного полотна или дорожных одежд с ярко выраженными реологическими свойствами, которые достаточно быстро изменяются во времени.

С учетом выражений (6) и (7), помимо выражения (4), можно записать

$$\mu = \mu(t) = \frac{\varepsilon_\Gamma(t)}{\varepsilon_B(t)}. \quad (20)$$

Для анализа и проверки этой зависимости была проведена серия экспериментов по нагружению слоя суглинистого грунта толщиной 20 см, влажностью  $W$  в пределах 14,7...16,6 %, плотностью  $\rho$  в пределах 1,04...1,09 г/см<sup>3</sup>. Динамическая нагрузка воздействовала через упругий элемент на штамп посредством падающего груза с максимальным значением нормального напряжения  $\sigma_B$  в пределах 8...22 кПа и временем действия нагрузки  $T_d$  в пределах 0,11...0,21 с согласно [4].

Установлено, что при значениях времени действия нагрузки порядка 0,1 с коэффициент поперечной деформации  $\mu$  принимает значение 0,05. При дальнейшем увеличении времени нагружения грунта (в пределах нескольких секунд) коэффициент поперечной деформации принимает некоторое конечное значение, соответствующее данным многих авторов, например  $\mu=0,15...0,30$  [5]. Это рассогласование необходимо учитывать, т.к. время воздействия на поверхность уплотняемого слоя уплотнителями различно и, следовательно, значения коэффициентов поперечной деформации  $\mu$  будут различными.

Своеобразность изменения величины  $\mu$  при развитии объёмной деформации грунта под штампом можно объяснить особенностями временного эффекта, выражающегося в неравномерном формировании агрегатного состояния структуры материала в процессе уплотнения.

Произвести корректную оценку коэффициента поперечной деформации в пределах долей секунды можно только путем применения соответствующих методик, основанных на непосредственном привлечении фактора времени. В настоящее время одним из перспективных методологических подходов в этом направлении является подход, основанный на привлечении теории наследственного деформирования упруго-вязко-пластичных материалов.

Реализация разработанного способа [4] была апробирована при оценке реологических характеристик слоя грунта средней и низкой плотности. Параллельно проводилась оценка реологических характеристик слоя грунта с аналогичными параметрами состояния (влажностью, плотностью, толщиной слоя) путем его нагру-

жения через плоский штамп согласно закону Хевисайда и далее по методике, предложенной Колтуновым М.А. [2].

Таким образом, инвариантность численных значений реологических характеристик уплотняемого дорожно-строительного материала к методам их определения подтверждается возможностью применения общих закономерностей нелинейной наследственной теории вязкоупругости.

Особенностью представленной методологии является комплексная оценка реологических характеристик уплотняемого слоя, позволяющая выйти на определение модулей объёмной и сдвиговой ползучести, а через них – на оценку общего напряженно-деформированного состояния при учете времени и характера действия нагрузок со стороны уплотнителей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Носов С.В. Принципы развития теории уплотнения и концептуальная модель формирования технологий уплотнения дорожно-строительных материалов /С.В.Носов, Г.М.Бутузов.- Вестник ВолгГАСУ.- Сер. Стр-во и архит. 2012.- вып. 27(46).- Волгоград. С. 16-21.
2. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация /М.А.Колтунов.- М.: Высшая школа, 1976.- 278с.
3. Носов С.В. Технологические режимы работы уплотняющих машин и закономерности уплотнения дорожно-строительных материалов на основе развития их реологии /С.В.Носов // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2011.- № 3 (23). С. 87-98.
4. Пат. 2192006 Рос. Федерация. Способ определения физико-механических характеристик слоя почвогрунта, преимущественно имеющего низкую и среднюю плотность, и устройство для его осуществления /С.В.Носов, М.В.Рощупкин, А.Л.Кононов, А.Г.Каплун; № 99126270; заявл. 14.12.99; опубл. 27.10.02. Бюл. № 30 (II ч.).- 13 с.
5. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строит. вузов / Н.А. Цытович.- М.: Высш. шк.,1983.- 288 с.