Вопросы теории пластичности

РАСЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ И ГРУНТОВ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТРАНСПОРТНОЙ НАГРУЗКИ

А.С. АЛЕКСАНДРОВ, *канд. техн. наук, доцент*
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)
г. Омск, Россия

Исследованию физической природы пластического деформирования материалов и грунтов дорожных конструкций посвящено большое количество публикаций крупнейших ученых. Работы О.Т. Батракова, А.К. Бируля, И.А. Золотаря, Н.Н. Иванова, М.С. Коганзона, В.Д. Казарновского, Я.А. Калужского, В.П. Матуа, С.И. Миховича, А.В. Смирнова, Н.Я. Хархуты и др. являются фундаментальными в дорожной отрасли.

Анализ результатов исследований этих ученых показывает, что в большей или меньшей степени авторы в своих работах исходят из ряда допущений:

1. Материалы и грунты рассматриваются как идеально-пластические тела, испытывающие остаточные деформации при возникновении сколь угодно малых напряжений.
2. Взаимосвязь пластической деформации с величиной напряжения описывается линейными функциями при сколь угодно большом напряжении.
3. Продолжительность воздействия нагрузки принимается 0,1 с и не учитывает скорость движения транспортных средств, показатели механических свойств материалов и грунтов, толщину конструктивных слоев и т.п.
4. Влияние повторности (многократности) приложения нагрузок на величину накапливаемой пластической деформации выполняется одним из двух способов. Первый способ основан на использовании эмпирических логарифмических функций и по большому счету обоснован только для связных грунтов. В основу второго способа положена гипотеза подобия деформирования материалов при воздействии циклических нагрузок процессу ползучести при однократном воздействии длительной нагрузки.

Отмеченные допущения позволяют сформулировать цель работы, заключающуюся в физико-математическом описании процесса пластического деформирования материалов и грунтов в условиях воздействия повторных, кратковременных нагрузок для разработки методики проектирования дорожных конструкций по критерию обеспечения ровности покрытий автомобильных дорог.

Поставленная цель, по мнению автора, может быть достигнута последовательным решением трех задач:

1. Разработка метода определения линейных и нелинейных пластических деформаций при однократном приложении кратковременной нагрузки.
2. Разработка метода определения продолжительности напряженного состояния в различных элементах дорожной конструкции с учетом скорости движения нагрузки, показателей механических свойств материалов и толщины конструктивных слоев.
3. Аналитический вывод и обоснование функциональных зависимостей величины накапливаемой пластической деформации от количества прикладываемых нагрузок.

Решение первой задачи можно выполнить в рамках технической реологии, в которой разработаны разнообразные модели и теории (ползучести, старения, наследственности, упрочнения, консолидации и т.д.) [1]. По мнению автора наилучшими являются решения, отображающие реологические процессы при помощи так называемых структурных сопротивлений деформированию моделируемого объекта. В зависимости от материала и его физического состояния, а так же свойств, для которых необходимо выполнить математическое описание реологических процессов структурных сопротивлений может быть различное количество [2, 3]. Физический смысл структурного сопротивления заключается в том, что если значение напряжения превысит эту характеристику на сколь угодно малую величину, то характер деформирования изменится. Ранее автор осуществлял попытку совершенствования физической модели упруговязкопластического тела, состоящую из последовательно соединенных сложных реологических тел. Каждое из этих сложных тел [4] представляет собой известную или усовершенствованную модель и обладает своим структурным сопротивлением. В диапазоне напряжений, при возникновении которых материал испытывает пластические деформации, предполагается наличие 4 сопротивлений [4].

Приведем наименование и пояснение каждого из этих сопротивлений в порядке возрастания их количественного значения.

Предел начальной структурной прочности (предел обратимости деформаций) $p_{об}$ – величина, ограничивающая сверху множество значений напряжений вертикального сжатия, при возникновении которых материал проявляет свойства упруговязкого тела, то есть претерпевает только обратимые деформации.

Предел структурной вязкости p_{η} – величина, ограничивающая сверху множество значений напряжений вертикального сжатия, при возникновении которых материал проявляет свойства линейного упруговязкопластического тела, деформируясь как обратимо, так и пластически.

Предел линейности пластических деформаций p_{ε} – введенная авторами [4] величина, ограничивающая сверху множество значений напряжений вертикального сжатия, при возникновении которых материал проявляет свойства нелинейного упруговязкопластического тела, с вязкопластической составляющей деформации, зависящей от величины напряжения. Таким образом, вязкопластическая составляющая деформации с излишком напряжения (σ-p_{η}) связаны нелинейной зависимостью, а мгновенная пластическая деформация остается пропорциональной излишку напряжения.

Предел текучести $p_{т}$ – величина, ограничивающая сверху множество значений напряжений вертикального сжатия, при возникновении которых материал проявляет свойства нелинейного упруговязкопластического тела, испытывая мгновенные пластические и вязкопластические составляющие деформации, зависящие от величины напряжения. Зависимость между излишком напряжения (σ-p_{ε}) и составляющими пластической деформации нелинейная. В случае, если напряжение превысит предел текучести, материал течет.

В табл. 1 приведены, полученные формулы для расчета пластической деформации при однократном приложении кратковременной нагрузки [4].

Из табл. 1 следует, что вязкопластические деформации рассчитываются через модуль общей равновесной деформации, но не от всего излишка напряжения, а только от релаксирующей части. Физический смысл такого решения заключается в том, что отрелаксировавшая часть излишка напряжения обуславливает вязкопластическую деформацию. Коэффициент $k_{нр}$ характеризует часть напряжения, расходуемого на мгновенные упругую и пластическую деформацию и деформацию упругого последействия.

Таблица 1. Формулы для расчета пластических деформаций при однократном приложении кратковременной нагрузки

Диапазон напряжений	Формула
$p_{об} \prec \sigma \le p_\eta$	$\varepsilon_{пл(t)} = (\sigma - p_{об}) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр})}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_{об}}{T_p} \right] \right)$
$p_{об} \prec \sigma \le p_\varepsilon$	$\varepsilon_{пл(t)} = (p_\eta - p_{об}) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр})}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_{об}}{T_p} \right] \right) +$ $+ (\sigma - p_\eta) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр}) \cdot K_{t\eta}}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_\eta}{T_p} \right] \right)$
$p_{об} \prec \sigma \le p_m$	$\varepsilon_{пл(t)} = (p_\eta - p_{об}) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр})}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_{об}}{T_p} \right] \right) +$ $+ (p_\varepsilon - p_\eta) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{1}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр}) \cdot K_{t\eta}}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_\eta}{T_p} \right] \right) +$ $+ (\sigma - p_\varepsilon) \cdot (1-\mu^2) \cdot \left(\frac{K_\sigma}{E_{мп}} + \frac{(1-k_{нр3}) \cdot K_{t\varepsilon} \cdot K_\sigma}{E_{др}} \cdot \left[1 - exp\frac{-t_\varepsilon}{T_p} \right] \right)$
где $E_{ум}$ – модуль упругой мгновенной деформации (модуль Юнга), МПа; $E_{ув}$ – модуль упруговязкой деформации, МПа; $E_{мп}$ – модуль мгновенной пластической деформации, МПа; $E_{др}$ – модуль общей равновесной деформации, МПа; μ – коэффициент Пуассона; $k_{нр}$ – коэффициент, характеризующий нерелаксирующую часть напряжения; $t_{об}$, t_η и t_ε – соответственно эквивалентные продолжительности напряженного состояния с напряжениями, превышающими пределы обратимости деформаций, структурной вязкости и линейности пластических деформаций, с; T_p – время релаксации соответствующих излишков напряжений, с.	

Коэффициент $k_{нр}$ можно выразить через соотношение составляющих полной деформации. После простейших преобразований имеем:

$$k_{нр} = E_{др} \cdot \left(\frac{1}{E_{ум}} + \frac{1}{E_{ув}} + \frac{1}{E_{мп}} \right). \quad (1)$$

Коэффициенты $K_{t\eta}$ и $K_{t\varepsilon}$ определяется по зависимостям, аналогичным формуле проф. Н.Н. Маслова

$$K_{t\eta} = 1 + ln\frac{T_{(\eta-\varepsilon)}}{T_\eta} = 1 + ln\left(\frac{Z_{\sigma(\eta-\varepsilon)}}{Z_\eta} \right)^\nu ;$$

$$K_{t\varepsilon} = 1 + ln\frac{T_{(\varepsilon-m)}}{T_\eta} = 1 + ln\left(\frac{Z_{\sigma(\varepsilon-m)}}{Z_\eta} \right)^\nu , \quad (2)$$

где Z_η и T_η – соответственно глубина зоны распространения пластической деформации и время, необходимое на ее стабилизации при передаче давления, равного пределу структурной вязкости, м и с; $Z_{\sigma(\eta-\varepsilon)}$ и $T_{\eta(\eta-\varepsilon)}$ – соответственно глубина зоны распространения пластической деформации и время, необходимое на ее стабилизации при передаче давления, изменяющегося в диапазоне от p_η до p_ε, м и с; $Z_{\sigma(\varepsilon-m)}$ и $T_{\eta(\varepsilon-m)}$ – соответственно глубина зоны распространения пластической деформации и время, необходимое на ее стабилизации при передаче давления, изменяющегося в диапазоне от p_ε до p_m, м и с.

При решении второй задачи процесс воздействия транспортной нагрузки на дорожную конструкцию во времени можно разделить на три стадии:

1 – нагружение рассматриваемого сечения. В течение этой стадии напряжения вертикального сжатия возрастают от нуля до своей максимальной величины, что обусловлено приближением автомобиля к рассматриваемому сечению;

2 – условно можно считать, что напряжение некоторое время остается постоянным, имея максимальное значение. Это имеет место при проезде автомобиля непосредственно по рассматриваемому сечению. Продолжительность этой стадии характеризуется скоростью движения транспортного средства и длиной контакта колеса с поверхностью покрытия;

3 – в течение этой стадии напряжения вертикального сжатия уменьшаются от максимального до нулевого значения, что обусловлено удалением автомобиля от рассматриваемого сечения.

На рис. представлена схема для определения продолжительности напряженного состояния эквивалентной времени воздействия транспортной нагрузки на расчетное сечение проезжей части.

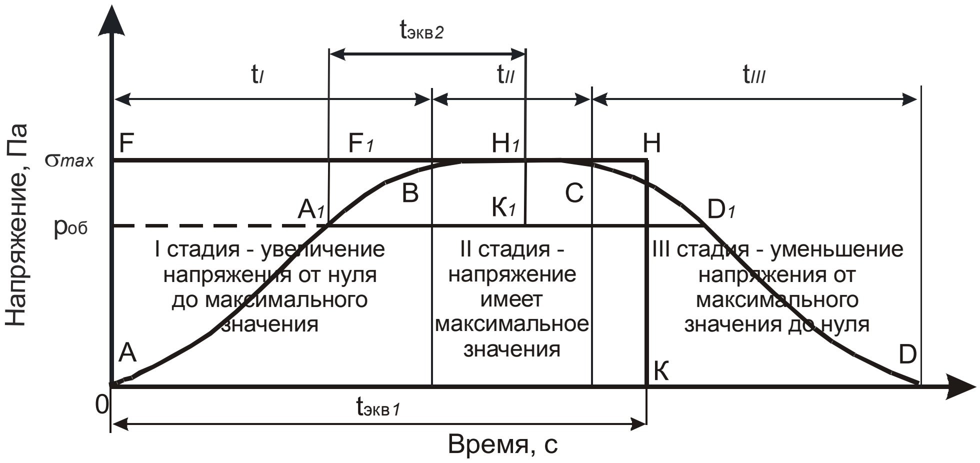

Рисунок. Изменение во времени напряженного состояния в рассматриваемой точке

На этом рисунке кривой $ABCD$ показан характер изменения напряжений во времени в рассматриваемом сечении: увеличение напряжения от нуля до максимума (кривая AB), условно постоянное максимальное напряжение (отрезок BC), уменьшение напряжения от максимума до нуля (кривая CD). Согласно предложению проф. Н.Я. Хархуты [1] продолжительность напряженного состояния с непостоянным во времени значением напряжения, можно заменить эквивалентной продолжительностью напряженного состояния с постоянным во времени напряжением, имеющим, например, максимальную величину $\sigma_{\text{мах}}$. Такая эквивалентная продолжительность для жесткопластического тела определяется из условия равенства площадей фигур A_1BCD_1 и $A_1F_1H_1K_1$, то есть в основу решения положим теорему о среднеинтегральном значении функции:

$$\int_0^{t_{\text{экв}2}}(\sigma_{max}-p_{\text{об}})dt=\int_0^{t_1}(\sigma(t_1)-p_{\text{об}})dt_1+\int_{t_1}^{t_2}(\sigma_{max}-p_{\text{об}})dt_2+\int_{t_2}^{t_3}(\sigma(t_3)-p_{\text{об}})dt_3. \quad (3)$$

где $\sigma(t)$ – функциональные зависимости изменения напряжения вертикального сжатия во времени; t_1, t_2, t_3 и $t_{\text{экв}1}$ – пределы интегрирования функций.

Из выражения (3) следует, что необходимо установить функции изменения напряжения во времени в течение 1-й и 3-й стадий процесса воздействия нагрузки, т. е. функцию увеличения напряжения во времени от нуля до максимума и уменьшения его во времени от максимума до нуля.

В работе [5] показано, что изменение напряжения вертикального сжатия во времени описывается формулой

$$\sigma_{(t)} = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot t}{T_D}\right)^{-2}, \tag{4}$$

где p – давление, передаваемое колесом автомобиля на покрытие, МПа; t–время с; T_D – период (время), в течение которого колесо транспортного средства перемещается на расстояние D, равное диаметру отпечатка колеса (диаметру штампа), м.

С учетом зависимости (4) и симметричности функций $\sigma(t_1)$ и $\sigma(t_3)$ интегральное выражение (3) примет вид:

$$(\sigma_{max} - p_{об}) \cdot t_{экв1} = (\sigma_{max} - p_{об}) \cdot (t_2 - t_1) +$$

$$+ \int_0^{t_1} \left(p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot t}{T_D}\right)^{-2} - p_{об} \right) dt + \int_{t_2}^{t_3} \left(p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot t}{T_D}\right)^{-2} - p_{об} \right) dt. \tag{5}$$

После интегрирования выражение (5) примет окончательный вид

$$t_{экв} = t_{об} = \frac{D}{\vartheta} - \frac{p \cdot D}{(p - p_{об}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{об}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{об} \cdot D}{(p - p_{об}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{об}}} - 1 \right) -$$

$$- \frac{p \cdot D}{(p - p_{об}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{об}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{об} \cdot D}{(p - p_{об}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{об}}} - 1 \right), \tag{6}$$

Аналогично получим

$$t_{\eta} = \frac{D}{\vartheta} - \frac{p \cdot D}{(p - p_{\eta}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\eta}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{\eta} \cdot D}{(p - p_{\eta}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\eta}}} - 1 \right) -$$

$$- \frac{p \cdot D}{(p - p_{\eta}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\eta}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{\eta} \cdot D}{(p - p_{\eta}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\eta}}} - 1 \right), \tag{7}$$

$$t_{\varepsilon} = \frac{D}{\vartheta} - \frac{p \cdot D}{(p - p_{\varepsilon}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\varepsilon}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{\varepsilon} \cdot D}{(p - p_{\varepsilon}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\varepsilon}}} - 1 \right) -$$

$$- \frac{p \cdot D}{(p - p_{\varepsilon}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\left(1 + \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\varepsilon}}} - 1\right)\right)^{-1} - 1 \right) - \frac{p_{\varepsilon} \cdot D}{(p - p_{\varepsilon}) \cdot 2 \cdot \vartheta} \cdot \left(\sqrt{\frac{p}{p_{\varepsilon}}} - 1 \right), \tag{8}$$

В настоящее время для учета повторяемости приложения нагрузок используется два принципиально разных способа. Первый способ основан на описании накопления пластической деформации от повторяющихся нагрузок эмпирическими формулами, как правило, логарифмическими зависимостями, некоторые из которых представлены в табл. 2.

Второй способ основан на гипотезе о подобии процессов ползучести и накопления деформации в результате многократного воздействия циклической нагрузки. Основные формулы, базирующиеся на этой гипотезе, приведены в табл. 3.

Таблица 2. Логарифмические зависимости, учитывающие повторность приложения нагрузки при расчете пластической деформации

Авторы	Формула
Н.Н. Иванов	$$S_N = a + \beta \cdot lg\, N$$ где a и β – параметры, зависящие от вида материала или разновидности грунта, величины нагрузки, частоты приложений, продолжительности цикла, скорости нарастания деформации; N – количество реализованных одинаковых нагрузок, ед..
Коллективы, разработавшие ВСН 46-60, ВСН 46-72, ВСН 46-83	$$S_N = S_1 \cdot (1 + \lg N) = p \cdot D \cdot \left(1 - \mu^2\right) / E_{общ}$$ где S_1 – прогиб дорожной одежды, возникающий при первом приложении нагрузки, мм, p – давление под колесом автомобиля, МПа; D – диаметр круга, равновеликого по площади отпечатку следа колеса расчетного автомобиля, м; $E_{общ}$ – общий модуль упругости дорожной конструкции, МПа.
А.В. Смирнов	$$S_N = S_1 \cdot lg\, n / lg\, N$$ где S_1 – остаточная деформация слоя дорожной одежды или активной зоны земляного полотна, возникающая при первом приложении нагрузки, мм; N – требуемое число, которое должен выдержать материал до разрушения, ед.; n – реализованное число напряжений, ед.
В.С. Орловский	$$w_N = w_1 \cdot \left(1 + K_q \cdot lg\, N\right)$$ где w_1 – высота уступа между плитами сборного покрытия, возникающая при первом приложения нагрузки, мм; K_q – коэффициент, учитывающий уровень напряженного состояния основания под плитой.
В.Д. Казарновский, А.С. Пилипенко	$$S_N = S_1 + \beta \cdot lg\, N$$ где S_1 – остаточная деформация грунта, возникающая при первом приложении нагрузки, мм.
А.С. Александров, Н.П. Александрова, В.В. Голубенко	$$S_N = S_1\left(1 + \beta_I\, lg\, N_I + \beta_{II}\, lg \frac{N_{II}}{N_I} + \beta_{III}\, lg \frac{N_{III}}{N_{II}} + \beta_{IV}\, lg \frac{N_{IV}}{N_{III}}\right)$$ где S_1 – деформация втапливания каменного зерна поверхностной обработки в покрытие при первом приложении нагрузки, мм; N_I – N_{IV} – предельные значения количества реализованных нагрузок, по завершению которых происходит изменение интенсивности накопления пластической деформации.

В работе [6] автором показано, что процессы пластического деформирования при воздействии длительной и многократной нагрузки имеют различные формы протекания релаксационных процессов и не являются подобными. Поэтому обоснование функциональных зависимостей пластической деформации от количества реализованных нагрузок является актуальной задачей.

Для вывода формулы, позволяющей производить количественную оценку пластической деформации, накапливаемой упруговязкопластическим материалом при многократном воздействии нагрузок, предположим, что этот процесс носит наследственный характер. Тогда аналогично теории наследственной ползучести Больцмана–Вольтера можно записать интегральное выражение для определения пластической деформации, накапливаемой при многократном воздействии нагрузки. При этом необходимо определить функциональную зависимость приращения деформации от числа приложения нагрузки.

Таблица 3. Формулы расчета пластической деформации при использовании гипотезы подобия

Автор	Формула
Н.Я. Хархута	$$S_N = K \cdot \left[s_{пм} + s_{вп} \cdot \ln\left(1 + \chi \cdot t_{экв} \cdot N\right)\right]$$ где $S_{пм}$ и $S_{вп}$ – соответственно пластическая мгновенная и вязкопластическая деформации при первом воздействии нагрузки; χ – показатель изменения вязкости грунта во времени; $t_{экв}$ – эквивалентная продолжительность напряженного состояния; K – коэффициент (K = 1,4).
А.П. Васильев, М.С. Коганзон, и др.	$$S_N = s_{вп} \cdot \ln\left(1 + \chi \cdot t_ц \cdot N_c \cdot K_{гнд}\right)$$ где N_c – общее количество приложения нагрузки и суточная интенсивность движения расчетных автомобилей; $t_ц$ – время действия одной транспортной нагрузки; $K_{гнд}$ – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение в течение года движения, приведенного к расчетной осевой нагрузке.
С.Ю. Каныгина	$$S_N = s_1 \cdot \left(1 + \frac{T \cdot N_c \cdot t_ц \cdot K_{сум}}{t_0}\right)^{[0,2+0,13 \cdot B]}$$ где s_1 – остаточная деформация от однократного приложения нагрузки (по исследованиям С.Ю. Каныгиной являющаяся функцией величины касательного напряжения и коэффициента консистенции грунта); $K_{сум}$ – коэффициент суммирования нагрузок; t_0 – множитель размерности 1с; B – коэффициент консистенции грунта.
В.Б. Фадеев	$$S_N = s_1 \cdot b_0 \cdot \left(1 + \frac{T \cdot N_c \cdot t_ц \cdot K_{сум}}{t_0}\right)^{[0,2+0,13 \cdot B]}$$
Е.В. Жустарева	$$S_N = s_1 \cdot \left(1 + \frac{T \cdot N_c \cdot t_ц \cdot K_{сум}}{t_0}\right)^{[0,2+0,13 \cdot f(K_У) \cdot 0,13 \cdot B]}$$ где $f(K_У)$ –функция, учитывающая влияние плотности связного грунта на процесс накопления остаточных деформаций;

Базируясь на результатах эксперимента, Ю.М. Гусев [7] пришел к выводу, что остаточная деформация, наблюдаемая при n–ом воздействии нагрузки S, взаимосвязана с деформацией от первого воздействия S_1 и описывается формулой

$$S = S_1 \cdot n^{-1,5}, \tag{9}$$

Исходя из этого, в качестве ядра интегрального выражения примем подобные степенные функции, а именно:

$$\Delta\varepsilon_{мп} = a \cdot к \cdot n^{-1}; \qquad \Delta\varepsilon_{вп} = a \cdot к \cdot n^{-1}, \tag{10}$$

$$\Delta\varepsilon_{мп} = n^{a \cdot к}; \qquad \Delta\varepsilon_{вп} = n^{a \cdot к}, \tag{11}$$

где $\Delta\varepsilon_{мп}$ и $\Delta\varepsilon_{вп}$ – соответственно приращения мгновенной пластической и вязкопластической деформаций от n–$го$ воздействия нагрузки; a – коэффициент, учитывающий вид материала; $к$ – коэффициент, учитывающий уровень напряженного состояния.

Составив интегральное выражение и выполнив его интегрирование с учетом (10) и (11), получим:

$$\varepsilon_N = (\varepsilon_{мп1} + \varepsilon_{впt1}) \cdot \left[1 + a \cdot \kappa \cdot \int_1^N n^{-1} dn\right] = (\varepsilon_{мп1} + \varepsilon_{впt1}) \cdot \left[1 + a \cdot \kappa \cdot \ln N\right], \tag{12}$$

$$\varepsilon_N = (\varepsilon_{мп1} + \varepsilon_{впt1}) \cdot \left[1 + \int_1^N n^{a \cdot \kappa} dn\right] = (\varepsilon_{мп1} + \varepsilon_{впt1}) \cdot \left[1 + \frac{\left(N^{a \cdot \kappa + 1} - 1\right)}{a \cdot \kappa + 1}\right], \tag{13}$$

где $\varepsilon_{мп1}$ и $\varepsilon_{впt1}$– соответственно мгновенная пластическая и вязкопластическая деформации от первого воздействия нагрузки, определяемые по соответствующим слагаемым в формулах табл. 1.

Согласно исследованиям СибАДИ, коэффициент κ можно определить, используя структурные сопротивления, по формуле

$$\kappa = \frac{\sigma - p_{об}}{p_m - p_{об}} - 1, \tag{14}$$

Из анализа (12) и (13) следует, что эти формулы являются достаточно простыми и в тоже время обобщающими решениями полученных ранее функциональных зависимостей табл. 1.

В зависимости от соотношения излишков напряжения в формуле (15) зависимость (13) способна описывать затухающий, установившийся и прогрессирующий характер накопления пластической деформации и соответствует экспериментальным данным [8, 9].

В заключении, следует отметить:

1. Формулы для расчета деформаций позволяют описывать кусочно-линейные и нелинейные зависимости деформаций от величины напряжения, что подтверждается многочисленными испытаниями образцов из различных разновидностей грунтов [1-4, 7] и разных материалов [8, 9];

2. По мнению автора одним из преимуществ данного подхода являются учет всего спектра упруговязкопластических свойств материалов и грунтов, а так же возможность перехода от модели с шестью структурными сопротивлениями к моделям с меньшим количеством сопротивлений. Это позволяет кардинально менять характер деформирования модели. Достигается такой переход равенством соответствующих структурных сопротивлений друг другу;

3. Экспериментальные лабораторные исследования, выполненные в кандидатских диссертациях В.В. Голубенко, Н.П. Александровой и Н.В. Кузина показывают, что формулы таблицы 1 с учетом (13) удовлетворительно описывают деформации образцов из различных асфальтобетонов и снега (плотностью 0,3–0,6 т/м^3). Это позволяет надеяться, что в будущем становится возможной разработка единой методики для прогнозирования изменения ровности дорожных конструкций со слоями из различных материалов;

4. Предлагаемые формулы могут быть положены в основу вывода формул для расчета перемещений (абсолютных деформаций) конструктивных слоев дорожной одежды и активной зоны земляного полотна. Для этого формулы таблицы 3 необходимо проинтегрировать по глубине слоев дорожной одежды и земляного полотна. Вид формул расчета пластических перемещений будет зависеть от выбранной функции изменения напряжения вертикального сжатия по глубине слоя или полупространства.

В работе [4] приведены формулы для расчета пластических осадок (перемещений) земляного полотна при воздействии повторяющихся нагрузок. Кроме того, интегрирование формул табл. 1 можно произвести различными приближенными методами, например использованием квадратурных формул (методы трапеций, Симпсона, Ньютона–Котеса и т.д.), позволяющих вычислять определенные собственные интегралы сложных функций.

В этом случае при расчете перемещений появляется возможность учитывать изменение по глубине не только напряжения вертикального сжатия, но и показателей реологических свойств, зависящих от характера изменения влажности грунтов в земляном полотне и температуры в конструктивных слоях одежды из материалов и грунтов, обработанных органическим вяжущим.

Таким образом, задача расчета пластических перемещений, накапливаемых дорожной конструкцией, имеет ряд альтернативных решений;

5. Использование функциональной зависимости (13) при расчете пластических деформаций материалов и грунтов дорожных конструкций при воздействии многократно прикладываемых (повторяющихся) нагрузок дает возможность описывать затухающий, установившийся и прогрессирующий характер накопления деформации, что подтверждается многочисленными испытаниями дорожных конструкций на кольцевых стендах [8, 9].

Литература

1. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов [Текст] / С.С. Вялов. – М.: Изд-во Высшая школа, 1978. – 417 с.
2. *Гольдштейн М.Н.* Механические свойства грунтов [Текст] / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 367 с.
3. *Александров А.С.* Моделирование деформационных процессов, протекающих в связных грунтах [Текст] /А.С. Александров // Наука и техника в дорожной отрасли, 2002. – № 4. – С. 16-19.
4. *Смирнов А.В.* Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций [Текст] /А.В. Смирнов, С.К. Илиополов, А.С. Александров – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 188 с.
5. *Александров А.С.* Определение продолжительности напряженного состояния в элементах дорожной конструкции при воздействии подвижных нагрузок [Текст] /А.С. Александров, Н.В. Кузин //Транспортное строительство. – 2008. – № 2. – С.24-28.
6. *Александров А.С.* Нелинейное пластическое деформирование при воздействии повторных кратковременных нагрузок /А.С. Александров //Известия ВУЗов. Строительство. – 2008. – № 10.
7. *Гусев Ю.М.* Остаточные деформации грунтов в строительстве [Текст] / Ю.М. Гусев. – Киев – Донецк: – Изд-во Вища школа, 1980. – 88 с.
8. *Кусков В.Н.* Прогноз срока службы дорожных одежд на основе стендовых испытаний. [Текст] /В.Н. Кусков //Автореф. дис… к-та техн. наук. – Тюмень: Изд-во Ротапринт Гипротюменьнефтегаза, 1996 – 21 с.
9. *Смирнов А.В.* Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности нежестких дорожных одежд [Текст] /А.В. Смирнов //Дис. …. д-ра техн. наук, Омск, 1989. – 389 с.

AN ANALYSIS OF PLASTIC DEFORMATION OF MATERIALS AND SOILS OF ROAD STRUCTURES CAUSED BY TRANSPORT LOADING

A.S. Alexandrov

The physical model of “plastic deformations – time span and quantity of loads” is presented. The process of accumulation of plastic deformations has inherited nature under multiple actions.

The integral expression for the determination of plastic deformation caused by multiple force actions limited by Bolzman and Walter theory was derived and solved.