

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автомобильные дороги»

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Методические указания

Ростов-на-Дону

ДГТУ

2018

УДК 69

Составители: В.П. Матуа, С.А. Мирончук

Современные методы прогнозирования накопления деформаций в элементах дорожных конструкций : метод. указания. – Ростов-на-Дону : Донской гос. техн. ун-т, 2018. – 48 с.

Описаны методов расчета и конструирования нежестких дорожных одежд. Достоинства и недостатки.

Предназначены для обучающихся по направлению 08.04.01 Строительство по программам «Автомобильные дороги» и «Проектирование, строительство автомагистралей и управление их состоянием».

УДК 69

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Донского государственного технического университета

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Автомобильные дороги»  
д-р техн. наук, профессор Е.В. Углова

---

В печать 18.12.2018 г.

Формат 60х84/16. Объем 3 усл.п.л.

Тираж 50 экз. Заказ №1826

---

Издательский центр ДГТУ

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный  
технический университет, 2018

## Содержание

Практическая работа № 1. История вопроса	4
Практическая работа № 2. Предпосылки к испытаниям к испытаниям связных грунтов на устойчивость к колееобразованию	22
Практическая работа № 3. Существующие методов расчета и конструирования нежестких дорожных одежд. Достоинства и недостатки	28
Практическая работа № 4. Прогрессивные методы расчета дорожных конструкций с учетом упруговязкопластичных свойств дорожно-строительных материалов	35
Литература	50

## Практическая работа № 1

### История вопроса.

Важнейшей задачей дорожной отрасли является повышение долговечности дорожных конструкций. Одним из основных факторов, способствующих снижению эксплуатационного состояния автомобильной дороги, является развитие *неровности* покрытия. В процессе эксплуатации автомобильной дороги в результате воздействия природно-климатических факторов и постоянно растущей интенсивности движения, а также скорости и грузоподъемности автотранспортных средств, асфальтобетонные покрытия теряют продольную и поперечную ровность, в них происходит интенсивное накопление пластических деформаций, в результате чего резко усиливается динамическое воздействие от движущихся автомобилей.

С точки зрения механики неровность обусловлена накоплением неравномерно распределенных необратимых деформаций в различных слоях дорожной конструкции. Этот процесс наблюдается в течение достаточно длительного промежутка времени, так как разовые воздействия транспортных средств, как правило, не приводят к образованию зон необратимых деформаций.

Немалая доля остаточных деформаций накапливается непосредственно в верхних слоях асфальтобетонных покрытий и связных слоях основания, поскольку, они являются наиболее широко применяемыми материалами при устройстве дорожных одежд, изучению их свойств и поведения при воздействии реальных динамических нагрузок и природно-климатических факторов необходимо уделять большое внимание.

Наиболее часто используемые в дорожном строительстве связные дорожно-строительные материалы, как правило, представляют собой сложную многокомпонентную систему. Эта сложность обусловлена, главным образом, особенностями их структуры, а также большой зависимостью свойств от многообразных факторов. Например, асфальтобетон резко меняет свойства в зависимости от температуры. При положительных температурах асфальтобетон обладает свойствами вязко-пластичного материала, а при отрицательных - упругого. Изменение температуры существенно влияет на деформационные свойства асфальтобетона, которыми в основном и определяется его работоспособность в дорожном покрытии.

Помимо температуры на свойства асфальтобетона и других связных ДСМ большое влияние оказывает и структура самого материала (количество вяжущего, структура минерального остова, плотность материала и т. д.)

Под структурой минерального остова следует понимать характер и взаимное расположение минеральных частиц, входящих в состав асфальтобетона. Минеральный остов воспринимает на себя значительную часть

усилий, поэтому важно, чтобы он состоял из достаточно прочных частиц и был плотным.

Фактически связные ДСМ являются упруго-вязко-пластичными материалами. В зависимости от состояния и условий деформирования в них могут проявляться или преимущественно упругие свойства или главным образом вязко-пластические. Таким образом в большинстве случаев в связных ДСМ одновременно или почти одновременно проявляется совокупность указанных свойств.

В напряженно-деформированном состоянии связные ДСМ проявляют ряд сложных свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, изменение прочности в зависимости от скорости деформирования, накопление деформаций при многократных приложениях нагрузки и т.д. В зависимости от проявления тех или иных свойств к ним применимы законы, вытекающие из теории упругости или теории пластичности (теории ползучести).

В классической теории упругости предполагается, что напряженное состояние твердого тела однозначно определяется его деформацией.

Для однородного изотропного материала это взаимно-однозначное соответствие между компонентами деформации и напряжения при одноосном напряженном состоянии выражается законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.1)$$

Если  $\varepsilon$  - функция времени, то для данного момента напряжение определяется единственным образом. Однако для многих тел, в том числе асфальтобетона, это однозначное соответствие между напряжением и деформацией не имеет места; такие тела обладают способностью деформироваться во времени при неизменном напряженном состоянии или изменять свое напряженное состояние, когда дальнейший процесс деформирования невозможен. Для таких материалов напряжения в некоторый момент времени  $t$  определяются не только деформацией в этот момент, но и всей предшествующей историей их деформации.

Свойства всякого материала определяются теми условиями, в которых он работает. При весьма кратковременных нагрузках такие материалы в зависимости от величины нагрузок находятся в «почти» упругом или упруго-пластическом состоянии. Если поставить их в условия длительного нагружения, что фактически и происходит с автомобильной дорогой в условиях высокой интенсивности движения, то их деформации растут в течение времени, - материал, как говорят, ползет под нагрузкой.

Опытами установлено, что деформация ползучести различных материалов, как например, бетона и асфальтобетона, зачастую может превосходить упругую в два-три раза. Поэтому существующий метод расчета дорожной одежды по

упругому состоянию может представить истинную картину напряжений в ней лишь отчасти.

Законы ползучести изучались для многих материалов, в частности, наиболее широко это вопрос изучен для таких материалов, как бетон и металл.

В настоящее время экспериментально установлено, что ползучесть бетона и многих других материалов зависит от большого числа факторов, которые, согласно Улицкому И.И., можно разбить на четыре группы и, поскольку, ползучесть относится и к характерным свойствам связных ДСМ, эти группы, за некоторым изменением, можно представить в следующем виде:

1. Факторы, зависящие от свойств и соотношения образующих асфальтобетон материалов, т.е. от типа и марки асфальтобетона.
2. Факторы, зависящие от окружающей среды, в частности от температуры, оказывающей наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние асфальтобетона.
3. Факторы, зависящие от характера нагрузки, т.е. от ее величины и длительности действия.
4. Факторы, зависящие от возраста асфальтобетона.

Исходя из вышеизложенного применение к связным ДСМ теории ползучести видится плодотворным, поскольку она, в отличие от теорий упругости и пластичности, оперирует дополнительно независимой переменной – временем. Наиболее полно свойства асфальтобетона можно определить при решении практических задач методами реологии – науки, рассматривающей общие законы течения, т.е. образование и развитие деформаций во времени.

На протяжении многих лет ряд авторов, как в нашей стране, так и за рубежом занимались изучением реологических свойств дорожно-строительных материалов, в частности изучением ползучести асфальтобетона занимались Богуславский А.М., Богуславский Л.А., Бурмистер Д., Васильев А.П., Гезенцев Л.Б., Горелышев Н.В., Кирюхин Г.Н., Коганзон М.С., Корсунский М.Б., Радовский Б.С., Руденский А.В., Телтаев Б.Б., и др. Исследованиями этих авторов установлено, что поведение асфальтобетонного покрытия в условиях эксплуатации дороги лучше характеризовать не конечной величиной общей деформации, полученной при испытании материала, а динамикой развития этой деформации.

Образованию вмятин, прогибов, трещин на покрытии предшествует начальная или «истинная» ползучесть, возникающая под влиянием высокой температуры и собственного веса над неровностями или швами в основании. Образующиеся незаметные деформации являются местами последующего сосредоточения напряжений, которые могут превзойти величину предела текучести асфальтобетона, способствовать развитию деформаций ползучести с

постепенным и нарастающим разрушением структуры, образованием остаточных деформаций и температурных трещин.

Детальное рассмотрение условий работы вязных ДСМ требует учета такого важного свойства, как релаксация напряжений, т.е. самопроизвольного снижения (рассасывания) напряжений во времени деформированного тела.

Основным показателем этого процесса, являющимся одновременно и характеристикой материала, служит время, в течение которого возникающее напряжение уменьшится на определенную величину и проявление вязными ДСМ свойств упругого и вязкого тела зависит от соотношения между временем действия нагрузки и временем релаксации напряжений.

К числу важнейших механических свойств вязных ДСМ, характеризующих их как дорожно-строительные материалы, относятся: прочность, пластичность, упругость и вязкость. Знание показателей, характеризующих эти свойства, позволяет правильно предсказывать поведение материала в различных условиях его работы.

Поскольку указанные свойства непосредственно связаны со структурой материала и характеризуют ее, они часто именуются структурно-механическими.

Благодаря исследованиям П.А. Ребиндера в широкую исследовательскую практику вошло определение структурно-механических свойств на основе анализа кривых течения (реологических кривых).

При постоянно действующем напряжении развитие деформаций во времени в упруго-пластичных материалах зависит от величины напряжения. Здесь могут быть рассмотрены два случая:

1. Когда действующее напряжение  $P$  достаточно мало и меньше предела упругости или предела текучести, т.е.  $P < P_k$

В этом случае в деформируемом теле развиваются только обратимые деформации, подразделяющиеся на два типа:

а) чисто упругая деформация  $\epsilon_0$ , подчиняющаяся закону Гука.

Эта деформация возникает после приложения нагрузки мгновенно со скоростью распространения звука в данном материале и с такой же быстротой спадает после снятия нагрузки;

б) деформация упругого последствия  $\epsilon_e$  (так называемая эластическая деформация).

Она медленно развивается после приложения нагрузки и так же медленно спадает после снятия напряжения. Эту деформацию иногда называют деформацией замедленной упругости.

В рассматриваемом случае, когда  $P < P_k$ , после снятия напряжения первоначальная геометрическая форма тела полностью восстанавливается.

Характер кривой деформация-время при приложении и снятии нагрузки показан на рис. 1.

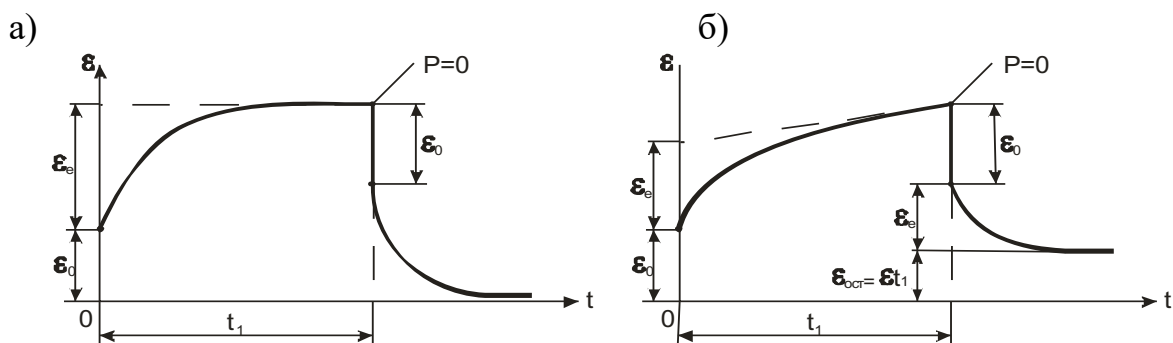


Рис.1 Развитие деформаций при напряжениях:

а – меньше предела текучести; б – превышающих предел текучести

2. Когда действующее напряжение  $P$  превышает предел текучести  $P_k$ , но меньше предельного напряжения  $P_m$ , вызывающего разрушение материала, т.е.  $P_m > P > P_k$ .

В этом случае в деформируемом теле при достаточно длительном времени (превышающем время, в течение которого развивается эластическая деформация), кроме рассмотренных выше, дополнительно появляется третий тип деформации – деформация вязкого и пластического течения, являющаяся необратимой  $\epsilon_{ост}$ .

После развития упругой и эластической деформации в деформируемом образце наблюдается период стационарного течения материала (с постоянной скоростью  $\epsilon = \frac{d\epsilon}{dt}$ ).

Следовательно, необратимая (остаточная) деформация будет постоянно возрастать со временем. Характер кривой для этого случая показан на рис. 1.1б.

У асфальтобетонов свойство вязкости проявляется при определенной температуре. В жидких и газообразных средах течение наступает даже при незначительных внешних нагрузках. У твердообразных сред вязкое течение проявляется, начиная с определенного уровня напряжения, и обуславливает развитие необратимых деформаций с течением времени. Итак, в отличие от теории пластичности, в которой при определенном уровне нагружения появление пластических деформаций происходит независимо от фактора времени, необратимые вязкие деформации нарастают в течение довольно продолжительного временного отрезка, т.е. краткосрочное превышение предельного напряжения практически не приведет к росту необратимых деформаций.



На базе подобной модели основателями реологии Бингамом и Гринном введено понятие вязко-пластичного тела, или тела Бингама. Одной из форм реологического уравнения состояния является закон Шведова-Бингама:

$$\begin{cases} \tau_i = G\gamma_i \text{ при } \tau_i < R_t, \\ \tau_i = R_t + \eta\dot{\gamma}_i \text{ при } \tau_i \geq R_t, \\ \sigma_0 = K\varepsilon_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

В более общем случае, при переменном уровне напряжений, уравнения вязкого течения Шведова обобщают уравнения Максвелла и записываются так:

$$\begin{cases} \tau_i = G\gamma_i \text{ при } \tau_i < R_t, \\ \dot{\gamma}_i = \frac{1}{\eta}[\tau_i - R_t] + \frac{1}{G}\dot{\tau}_i \text{ при } \tau_i \geq R_t, \\ \sigma_0 = K\varepsilon_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Определяющие уравнения течения согласно модели Кельвина и Фойхта записываются так:

$$\tau_i = G\gamma_i + \eta\dot{\gamma}_i \quad (1.4)$$

Уравнения Фойхта описывает процесс *последействия*, т.е. продолжение развития деформаций после приложения нагрузки, а уравнения Максвелла процесс *релаксации* напряжений. Одновременный учет последействия и релаксации проводится в теории ползучести.

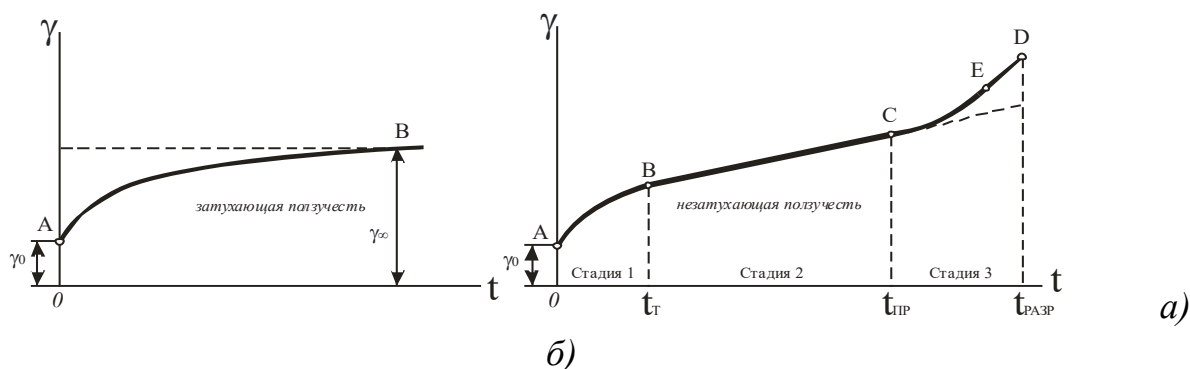


Рис. 2. Реологические модели ползучести

Условно процесс ползучести разделяют по скорости развития деформации: ползучесть может протекать либо с уменьшающейся скоростью и деформации асимптотически приближаются к некоторым конечным значениям (процесс затухающей ползучести) (рис. 2 а), либо возможна незатухающая ползучесть, которая характеризуется тремя фазами. 1- фаза АВ неустановившейся (затухающей) ползучести, фаза ВС установившегося течения, фаза CED нарастающей ползучести (рис. 2 б). При этом интенсивное разрушение материала происходит в пределах третьей стадии, на участке ED. Оба процесса

характеризуются «мгновенными» значениями деформаций, которые нарастают за очень короткий промежуток времени после приложения нагрузки.

При разгрузке (рис. 2 б) часть деформации снимается «мгновенно», а затем происходит процесс уменьшения деформаций во времени. Если к моменту времени, условно принятым «бесконечным», деформации не уменьшились до нуля, то говорят о наличии необратимых деформаций, в противном случае деформации считаются обратимыми, упругими. Обратимая деформация состоит, таким образом, из двух частей: часть обратимой деформации, которая снимается при разгрузке «мгновенно», и обратимая деформация, восстанавливающаяся за «бесконечный» интервал времени. Итак, полную деформацию в некоторый момент времени можно представить в виде суммы трех составляющих:

$$\gamma = \gamma_0^e + \gamma_\infty^e + \gamma^p \quad (1.5)$$

Верхним индексом *e* в (1.5) обозначена упругая составляющая деформации, индексом *p* обозначена необратимая (пластическая) деформация. Это соотношение отображено на следующей схеме.

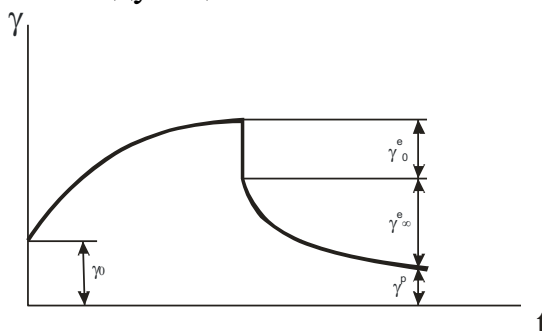


Рис. 3.

Степень снижения упругих деформаций по отношению к необратимым зависит от множества факторов, влияющих на поведение материала: времени приложения нагрузки, уровня напряженно-деформированного состояния, температуры, влажности, параметров колебаний частиц материалов и должна определяться эмпирически, из макро или микро экспериментов. Таким образом, если в течение определенного промежутка времени поддерживать постоянный уровень деформаций, а разгрузку производить в различные моменты времени, то график подобных процессов будет иметь следующий вид:

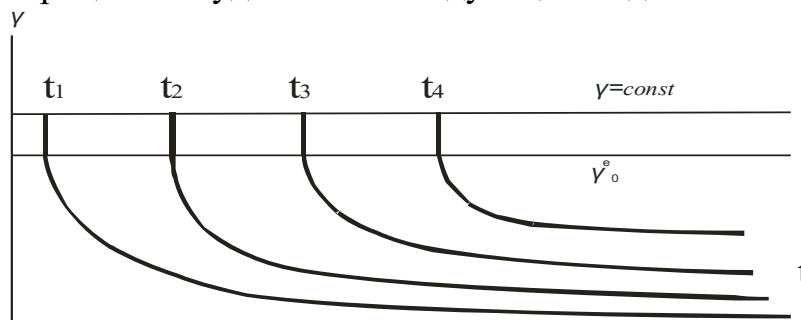


Рис. 4.

В работе Г.Н. Кирюхина отмечается, что «при положительных температурах обратимые деформации асфальтобетона являются вязкоупругими и развиваются во времени (упругое последствие) одновременно с необратимыми, однако они не участвуют в накоплении остаточных деформаций. Поэтому при определении остаточных деформаций асфальтобетона необходимо прямо или косвенно выделить необратимую составляющую из общей деформации материала».

Так же отмечается следующее: «Чтобы правильно прогнозировать накопление остаточных деформаций в асфальтобетонных покрытиях по данным лабораторных испытаний образцов или кернов необходимо знать закономерности вязкопластичного деформирования и разрушения асфальтобетона». Эти слова в значительной степени можно помимо асфальтобетона отнести и к другим связным дорожно-строительным материалам.

### ***1. Факторы, влияющие на изменение физико-механических характеристик грунта земляного полотна в реальных условиях эксплуатации автомобильной дороги.***

При изучении грунтов следует учитывать, в первую очередь, те главные факторы, которые в основном определяют поведение и инженерно-строительные свойства горных пород и почв в инженерных сооружениях: состав, структуру и текстуру горных пород и почв.

В зависимости от степени разрушения горной породы и некоторых других свойств, важных в строительном отношении, грунты, залегающие в основании инженерных сооружений или используемые как строительный материал, согласно действующей классификации грунтов (ГОСТ 25100—95) по характеру структурных связей разделяют на два основных класса: 1) грунты с жесткими структурными связями (скальные грунты) и 2) грунты без жестких структурных связей (нескальные грунты). Каждый из указанных классов по ряду признаков подразделяют на группы, подгруппы, типы, виды и разновидности.

В дорожном и аэродромном строительстве преимущественно используют нескальные грунты и чаще всего грунты осадочные нецементированные, относящиеся к подгруппе обломочных (крупнообломочных, песчаных, пылеватых и глинистых) грунтов.

Между грунтами скальными, представляющими собой, во многих случаях, прочные породы с жесткими связями между отдельными минералами или зернами, песчаными и особенно глинистыми грунтами, образовавшимися в результате выветривания, переноса, осаждения и последующего уплотнения, существует огромное различие.

Процессы физического, химического и биологического выветривания, приводящие к распаду скальных грунтов, обуславливают постепенное

накопление в их толще все более мелких частиц, вплоть до коллоидно-раздробленных, в результате чего такие грунты приобретают свойства дисперсных систем.

Промежутки между отдельными твердыми частицами грунта (грунтовые поры) в большей или меньшей степени бывают заполнены водой. Глинистые грунты, по внешнему виду находящиеся в сухом состоянии, содержат воду в форме тончайших пленок на поверхности минеральных частиц. При значительном увлажнении поры грунта полностью заполняются водой и представляют собой дисперсную систему, где дисперсионной средой является вода, в объеме которой распределены твердые минеральные частицы грунта — дисперсная фаза.

В мелких песчаных и особенно, в глинистых грунтах благодаря наличию большого количества частиц в единице объема грунта общая поверхность раздела между твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой может быть очень велика.

Дисперсность (степень раздробленности) придает веществу ряд новых важных свойств. Эти свойства бывают выражены тем сильнее, чем больше дисперсность вещества, т. е. чем мельче частицы, из которых оно состоит. Дисперсный грунт, в состав которого входят твердые частицы, вода и воздух (реже смесь газов), представляет собой многофазную (трехфазную или двухфазную) систему. Для свойств многофазной дисперсной системы большое значение имеет степень дисперсности.

Дисперсные грунты состоят обычно из частиц разной крупности и разного минерального состава, поэтому они представляют собой полидисперсные полиминеральные системы. Свойства таких систем весьма сложны, поскольку эти вещества отражают особенности входящих в систему частиц различной крупности и состава. Особенно значительное влияние на свойства грунтов оказывает наличие в них коллоидной и глинистой (тонкодисперсной) частей.

Увеличение содержания в грунте тонкодисперсных частиц ведет к значительному увеличению их суммарной поверхности, а следовательно, и к увеличению поверхности раздела между твердой, жидкой и газообразной фазами в грунте. Это обуславливает развитие сложных явлений взаимодействия между этими фазами.

Основным фактором, оказывающим существенное влияние на прочностные и деформационные характеристики грунта земляного полотна, является его температурно-влажностный режим. Изменение влажности сказывается, прежде всего, на способности грунтом выдерживать расчетные нагрузки, предусмотренные на этапе проектирования. Наиболее опасные последствия может вызвать повышенная влажность, близкая к влажности на границе

текучести. В этом случае происходит резкое снижение его прочностных и деформационных характеристик, существенно снижается способность сопротивляться динамическому воздействию транспортных средств.

Отрицательные температуры могут приводить к замерзанию влаги в грунтовом массиве и изменению его физико-механических свойств. К тому же наибольшую опасность содержат в себе частый переход через ноль и последствия, проявляющиеся в пучинистых грунтах.

Изменение температурно-влажностного режима в конструкциях дорожной одежды носит сезонный характер. Несмотря на особенности каждого конкретного сезона, можно сказать, что в общем сезонные параметры температурно-влажностного режима можно считать детерминированными, т.е. определенными для слоев конструкции конкретной дорожной одежды. Они зависят от климатических особенностей данной местности и от расположения конкретного участка дороги.

В практике изучения структурных и физико-механических свойств материалов наиболее развиты *экспериментальные методы* исследования, однако эти методы обладают рядом существенных недостатков. Во-первых, эти исследования связаны с большими материальными затратами, длительны во времени, часто требуют изготовления специального оригинального оборудования, как правило, кустарным способом. Во-вторых, анализ результатов испытаний лабораторных образцов часто затруднителен, так как все структурные параметры, влияющие на изменение тех или иных свойств, проявляются в комплексе, а выделение существенных параметров не всегда возможно.

*Аналитические методы* исследования дорожно-строительных материалов также имеют существенные затруднения, и связаны они с невозможностью математического описания структуры, имеющей статистический характер. Прямой перенос методов исследования однородных материалов и построение феноменологических теорий позволяют решать весьма узкий ряд задач, так как при этом исключается из рассмотрения структурный элемент вследствие представления материала псевдооднородным с некоторыми усредненными характеристиками. Эти теории носят скорее описательный характер. Любой же количественный расчет может быть проведен только в сопоставлении с натурным экспериментом.

Проблема вычисления и исследования физических свойств материалов с учетом их структурных особенностей представляет большой теоретический и практический интерес. Поэтому в последнее время появился ряд работ, посвященных разработке *полуэмпирических методов* для объяснения

структурно-чувствительных свойств материалов. Примером может служить релаксационная теория процессов, протекающих в асфальтобетоне.

Другим направлением исследования гетерогенных систем является построение *статистической теории нерегулярных структур*. Теория представляет структуру дисперсных систем в виде случайных ансамблей частиц, не имеющих областей с правильной структурой. Эта теория, отражая основные свойства большинства нерегулярных структур применительно к расчету структурно-механических свойств, наталкивается на технические трудности, связанные с большой размерностью задачи. В результате удалось получить асимптотические решения кинетического уравнения коагуляции для некоторых частных модельных условий. Использование численных методов и ЭВМ также не позволяет существенно продвинуться в направлении решения реальных задач.

Использование фундаментального представления *о парности взаимодействий* затрагивает только типы контактов структур (кристаллизационные, коагуляционные, конденсационные или переходные), но не дает представления о структуре в целом.

Таким образом, в условиях недостаточного развития теоретической базы по данному вопросу эмпирические зависимости, имеющие ограниченную область применения, и расчетные методы базируются в основном на одномерных и феноменологических подходах, игнорируют распределение фаз по объему, особенности структуры, страдают фрагментарностью в описании. Очевидно, что без учета этих важных аспектов невозможно более глубокое понимание физико-механических процессов, протекающих в конструктивных слоях дорожных одежд, а значит и совершенствование методов их расчета и конструирования.

## **2. Слои основания из несвязных материалов.**

Структуру дисперсных материалов принято рассматривать как некоторую систему, при исследовании которой необходимо принимать во внимание три уровня ее описания. К первому относятся форма и геометрические свойства частиц, в том числе такие их индивидуальные функции, как удельная поверхность, текстура и т.п.

Ко второму уровню описания относятся характеристики статистических ансамблей частиц. Это, прежде всего, функции распределения индивидуальных характеристик: гранулометрический состав, полидисперсность. Характеристики, обусловленные взаимодействием частиц в системе: пористость, число и площадь контактных зон, плотность упаковки, фрактальная размерность.

На третьем уровне описания структурные свойства оцениваются по показателям физико-механических свойств, которые являются функционалами характеристик первого и второго уровней: прочность, водонасыщение, морозостойкость, реологические свойства.

Развивая определение структуры, здесь и далее под структурой будем понимать совокупность внутренних свойств и связей, определяющих активные свойства объекта как целого (способность сопротивляться разрушению, оказывать активное воздействие на процессы переноса тепла и массы, обеспечивать достаточно высокие эксплуатационные показатели и т.д.). Это понятие целесообразно разделить на следующие составляющие:

- структуру по химическому и минералогическому фазовому составу, характеризующую свойства объекта, не зависящие от его геометрической организации;
- геометрическую структуру, характеризующую взаимное расположение и объем элементов, образующих структуру;
- структуру энергии связи между отдельными элементами;
- структуру свойств отдельных элементов, определяющих проводящие (переносные) свойства объекта.

Таким образом, внутренняя структура дисперсных дорожно-строительных материалов, как правило, представляет собой сложный статистический ансамбль макро- и микроэлементов, часто различных по своим физико-химическим свойствам, гранулометрическому составу, форме. При этом, на основе многочисленных теоретических исследований и практического опыта установлено, что особо важную роль в формировании интегральных свойств дисперсных материалов играет их геометрическое строение, поскольку именно оно определяет в конечном итоге характер протекания процессов структурообразования, упругопрочностные свойства материала. В связи с этим, в основу предлагаемого теоретического подхода, описывающего свойство объекта, положена геометрическая структура материалов, но, безусловно, с учетом ее связи с остальными видами структур. Основная идея работы состоит в том, чтобы представить дисперсные системы и материалы как структурированный объект, который подчиняется законам механики деформируемого твердого тела.

Для реализации поставленной задачи привлечена теория, способная описывать все многообразие структур в системе. В качестве таковой служит **теория фракталов**, которая исходит из принципиально иных представлений об организации физического пространства, чем классическая евклидова геометрия. Объектом описания теории фракталов являются самоподобные множества дробной топологической размерности, из чего следует, что одним из основных свойств фракталов можно считать **неоднородность**.

Ввел термин «фрактал» (от латинского «фрактус» - *дробный, нецелый*) Б. Мандельброт. В арсенале современной математики Мандельброт нашел количественную меру «неидеальности» объектов – дробная размерность или

размерность Хаусдорфа-Безиковича. Новая количественная характеристика, получившая название «фрактальная размерность», применительно к идеальным объектам классической евклидовой геометрии давала те же численные значения, что и известная топологическая размерность: равна нулю для точки, единице — для прямой, двум — для плоскости, трем — для тела и пространства. Показательно, что, совпадая со старой топологической размерностью на идеальных объектах, новая размерность обладает чувствительностью к различным несовершенствам реальных объектов.

Фрактальные объекты делят на два класса:

- регулярные фракталы;
- стохастические фракталы.

Примеры регулярных фракталов приведены на рис. 6-7.

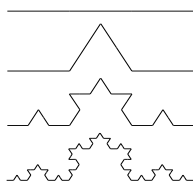


Рис. 6. Кривая Кох

Регулярные фракталы были первыми объектами, которые подтвердили принципиальную возможность существования геометрических объектов дробной топологической размерности. Все они обладают одним очень важным свойством — **самоподобием**, т.е. все объекты подобны любому своему фрагменту.

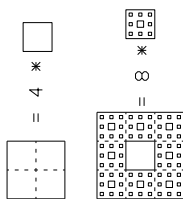


Рис. 7. Ковер Серпинского

Разумеется, далеко не все фракталы обладают столь правильной, бесконечно повторяющейся структурой. Поэтому для реального приложения теории и, в частности, для механики материалов наибольший интерес представляют **стохастические фракталы**.

Все дорожно-строительные материалы, представляющие различные типы дисперсных систем, имеют неупорядоченную структуру, однако необходимо



доказать, что они принадлежат к классу фракталов. Доказательства, согласно работе, строятся на основе определения и анализа фрактальной размерности ( $D$ ) их структуры.

Основное определяющее соотношение для фрактального кластера связывает его радиус  $R$  с количеством частиц  $N$  и имеет вид:

$$N = \left( \frac{R}{a} \right)^D. \quad (1.1)$$

Дробное значение  $D$  является указанием на фрактальный характер структуры материала.

Один из наиболее точных способов прямого нахождения фрактальной размерности основан на экспериментальном определении законов распределения агрегатов по размерам и массам, так как в большинстве своем реальные дисперсные системы являются *полифракционными*. Если перестроить в логарифмическом масштабе кривые гранулометрического состава плотных смесей для устройства конструктивных слоев дорожных одежд по размерам, то они с достаточной степенью точности аппроксимируются степенными зависимостями типа:

$$n_r \sim R^{-a}. \quad (1.2)$$

В то же время в работе показано, что при различных механизмах агрегации распределение кластеров из  $s$  частиц имеет следующий вид:

$$n_s \sim S^{-\tau}, \quad (1.3)$$

где  $\tau = 1 - 1/d + d/D$ ,

$d$  – топологическая (евклидова) размерность физического пространства.

Используя (1.1), в законе распределения (1.3) нужно сделать замену переменной, поскольку определяется распределение числа агрегатов по размерам, а не по числу структурных элементов.

Сопоставив результат с (1.2), получим формулу для определения фрактальной размерности структур материалов конструктивных слоев дорожных одежд:

$$D = d(1 + d + \alpha). \quad (1.4)$$

Определение фрактальной размерности структур реальных материалов является важным этапом исследования взаимосвязи структурных и прочностных параметров, так как позволяет использовать для этих целей математический аппарат теории фракталов.

Теория фракталов представляет возможность с единых позиций решить задачу описания всей иерархии структурных уровней в сложных материалах, так как фрактальный характер структур прослеживается на микро-, мезо- и макроуровне. В теории большое внимание уделяется вопросам формирования

структур. Она опирается на достаточно мощный математический аппарат, позволяющий описывать всю структуру в целом с помощью одного параметра – фрактальной размерности.

### ***3. Деформативные свойства асфальтобетона в слоях покрытий и оснований дорожных одежд***

Асфальтобетон является одним из наиболее сложных строительных материалов за счет большой зависимости его свойств от многообразных факторов и особенностей его структуры. Известно, что асфальтобетон резко меняет свойства в зависимости от температуры. При положительных температурах асфальтобетон обладает свойствами вязко-пластичного материала, а при отрицательных - упругого. Изменение температуры существенно влияет на деформационные свойства асфальтобетона, которыми в основном и определяется его работоспособность в дорожном покрытии.

Помимо температурных факторов на свойства асфальтобетона большое влияние оказывает и структура самого материала (количество асфальтового вяжущего, гранулометрический состав минеральной части, плотность материала, наличие стабилизирующих и модифицирующих добавок и т. д.).

В напряженно-деформированном состоянии асфальтобетон проявляет ряд сложных свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, изменение прочности в зависимости от скорости деформирования, накопление деформаций при многократных приложениях нагрузки и т.д. В зависимости от проявления тех или иных свойств к асфальтобетону применимы законы, вытекающие из теории упругости или пластичности (теории ползучести).

При положительных температурах наиболее типичной структурой асфальтобетона является коагуляционная. При отрицательных температурах образуются полидисперсные органические кристаллы и более типичной структурой является кристаллизационная.

Фактически же асфальтобетон является упруго-вязко-пластичным материалом. В зависимости от состояния и условий деформирования в нем могут проявляться или преимущественно упругие свойства или главным образом вязко-пластические. Таким образом, в большинстве случаев асфальтобетон одновременно может проявлять совокупность указанных свойств.

Известно, что асфальтобетон относится к связнодисперсным системам, характер структурных связей в которых определяется их механическими свойствами, к числу которых можно отнести упругость, вязкость, пластичность, прочность, ползучесть и т.д. Поскольку реология исследует данные механические свойства по накоплению деформаций от внешних постоянных и

циклических нагрузок, близких к эксплуатационным, реологический метод экспериментальных исследований наиболее применим для изучения структурно-механических свойств в подобного рода системах.

До настоящего времени не получены решения на должном теоретическом уровне и не установлены закономерности процессов развития и накопления остаточных деформаций в слоях дорожных одежд и земляном полотне, а также характер влияния этих деформаций на развитие неровностей покрытия под воздействием расчетных динамических нагрузок.

Исследования, направленные на совершенствование методики испытания дорожно-строительных материалов и в целом проектирования дорожных одежд нежесткого типа, остаются весьма актуальными как в России, так и за рубежом. Основной базой при этом должны служить разработанные в последние годы методы испытаний, учитывающие многообразные факторы и приближающие условия эксперимента к эксплуатационным. В последние годы над этой проблемой трудится ряд авторских коллективов, как у нас в стране, так и за рубежом.

Следует отметить прежде всего вклад в решение данного вопроса профессоров: Б.С. Радовского, В.А. Золотарева, В.П. Матуа, А.П. Васильева, Г.Н. Кирюхина, Н.Н. Иванова, Л.Б. Гезенцвей, Г.А. Бонченко, А.В. Руденского, В.Д. Казарновского, В.В. Мозгового, Б.Б. Телтаева А.М. Богуславского и др.

В действующих нормативных документах в расчетах дорожных конструкций используется осесимметричная модель упругого полупространства, не учитывающая инерционность движущейся массы и осноть автомобиля, влияние на напряженно-деформируемое состояние конечных поперечных размеров дорожной конструкции и расположение нагрузки на проезжей части.

Учет динамических процессов осуществляется с помощью эмпирических коэффициентов, которые не в полной мере описывают данный параметр, тем самым, снижают точность расчетных формул при получении конечных результатов. Развитие неровностей при эксплуатации дороги приводит к увеличению динамических воздействий от движущихся транспортных средств. Результаты исследований показали, что даже сравнительно малая неровность может в несколько раз, по сравнению со статическим, увеличить давление на покрытие при высоких скоростях движения.

Методика испытаний по определению предела прочности при сжатии далека от реальных условий работы материалов в дорожной конструкции, так как не учитывается боковое обжатие материала, динамический характер нагружения, а также интенсивность воздействия нагрузки.

Изучение свойств материалов при испытании под воздействием динамических нагрузок позволит получить необходимые сведения о их работоспособности в типичных для них условиях работы в дорожной конструкции и о роли асфальтобетонных слоев в процессах накопления остаточных деформаций, происходящих под воздействием транспортных нагрузок и природно-климатических факторов.

Таким образом, наиболее полно свойства связных дорожно-строительных материалов можно определить при решении практических задач методами реологии при исследованиях развития деформаций во времени под воздействием динамических нагрузок.

### ***3.1 Особенности накопления деформаций в асфальтобетоне при различных режимах нагружения***

В напряженно-деформированном состоянии асфальтобетон проявляет ряд сложных свойств: упругость, пластичность, ползучесть, релаксацию напряжений, изменение прочности в зависимости от скорости деформирования, значения нагрузки, повторяемости нагрузки и т. д.

В дорожной конструкции асфальтобетонные слои работают в самых разнообразных условиях. При их лабораторных испытаниях встречаются следующие основные режимы нагружения: постоянная нагрузка, равномерно возрастающая нагрузка, деформирование с постоянной скоростью и циклический режим загрузки.

***Деформирование с постоянной скоростью*** часто применяется при испытаниях битумоминеральных материалов, в частности, при испытаниях на механических прессах (рисунок 8). Рост напряжения во времени для случая  $\varepsilon = Vt$  подчиняется уравнению:

$$\tau = VGt^{1-P} \quad (1.1)$$

где:  $V$ -скорость деформирования,  $G$ -модуль сдвига,  $P$ -нагрузка.

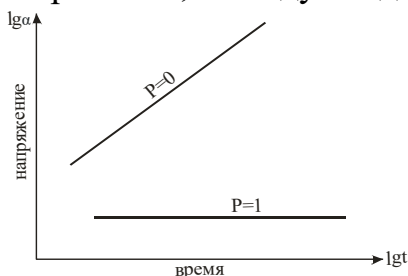


Рис. 8 - Зависимость напряжений от времени

***Равномерно возрастающая нагрузка*** также часто применяется при испытаниях битумоминеральных материалов. Характерная картина развития деформаций в битумоминеральном материале под действием равномерно

возрастающей нагрузки показана на рисунке 9 (линия 0-а).

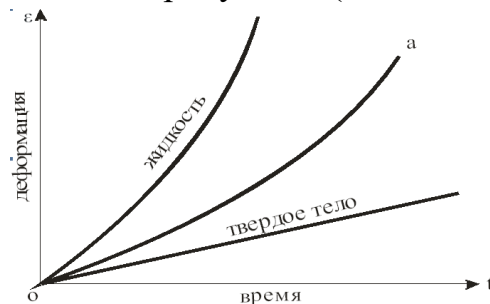


Рис. 9 - Зависимость деформации от времени

**Постоянная нагрузка** вызывает в битумоминеральном материале развитие деформаций во времени, что описывается уравнением (1.2):

$$\gamma = \frac{\tau}{G} tP \quad (1.2)$$

где  $\tau$  - напряжение,  $\gamma$  - градиент смещения,  $G$ -модуль сдвига,  $P$ -нагрузка.

Вид кривой  $\varepsilon(t)$ , представленной на рисунке 10, является характерным при испытаниях материала на растяжение, сдвиг, изгиб, сжатие. При этом численные значения реологических параметров, определенных при различных типах деформирования, могут быть различными.

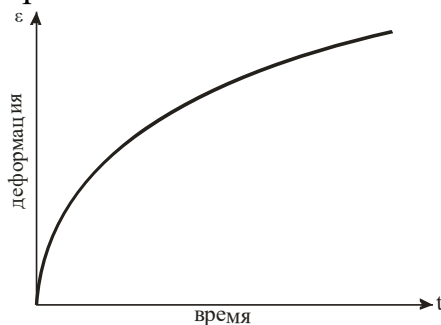


Рис. 10 - Зависимость деформации от времени

**Циклический режим загрузки** — применяется для имитации воздействия транспортного потока на битумоминеральный материал, работающий в составе дорожной конструкции. Наиболее распространенными вариантами циклического режима загрузки являются повторяющиеся нагрузки, меняющиеся по определенному закону. При таком режиме нагрузка возрастает до какой-то величины, а затем падает до нуля, либо до определенного минимального значения. Продолжительность загрузки обычно меньше, чем пауза между ними.

Циклический режим загрузки при испытаниях битумоминеральных материалов применяют для изучения процессов накопления пластических (остаточных) деформаций в условиях, имитирующих воздействия потока автотранспорта, а также для изучения процессов усталости.

Из всех вышеперечисленных методов циклический режим загрузки является наиболее приближенным к реальным условиям эксплуатации

автомобильной дороги.

## **Практическая работа № 2**

### **Предпосылки к испытаниям к испытаниям связных грунтов на устойчивость к колееобразованию**

Исследование устойчивости различных типов грунта земляного полотна к воздействию реальных динамических нагрузок и погодно-климатических факторов осуществляется в следующей последовательности:

- изготовление образцов из грунта;
- подготовка образцов к испытанию;
- испытание под воздействием динамических нагрузок.

#### **Изготовление образцов из грунта**

Оценка устойчивости грунтовых образцов на накопление остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок определяется на образцах, полученных уплотнением грунтов в стальных формах. Геометрические размеры образцов выбраны на основании проведенного анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), учитывающего потребность в минимизации размеров образцов с учетом обеспечения бокового обжатия из самого же материала.

Потребность в создании бокового обжатия самим материалом обусловлена необходимостью моделирования сил действующих на грунт земляного полотна в реальных условиях эксплуатации.

Одним из решений данного вопроса является обоснованное увеличение геометрических параметров экспериментальной модели.

С целью изучения возможных вариантов обоснованного назначения геометрических параметров исследуемых лабораторных образцов был выполнен ряд численных экспериментов по анализу НДС не только в области «активного» действия расчетной нагрузки, но и за ее пределами.

При анализе НДС грунтовых образцов, размеры штампа были приняты стандартных размеров 5см, 7см (рисунок 11) и 10см (рисунок 12) при расчетном давлении ( $p=0,1\text{МПа}$ ) и диаметре образца 20см. Установлено, что для грунтов, анализируемые модели обладают схожими данными по тангенциальным напряжениям ( $T_{xy}$ ), возникающими в плоскости действия прикладываемой нагрузки. Следовательно, ни у одной из предложенных моделей нет явных преимуществ относительно других. Однако, учитывая универсальность испытательного стенда и необходимость его применения для испытания различных дорожно-строительных материалов конструктивных слоев дорожных одежд (асфальтобетонов, щебеночных и гравийных смесей, укрепленных

неорганическими и комплексными вяжущими минеральных материалов и т.д.) окончательно был выбран вариант с диаметром штампа 10см.

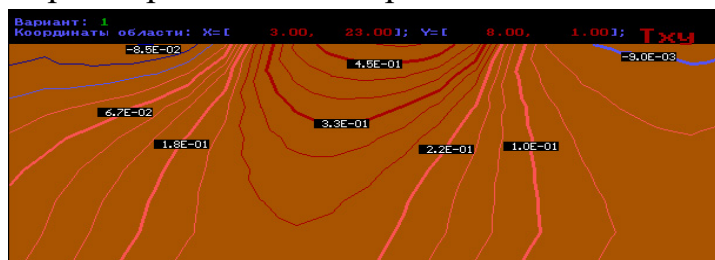


Рис. 11. Распределение тангенциальных напряжений в образце грунта диаметром 20см, высотой 7см и диаметром штампа 7см

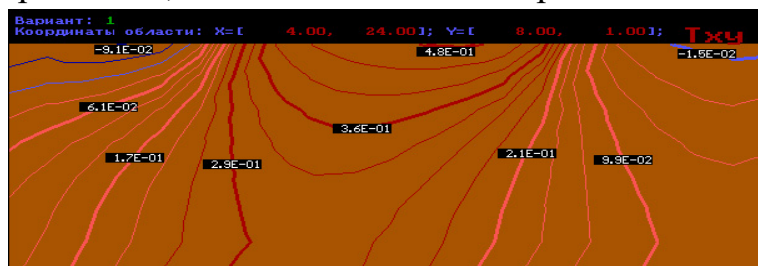


Рис. 12 Распределение тангенциальных напряжений в образце грунта диаметром 20см, высотой 7см и диаметром штампа 10см

Таким образом, проведенные математические расчеты позволили принять обоснованное решение при назначении геометрических характеристик экспериментальной модели, а именно образец диаметром 20см и штамп, посредством которого передается нагрузка диаметром 10см.

Формы для изготовления цилиндрических образцов представляют собой стальные цилиндры, которые могут изготавливаться в виде кассеты с тремя взаимосвязанными цилиндрическими формами диаметром 200 мм (рисунок 13).

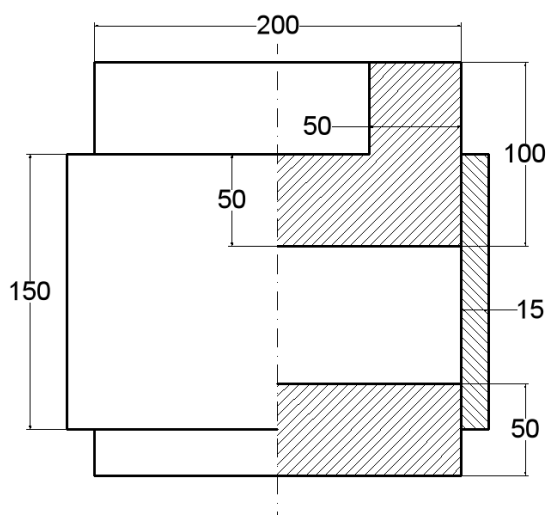


Рис. 13. - Форма для изготовления образцов

Формы изготавливаются из стали с механическими характеристиками не ниже соответствующих конструкционной стали Ст 35 по ГОСТ 1050-88.

На рабочих поверхностях форм, соприкасающихся с материалом, при изготовлении образцов не допускаются трещины, вмятины, риски и т.п. Шероховатость рабочих поверхностей R должна быть не более 3,2 мкм.

Допускаемые отклонения от номинальных размеров внутренних диаметров цилиндров и наружных диаметров вкладышей, должны обеспечивать зазор между цилиндром и вкладышем в пределах 0,1-0,5 мм.

Отклонение внутренней рабочей поверхности формы от цилиндрического профиля D не должно превышать 0,3 мм и рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2},$$

где  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  - соответственно максимальный и минимальный диаметры цилиндрической формы, мм.

Отклонение от плоскостности торцевых поверхностей вкладышей должно быть не более 0,05 мм.

Отклонение от перпендикулярности образующей цилиндрической поверхности вкладышей относительно поверхности их оснований должно быть не более 0,06 мм.

Образцы из исследуемых суглинистых и супесчаных грунтов изготавливались на прессе при оптимальной влажности. Для получения необходимого коэффициента уплотнения в форму помещалось различное и при этом необходимое количество увлажненного грунта. Прессование осуществлялось до придания необходимой высоты образцов 7 см (см. Рисунок 14).



Рис. 14. Грунтовый образец

Далее образцы взвешивались, замерялись их геометрические размеры для определения объема и проверки плотности скелета грунта.

### **Подготовка образцов к испытанию**

Подготовка образцов к испытанию начиналась с визуального осмотра. Торцевые поверхности образцов цилиндров предназначенные для приложения нагрузки должны быть максимально параллельны, отклонение от параллельности не должно превышать 1 мм на 10 см.



С целью моделирования естественного процесса водонасыщения грунта земляного полотна в реальных условиях эксплуатации образцы, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, подвергались капиллярному водонасыщению.

Для экспериментальных исследований были отобраны наиболее характерные для IV и V дорожно-климатических зон суглинистые и супесчаные грунты. Образцы суглинистого грунта, сформованные при оптимальной влажности с различными коэффициентами уплотнения: 0,98; 1,01 и 1,04 одновременно при равных условиях подвергались капиллярному водонасыщению до момента набора определенной влажности с целью последующего испытания на устойчивость к воздействию динамических нагрузок. Водонасыщение образцов проводилось через слой влажного песка при помощи устройства для капиллярного водонасыщения согласно ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства». Сосуд до определенного уровня заполнялся водой. Во время испытания поддерживался постоянный уровень воды в сосуде. В сосуд был установлен каркас с сетчатым дном, с предварительно уложенной на него фильтровальной бумагой. На фильтровальную бумагу был насыпан слой мелкого однородного песка и через сутки после его насыщения установлены образцы грунта. Через определенные промежутки времени образцы взвешивались.

Аналогичному водонасыщению подвергались и супесчаные образцы с коэффициентами уплотнения 0,98; 1,01; 1,04 сформованные при оптимальной влажности.

Водонасыщение образцов осуществлялось до момента набора ими заданного значения влажности. Далее образцы подготавливались к проведению испытания под воздействием динамической нагрузки.

С целью предотвращения потери влаги в ходе эксперимента грунтовые образцы, покрывались парафином слоем толщиной 1-2 мм (см. Рисунок 15).



Рис. 15. Грунтовый образец обработанный парафином  
Далее образцы помещали в стальную форму (рисунок 16).

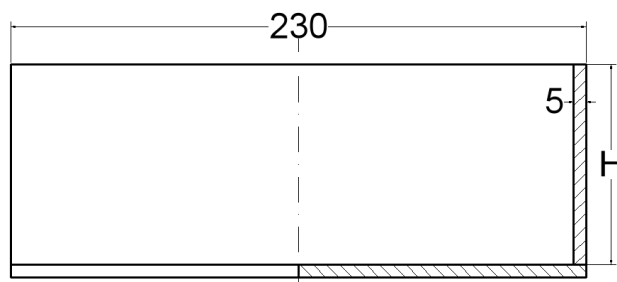


Рис. 16. Стальная форма для испытания образцов

Промежуток между стенками формы и образцом заполняли гипсовым раствором, а из участка непосредственного приложения нагрузки удалялся парафин, куда в свою очередь устанавливался штамп диаметром 10см (см. Рисунок 17). После застывания гипса форму с образцом размещали в установку динамического нагружения.



Рис. 17. - Грунтовый образец в стальной форме бокового обжатия с приложенным штампом

### **Испытание под воздействием динамических нагрузок**

Испытание под воздействием динамических нагрузок осуществляется на специально разработанном испытательном стенде, подробное описание которого представлено в п.3.

Подготовленный к испытанию образец в форме для бокового обжатия помещается на подъемный стол испытательного стенда.

По центру образца располагается штамп, который через стальной шарнир приводится в соприкосновение с толкателем.

В пружинном блоке производится заневоливание пружины до необходимой величины передаваемой на образец нагрузки, которая фиксируется датчиком силы.

На частотном регуляторе устанавливается необходимое число оборотов двигателя главного привода для передачи нагрузки с заданной частотой. Как уже отмечалось выше, проведенный анализ мониторинга интенсивности и состава движения показал, что большая часть грузового потока движется в интервале скоростей от 70 до 100 км/ч. При данной скорости движения многоосевых транспортных средств средняя частота нагрузки, передаваемой на точку на

поверхности конструкции, составляет порядка 15 Гц при среднем времени воздействия нагрузки 0,016с. Таким образом, предпочтительным выбором частоты для определения остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок является частота 15Гц. При этом общее число приложений нагрузок было принято 750000, что соответствует суммарному минимальному расчетному числу приложений расчетной нагрузки на наиболее нагруженную полосу для I технической категории автомобильной дороги согласно ОДН 218.046-01.

Далее включается электродвигатель и все контрольно-измерительное оборудование установки.

Замер остаточных и упругих деформаций производится в автоматическом режиме, запись данных осуществляется непосредственно на компьютер и в дальнейшем осуществляется обработка данных как в ручном, так и в автоматическом режиме.

### **Практическая работа № 3**

#### **Существующие методов расчета и конструирования нежестких дорожных одежд. Достоинства и недостатки.**

Актуальной проблемой отечественной дорожной отрасли является колееобразование вследствие накопления остаточных (пластических) деформаций в конструктивных слоях дорожной одежды и, особенно, рабочем слое грунта земляного полотна. Опыт эксплуатации автомобильных дорог и полевые исследования показывают, что накоплению остаточных деформаций и колееобразованию подвержены дорожные конструкции различных типов, включая одежды со слоями из материалов, укрепленных неорганическими вяжущими.

В процессе эксплуатации ровность покрытия в значительной степени изменяется вследствие накопления неравномерных остаточных деформаций в грунте земляного полотна и в конструктивных слоях дорожной одежды.

При воздействии нагрузки от транспортных средств и природно-климатических факторов грунт земляного полотна особенно подвержен накоплению остаточных деформаций в системе «дорожная одежда – земляное полотно», что в значительной степени определяет работоспособность всей дорожной конструкции.

Одним из основных факторов, способствующих ухудшению эксплуатационного состояния автомобильной дороги, является развитие неровности. С точки зрения механики неровность обусловлена накоплением неравномерно распределенных необратимых деформаций в различных слоях дорожной конструкции. Этот процесс наблюдается в течение достаточно

длительного промежутка времени, так как разовые воздействия транспортных средств, как правило, не приводят к образованию зон необратимых деформаций.

Не менее важным фактором, оказывающим существенное влияние на эксплуатационное состояние автомобильной дороги, является ее температурно-влажностный режим. Влияние температуры и влажности сказывается прежде всего в изменении феноменологических характеристик материалов слоев дорожной конструкции. С повышением температуры существенно снижаются деформационные и прочностные характеристики слоев из органико-минеральных смесей. Отрицательные температуры могут приводить к замерзанию влаги в грунтовом массиве и изменению его физико-механических свойств. Повышенная влажность подстилающих слоев грунта снижает как его прочностные и деформационные характеристики, так и существенно изменяет его реологические и динамические свойства. При повышенной влажности грунта происходит резкое, «провальное» снижение его прочностных и деформационных характеристик.

Интенсивное накопление пластических деформаций в конструктивных элементах дорожной одежды и в грунте земляного полотна приводит к нарушению ровности поверхности дороги в продольном и поперечном направлениях, что, в свою очередь, способствует значительному росту динамических воздействий и ускоренному образованию деформаций и разрушений различных форм и размеров. Отсюда следует, что исходная расчетная схема и методика ее использования недостаточно учитывают упруго-вязко-пластические свойства грунтов и материалов дорожной одежды, проявляющиеся при воздействии многократных кратковременных нагрузок.

Вследствие этого, исследования, направленные на совершенствование методики проектирования дорожных одежд нежесткого типа, остаются весьма актуальными не только в России, но и за рубежом. Причем эти исследования не должны ограничиваться лишь модернизацией расчетной базы, а развиваться в направлении конструирования дорожных одежд. Такой подход подразумевает выработку окончательного решения и с учетом материаловедческих факторов.

Первые схемы для определения толщины дорожных одежд появились в начале XX века применительно к расчету на воздействие нагрузки от гужевого транспорта и базировались на предположении о равномерном распределении напряжений по поверхности основания и грунта земляного полотна. Вычисленное давление сравнивали с допускаемым для данного грунта. Эти упрощенные схемы не были обоснованы ни физически, ни экспериментально и представляют в настоящее время лишь исторический интерес.

Важным вкладом в развитии основ теории расчета дорожных одежд явились исследования коллектива отечественных специалистов, работавших с

1926 г. под руководством Н.Н. Иванова. В конце тридцатых годов XX века В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, А.А. Иноземцев, Г.И. Покровский, а также А.М. Кривисский, М.Б. Корсунский исследовали широкий круг вопросов, связанных с закономерностями распределения напряжений в грунте земляного полотна под дорожной одеждой. Измеренные экспериментально напряжения сравнивали с вычисленными по формуле, полученной в 1885 г. французским ученым Ж. Буссинеском для однородного упругого полупространства, на граничной поверхности которого приложена сосредоточенная или распределенная вертикальная нагрузка. Слоистость дорожных одежд учитывалась коэффициентом концентрации напряжений, предложенным Н.Н. Ивановым, либо приведением вышележащих слоев к материалу нижнего слоя по формулам Г.И. Покровского и М.И. Якунина.

Таким путем были найдены полуэмпирические зависимости, позволявшие приближенно вычислять вертикальные нормальные напряжения и вертикальные перемещения по оси действующей нагрузки, равномерно распределенной по площади круга. Эти формулы послужили основой для созданного и в 1943 г. опубликованного Н.Н. Ивановым и А.М. Кривисским метода расчета дорожных одежд нежесткого типа ("Метод Союздорнии"), в котором в качестве критерия предельного состояния было принято максимальное вертикальное перемещение поверхности покрытия. Этот метод имел несомненные преимущества перед существовавшими в то время зарубежными методами расчета благодаря тому, что был четко сформулирован критерий предельного состояния и предложены достаточно объективные характеристики грунтов и материалов слоев дорожной одежды.

В теоретическом плане требует пересмотра прежде всего гипотеза работы дорожной конструкции в чисто упругой стадии. Опыт эксплуатации автомобильных дорог показывает, что под воздействием многократно повторяющихся нагрузок подвижного состава (особенно сверхнормативных - в последние годы) в дорожной конструкции возникают не только упругие, но и интенсивно развиваются (в том числе и на ранней стадии эксплуатации дороги) микропластические деформации, приводящие к непрерывному накоплению остаточных деформаций. Отсюда следует, что методика расчета нежестких дорожных одежд должна учитывать и естественно прогнозировать не только упругие, но и пластические деформации.

Следует отметить, что при конструировании и расчете нежестких дорожных одежд по действующим нормативным документам не учитывается «старение» материала, т.е. не рассматривается изменение заданных физико-механических характеристик материалов конструктивных слоев и их расчетные параметры принимаются постоянными на весь срок эксплуатации автодороги. Правда,

некоторые вопросы теории неоднородности плит применительно к асфальтобетонным покрытиям с переменным модулем упругости по толщине конструктивного слоя частично рассматривались О.Т. Батраковым, В.П. Плевако, Н.А. Медведковой, А.Е. Мерзликиным применительно к расчету грунтовых оснований.

Ю.М. Васильевым предложена методика напряженно-деформированного состояния дорожных одежд, учитывающая свойства цементогрунта как анизотропного нелинейно упругого материала.

Метод расчета дорожных одежд по ОДН 218.046-01 обобщает результаты исследований многих отечественных ученых-дорожников, учитывает зарубежный опыт и значительно более прогрессивен по сравнению с применявшимися ранее методами. Однако с современных позиций ничем не оправдано стремление к упрощению вычислительного процесса при расчете дорожных одежд. Если при разработке всех предшествующих методов их создатели вынуждены были заведомо, в ущерб точности расчетов, ориентироваться на простейшие вычислительные операции, то такой подход в наше время вряд ли можно признать рациональным. Только за счет приведения многослойных дорожных одежд к трехслойным с целью использования номограмм погрешность вычисления может составлять: по упругому прогибу поверхности покрытия до 25%; по растягивающим напряжениям в покрытии и сдвигу в грунте земляного полотна - до 20%. Современный же уровень развития средств вычислительной техники и высоких технологий, предоставляет широкие возможности проведения автоматизированных, высокоточных расчетов с имитацией различных сочетаний погодно-климатических факторов и эксплуатационных особенностей. Под сочетанием эксплуатационных особенностей следует понимать: изменение интенсивности движения, изменение состава движения (масса автомобиля), переменные скоростные режимы и особенности воздействия различных видов автомобилей (габариты, количество осей).

Передовой метод прогнозирования накопления остаточных деформаций, предложенный В.П. Матуа и Л.Н. Панасюком позволяет получать полную информацию о развитии неровности (деформации) как на поверхности покрытия так и на необходимой глубине в грунте земляного полотна. Сущность метода заключается в учете упруго-вязко-пластических свойств грунтов и материалов конструктивных слоев дорожной одежды, проявляющихся при воздействии многократных кратковременных нагрузок, инерционности движущейся массы и осности автомобиля, а также влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) конечных поперечных размеров автомобильной дороги и места расположения нагрузки на проезжей части.

В соответствии с разработанной методикой расчет дорожной конструкции выполняется в два этапа:

- на первом этапе производится расчет и конструирование дорожной одежды нежесткого типа в соответствии с ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» и предусматривает расчет конструкции по допускаемому упругому прогибу, расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев, расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе. При необходимости проводится проверка дорожной конструкции на морозоустойчивость и проектируются устройства по ее осушению.

- на втором этапе производится проверка дорожной конструкции на накопление остаточных деформаций в ее элементах при комплексном воздействии пространственных динамических нагрузок и погодноклиматических факторов.

Прогнозирование накопления остаточных деформаций осуществляется с помощью разработанной механико-математической модели, адекватно описывающей реальное строение и динамический характер нагружения анизотропной и многослойной дорожной конструкции, позволяющей рассматривать задачу в пространственной постановке.

Следующим шагом на пути учета фактических механических свойств материалов дорожной одежды должен быть переход к расчетной схеме упругопластического или упруговязкопластического слоистого полупространства.

В ряде зарубежных стран давно уже отказались от такого критерия предельного состояния дорожной одежды, как максимальный упругий прогиб. Как отмечается в работе В.П. Матуа: «Целесообразно на новом научном уровне вернуться к такому критерию как накопленные остаточные вертикальные перемещения поверхности покрытия, что в свою очередь обусловлено появлением деформаций в каждом элементе дорожной конструкции. Назрела острая необходимость поставить и решить задачу о слоистой упруговязкопластичной анизотропной среде, подвергаемой действию повторных динамических нагрузок, погодноклиматических и грунтово-геологических факторов, что позволило бы прогнозировать работу дорожной конструкции в реальных условиях эксплуатации дороги».

Современными учеными А.П. Васильевым, А.В. Руденским и Ю.М. Яковлевым разработана принципиально новая методика расчета нежестких дорожных одежд, отличительной особенностью которой является, прежде всего, определение требуемого модуля упругости дорожной конструкции не по

среднесуточной перспективной интенсивности движения (как это было предусмотрено в ВСН 46-83), а по суммарному количеству проходов автомобилей за срок службы дорожной одежды. Методика предназначена для расчета и прогнозирования колееобразования на нежестких дорожных одеждах вследствие накопления остаточных деформаций в грунте земляного полотна, слоях основания и покрытия, а также структурного разрушения каменного материала. Под их руководством, с учетом исследований Н.Я. Хархуты, А.М. Кривисского, М.Б. Корсунского, В.Д. Казарновского и экспериментов, осуществленных на ряде дорог России, в МАДИ (ТУ), З.А. Мавлидиновым, С.Ю. Каныгиной, М.Г. Горячевым, В.Б. Фадеевым, Жустаревой Е.В. и др., разработаны механико-математические модели, описывающие процессы неравномерного пластического деформирования грунта земляного полотна под дорожной одеждой в результате воздействия многократно повторяющихся нагрузок от движущихся автомобилей.

Так, например, С.Ю. Каныгиной обоснована зависимость величины остаточной деформации глинистых грунтов от суммарного времени действия активных касательных напряжений, их величины и консистенции грунта. Установлено на примере суглинка песчанистого, что наибольшее влияние на величину остаточной деформации оказывает величина коэффициента консистенции грунта земляного полотна и меньшее влияние оказывает изменение активных касательных напряжений. Результаты прогнозирования поведения грунта во многом совпадают с результатами полевых экспериментов, проведенных З.А. Мавлидиновым.

Е.В. Жустаревой предложена методика обоснования необходимой степени уплотнения связного грунта в рабочем слое земляного полотна с позиции ограничения величины и интенсивности накопления остаточной деформации. Экспериментально установлено влияние плотности связного грунта на характер накопления и величину остаточных деформаций.

В.Б. Фадеевым в результате проведенных исследований предложены рекомендации для учета остаточных деформаций при проектировании, а именно, указания по применению необходимого типа грунта или мероприятий по приданию грунтам необходимых физико-механических характеристик. Автором под руководством профессора М.С. Коганзона разработана методика прогнозирования глубины колеи, возникающей на поверхности дорожной одежды нежесткого типа, в зависимости от неупругих свойств грунта земляного полотна, суммарного времени действия активных касательных напряжений, их величины и консистенции грунта, с учетом влияния распределения проходов автомобилей по ширине полосы движения.



Однако выше перечисленными авторами не выявлено поведение грунта в реальных условиях эксплуатации, а именно в существующих дорожных конструкциях при реальном динамическом воздействии автотранспортных средств и погодно климатических факторов. Отсутствуют сведения о вкладе грунта в общую величину остаточных деформаций, проявляющихся на поверхности дорожных покрытий. В связи с этим становится очевидно, что проблемы инженерных исследований деформированного состояния существующих дорожных конструкций должны решаться с применением современных средств и методов в течение всего срока эксплуатации автомобильной дороги.

Следует заметить что, развитие неровности в дорожной конструкции в продольном и, особенно в поперечном направлении, в том числе колеобразование является следствием целого ряда причин. Накопление необратимых остаточных деформации может возникать и развиваться в различных соотношениях как в земляном полотне, так и в дорожной одежде. Деформации, проявляющиеся лишь на поверхности проезжей части, например, колея, может быть результатом перемещений как в слоях дорожной одежды так и в земляном полотне. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо выполнить глубокий анализ кинетики накопления остаточных деформаций, чтобы найти правильное решение по их устранению или предупреждению.

Значительным вкладом в методику расчета дорожных конструкций с произвольной в плане и по глубине "геометрией", учитывающей различные граничные условия, неоднородность материалов слоев и грунта земляного полотна, включение дополнительных конструктивных элементов являются работы С.К. Илиополова, М.Г. Селезнева, Е.В. Угловой, А.В. Смирнова.

Ими разработана "базисная" механико-математическая модель, адекватно описывающая реальное строение дорожной конструкции и пространственный характер ее нагружения. Построен новый метод и математический аппарат исследования краевой задачи для сложных областей в пространственной постановке. Выявлены условия и причины генерации наиболее опасных, с точки зрения зарождения и развития разрушений, в элементах дорожных конструкций при реальном динамическом воздействии подвижного состава с количественной и качественной оценкой связанного с этим пространственного напряженно-деформированного состояния.

Таким образом, на основании проведенного детального анализа литературных источников можно заключить, что разработанные к настоящему времени механико-математические модели по оценке напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций и учету накопления в их элементах остаточных деформаций не вполне адекватно отражают реальный

пространственный характер нагружения нежестких дорожных одежд движущимися автомобилями.

При расчете дорожных одежд не учитываются также неадекватно изменяющиеся во времени и по глубине конструкции физико-механические свойства материалов слоев и силы их реального межслойного сцепления, которые в свою очередь также требуют уточнения.

В малой степени изучено поведение слоев дорожной конструкции в реальных условиях эксплуатации, в том числе слоев, скрытых от визуальной оценки. Слабо развиты методы и средства наблюдения за деформированным состоянием системы «дорожная одежда – грунт». Отсутствуют приборы, позволяющие исследовать кинетику накопления остаточных деформаций послойно с учетом многих влияющих факторов:

циклично (время года) меняющейся температуры каждого слоя отдельно;  
влажности рабочего слоя грунта земляного полотна;  
износа слоя покрытия;

изменяющейся во времени способности динамического сопротивления дорожной конструкции в целом.

#### **Практическая работа № 4**

##### **Прогрессивные методы расчета дорожных конструкций с учетом упруговязкопластичных свойств дорожно-строительных материалов**

Требуется реконструкция существующей магистральной автомобильной дороги М4 «ДОН» на участке км 982+000-км1000+000 в Ростовской области, I технической категории в IV дорожно-климатической зоне. Заданный срок службы дорожной одежды 15 лет.

1-ый вариант конструкции автомобильной дороги:

1. Асфальтобетон плотный на битуме марки БНД 60/90, толщиной  $h = 5$  см.
2. Асфальтобетон пористый на битуме марки БНД 60/90, толщиной  $h = 7$  см.
3. Асфальтобетон пористый на битуме марки БНД 60/90, толщиной  $h = 8$  см.
4. Щебень, устроенный по способу заклинки, толщиной  $h = 25$  см.
5. Щебень рядовой, толщиной  $h = 33$  см.

Исходя из перспективной интенсивности и состава движения требуемый модуль упругости составляет 251 МПа.

Необходимо выполнить расчет по прогнозированию накопления остаточных деформаций на поверхности дорожного покрытия под комплексным воздействием погодно-климатических и динамических факторов в реальных условиях эксплуатации дороги.

На основании исходных данных о среднечасовой интенсивности и состава движения по различным группам автомобилей (по грузоподъемности, осности,

осевой нагрузки) с учетом среднегодового темпа их прироста были определены характеристики транспортного потока:

- прогнозируемая интенсивность движения;
- распределение по полосам движения;
- распределение по составу движения;
- распределение по скоростным интервалам

Результаты выполненных расчетов распределения интенсивности и состава транспортного потока по полосам движения (в прямом и обратном направлениях) на 1-ый год эксплуатации дороги представлены в табл. 1.1- 1.4.

Таблица 1.1

Часовая интенс ивность движен ия	Количество автомобилей, шт., в интервале скоростей, км/ч																	
	сего	-10	1-20	1-30	1-40	1-50	1-60	1-70	1-80	1-90	1-100	01- 110	11- 120	21- 130	31- 140	41- 150	51- 160	61- 170
Правая попутная полоса движения																		
Грузовые	08	0	7	1	6	0	6	3										
Легкие	2				4	5	1											
Средние	1																	
Тяжелые	2																	
Очень тяжелые	3			4	0	2	6											
Автобу сы	6																	
Малой																		
Средне й	3																	
Большо й																		
Легков ые	76	5	4	0	1	4	9	7	6	5	9							
ВСЕГ О	00	5	2	2	10	38	39	12	0	7	9							

Таблица 1.2

Часовая интенсивность движения	Количество автомобилей, шт., в интервале скоростей, км/ч																	
	сего	-10	1-20	1-30	1-40	1-50	1-60	1-70	1-80	1-90	1-100	01-110	11-120	21-130	31-140	41-150	51-160	61-170
Левая попутная полоса движения																		
<b>Грузовые</b>	<b>7</b>																	
Легкие																		
Средние																		
Тяжелые																		
Очень тяжелые																		
<b>Автобусы</b>																		
Малой																		
Средней																		
Большой																		
<b>Легковые</b>	<b>24</b>				<b>3</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0</b>								
<b>ВСЕГО</b>	<b>43</b>			<b>1</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>0</b>								

Таблица 1.3

Часовая интенсивность движения	Количество автомобилей, шт., в интервале скоростей, км/ч																	
	сего	-10	1-20	1-30	1-40	1-50	1-60	1-70	1-80	1-90	1-100	01-110	11-120	21-130	31-140	41-150	51-160	61-170
Левая встречная полоса движения																		
<b>Грузовые</b>	<b>7</b>																	
Легкие																		
Средние																		
Тяжелые																		

Очень тяжелые																	
Автобусы																	
Малой																	
Средней																	
Большой																	
Легковые	19					3	8	1	0	5							
ВСЕГО	38				2	8	4	4	1	5							

Таблица 1.4

Часовая интенсивность движения	Количество автомобилей, шт., в интервале скоростей, км/ч																	
	сего	-10	1-20	1-30	1-40	1-50	1-60	1-70	1-80	1-90	1-100	01-110	11-120	21-130	31-140	41-150	51-160	61-170
Правая встречная полоса движения																		
Грузовые	67			8	9	0	8	2										
Легкие	1					2	1											
Средние	6																	
Тяжелые	5																	
Очень тяжелые	5				3	8	7	0										
Автобусы	2																	
Малой																		
Средней	1																	
Большой																		
Легковые	54	0	1	0	3	0	8	9	6	8	3	3						
ВСЕГО	33	3	0	9	3	2	09	03	3	1	4	3						

Полученные данные используются в дальнейшем при расчете динамических задач для определения приведенной квазистатической нагрузки. Для каждой

полосы движения, типа транспортного средства и скоростного интервала решается отдельная динамическая задача.

### **Определение квазистатической нагрузки посредством решения комплекса динамических задач.**

#### *Условия выполненных расчетов*

Расчеты проведены в пространственной постановке фрагмента автомобильной дороги длиной 30 м, реальной ее ширины и глубиной от поверхности покрытия до 10 м. Рассматривалось движение различных автомобилей, как в свободном режиме одиночного автомобиля, так и в плотном режиме при их движении в колонне с соблюдением дистанции 5, 10, 15, 20 и 25 м.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов дорожной конструкции во времени определялось не только в плоскости сечения под передними, средними или задними колесами движущегося автомобиля, но и по всей прилегающей области. Для этого исследовалось НДС в продольном и поперечном сечении дороги через каждые 0,5 м (ряды).

#### *Решение динамических задач*

Решение динамических задач позволяет определить вертикальные перемещения поверхности дорожного покрытия от расчетных нагрузок движущегося транспорта. Расчет проводится для всех типов расчетных автомобилей, движущихся с различными скоростями на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части. Все расчеты не зависимо от скорости движения автомобилей выполнены с шагом интегрирования 0,01с.

Для наглядности в качестве примера на рисунках 18 - 23 приведены эпюры вертикальных перемещений фиксированного сечения поверхности дорожного покрытия конструкции, укрепленной методом холодного ресайклинга, во времени до и после наезда на него легкового автомобиля, автобуса и тяжелого грузового автомобиля, движущихся со скоростью 40 и 120км/ч.

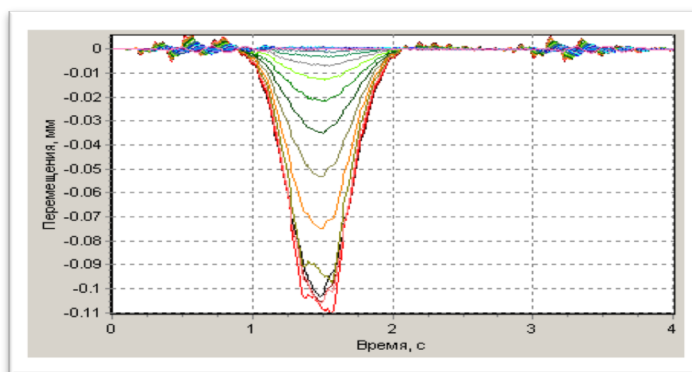


Рис. 18 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении легкового автомобиля со скоростью 40 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

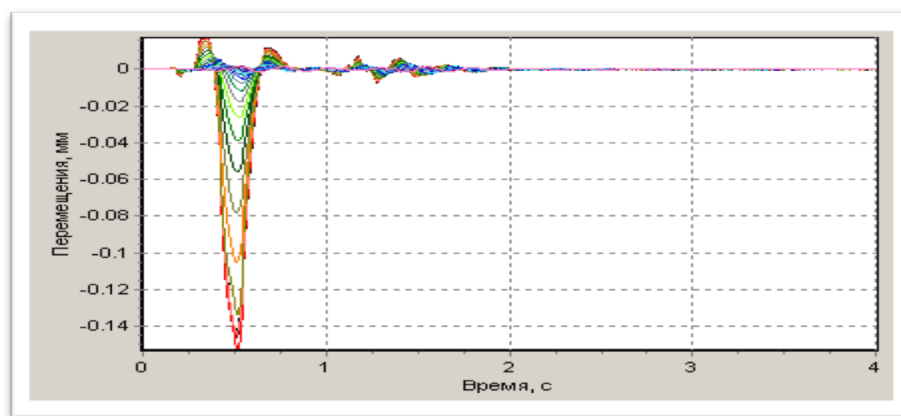


Рис. 19 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении легкового автомобиля со скоростью 120 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

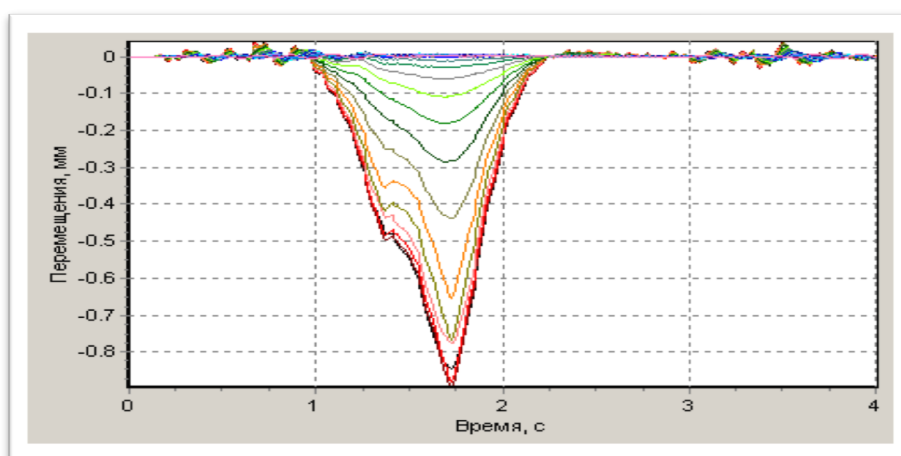


Рис. 20 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении автобуса средней вместимости со скоростью 40 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

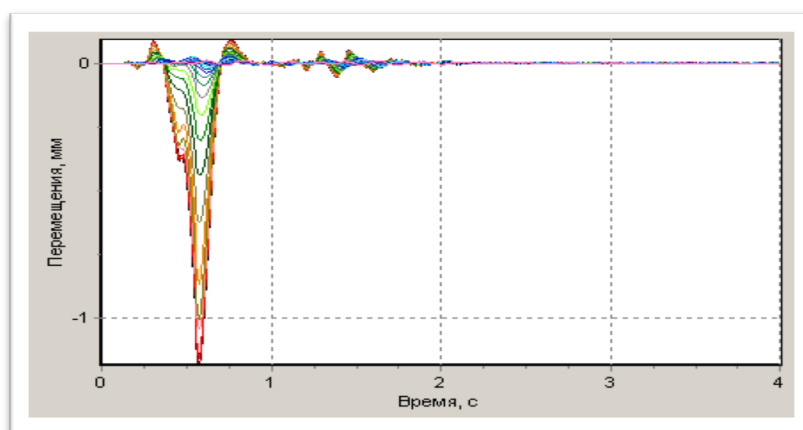


Рис. 21 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении автобуса средней вместимости со скоростью 120 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

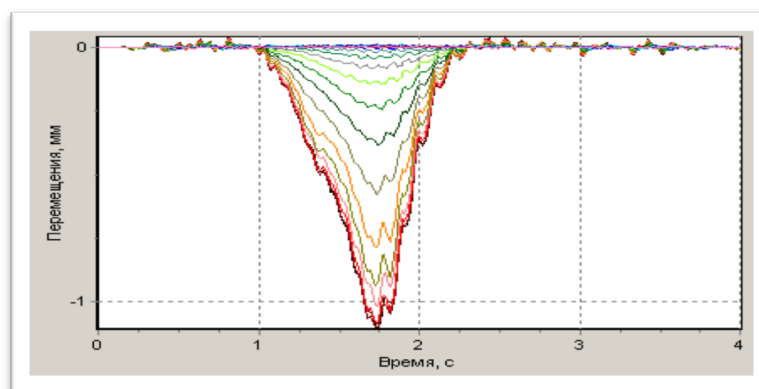


Рис. 22 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении очень тяжелого грузового автомобиля со скоростью 40 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

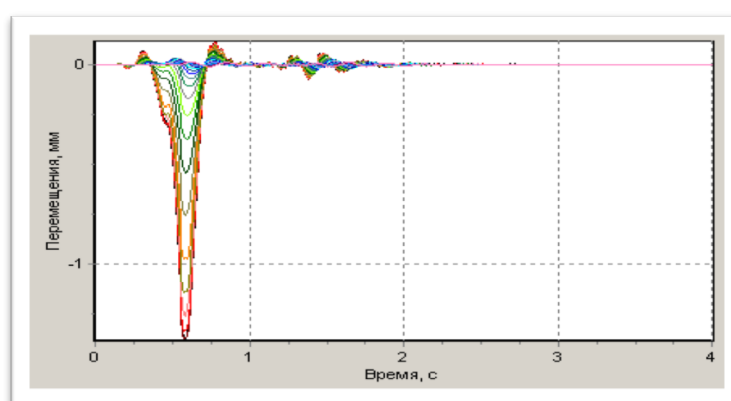


Рис. 23 - Вертикальные перемещения поверхности покрытия при движении очень тяжелого грузового автомобиля со скоростью 120 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части

Анализ приведенных на рисунках 24 – 29 результатов показывает, что с увеличением скорости движения автомобилей всех марок, синхронно увеличиваются динамические прогибы покрытия. Кроме того, во всех случаях отмечается выпор поверхности покрытия перед передними и задними колесами движущегося автомобиля, причем, чем выше скорость, тем выше его значение.

Полученные динамические решения являются базовыми для определения приведенной квазистатической нагрузки при расчете на длительное воздействие.

#### ***Определение приведенной квазистатической нагрузки от одного транспортного средства***

На третьем этапе определяется приведенная квазистатическая нагрузка от одного транспортного средства на расчетный период времени (1 час).

Следует отметить, что эти нагрузки строятся для каждого типа воздействия, включающего вид автомобиля, скорость движения и его положение на проезжей части



Так для некоторых типов воздействий ниже показаны примеры приведенных квазистатических нагрузок:

- рис. 1.30 – для легкового автомобиля, движущегося со скоростью 40 км/ч на расстоянии 0,5 м от кромки проезжей части;
- рис. 1.31 – то же со скоростью 120 км/ч;
- рис. 1.32 – для автобуса средней вместимости, движущегося со скоростью 40 км/ч;
- рис. 1.33 – то же со скоростью 120 км/ч;
- рис. 1.34 – для очень тяжелого грузового автомобиля, движущегося со скоростью 40 км/ч;
- рис. 1.35 – то же со скоростью 120 км/ч;

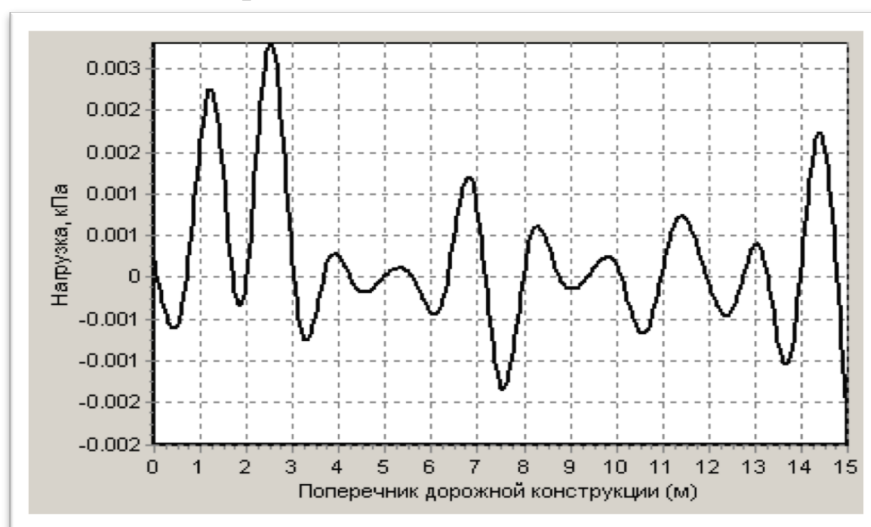


Рис. 24 - Приведенная квазистатическая нагрузка

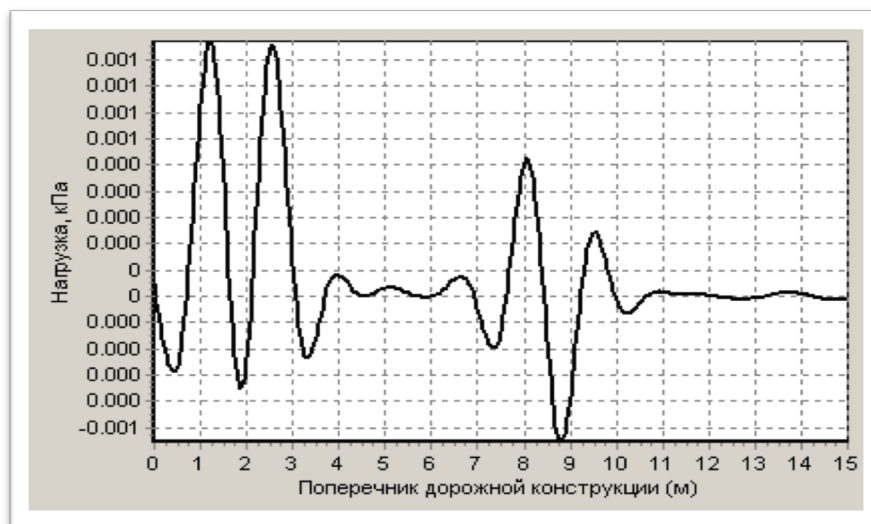


Рис. 25 - Приведенная квазистатическая нагрузка

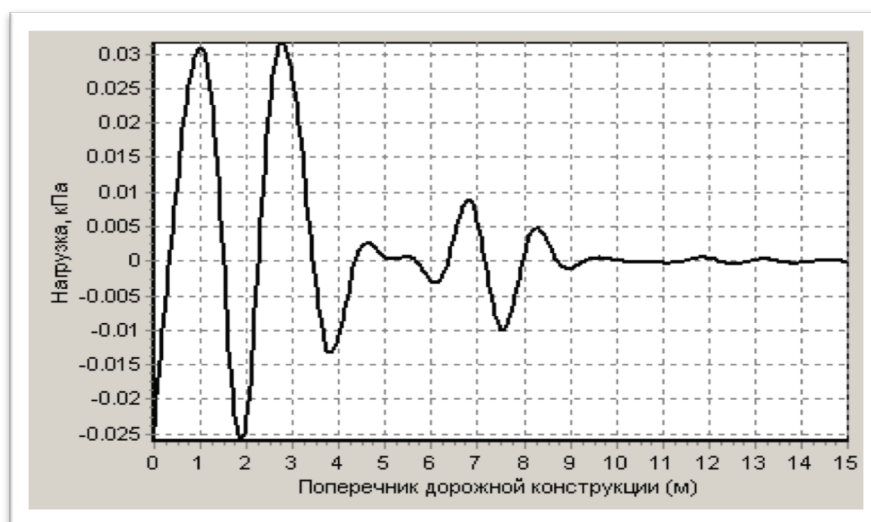


Рис. 26 - Приведенная квазистатическая нагрузка

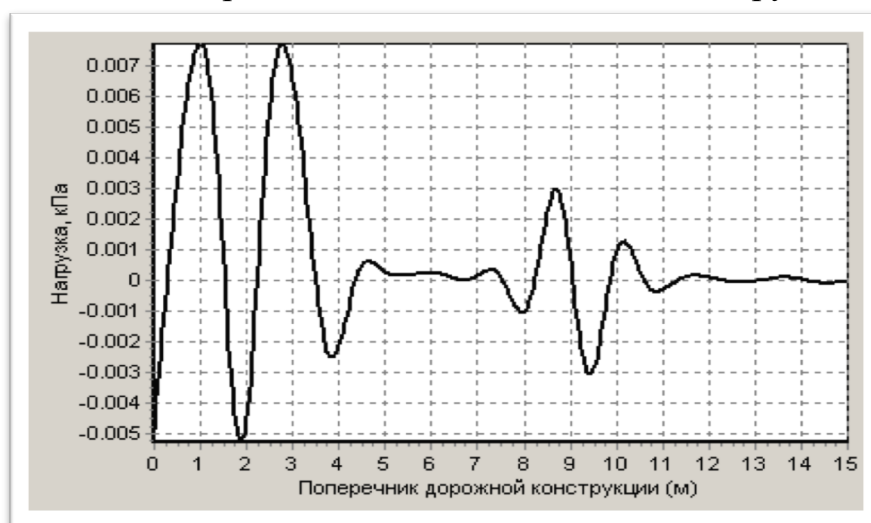


Рис. 27 - Приведенная квазистатическая нагрузка

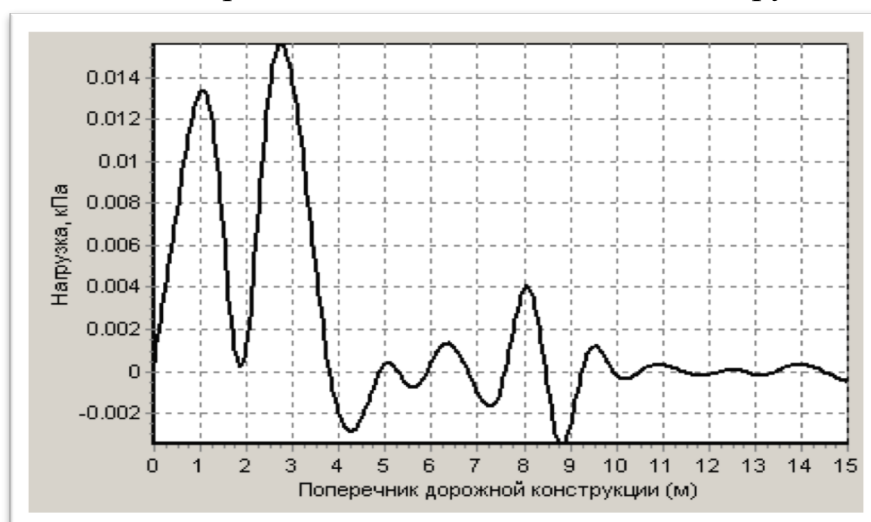


Рис. 28 - Приведенная квазистатическая нагрузка



Рис. 29 - Приведенная квазистатическая нагрузка

Анализ полученных зависимостей показывает, что по мере увеличения скорости движения автомобилей приведенная квазистатическая нагрузка снижается. Кроме того, во всех случаях отмечается зона смены знака приведенной нагрузки между колесами автомобиля, что приводит к появлению нежелательных растягивающих напряжений, способствующих потере контакта в конструктивных слоях и образованию продольных и поперечных трещин.

#### ***Определение суммарной приведенной квазистатической нагрузки***

На последнем этапе определения приведенной нагрузки производится суммирование построенных функций в соответствии со статистической информацией о фактической и перспективной интенсивности и состава движения. По статистическим данным определяется сколько и каких автомобилей, с какой скоростью, на каком расстоянии от края дороги проследует за расчетный час, и согласно этим данным, суммируют функции распределения приведенных квазистатических нагрузок.

Имея достаточную статистическую информацию, можно дифференцировать грузопоток в различное время суток и года.

С учетом времени суток в расчетах приняты два вида транспортного потока, условно названные нами потоками с «высокой» интенсивностью движения (в дневное время с 8 до 20 часов) и «низкой» интенсивностью движения (в ночное время с 20 часов вечера до 8 часов утра).

Ниже на рисунках 30 – 35 показаны суммарные приведенные нагрузки по ширине проезжей части от всех транспортных средств, включенных в состав потока за периоды с «высокой» и «низкой» интенсивностью движения.

Анализ приведенных результатов показывает, что значения суммарных приведенных нагрузок («ответственных» за накопление необратимых (остаточных) перемещений в элементах дорожных конструкций), как и следовало ожидать, в дневное время суток в 5-6 раз выше аналогичных

показателей в ночное время. Кроме того, по мере роста интенсивности движения в процессе эксплуатации дороги пропорционально возрастают и значения суммарных приведенных нагрузок (на 10% к 6 году эксплуатации дороги и на 20% к 10 году эксплуатации дороги).

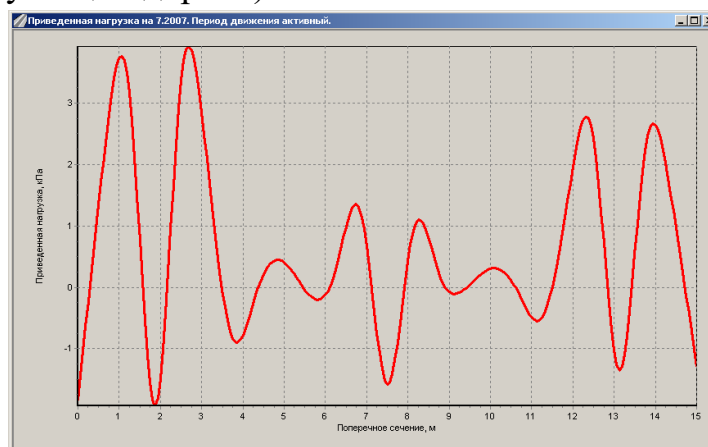


Рис. 30 - Суммарная приведенная нагрузка

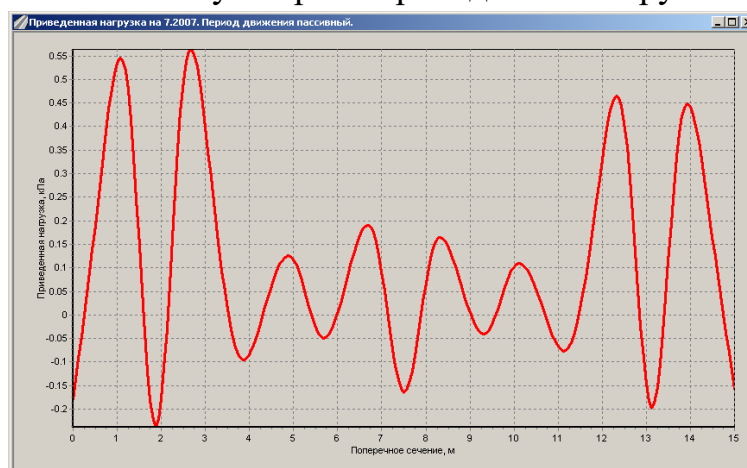


Рис. 31 - Суммарная приведенная нагрузка

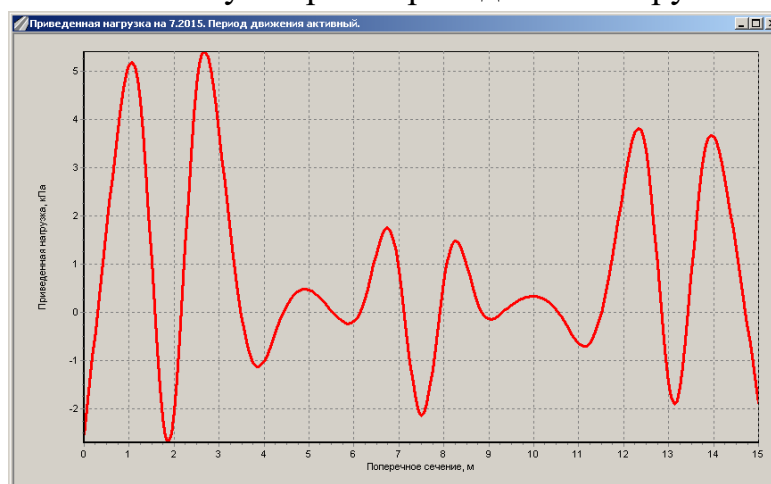


Рис. 32 - Суммарная приведенная нагрузка

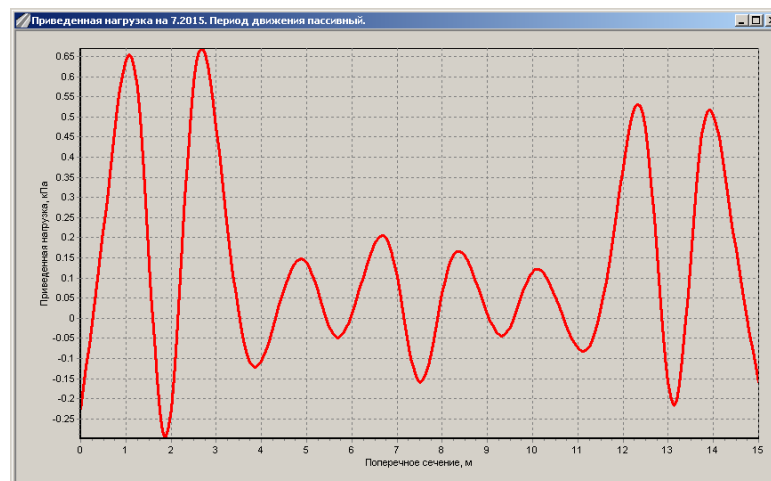


Рис. 33 - Суммарная приведенная нагрузка

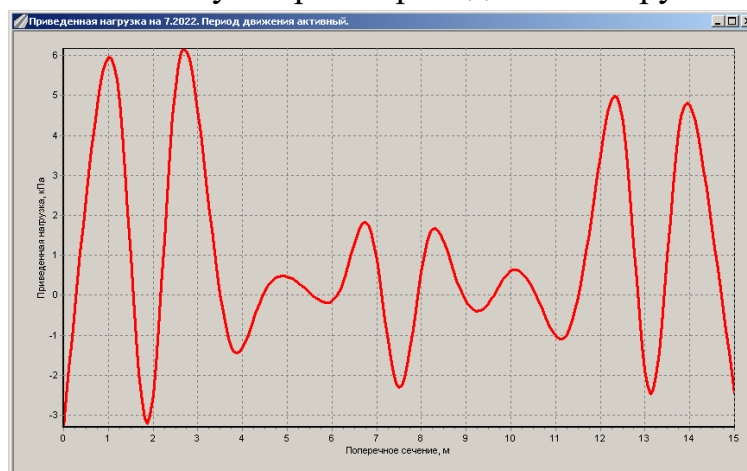


Рис. 34 - Суммарная приведенная нагрузка

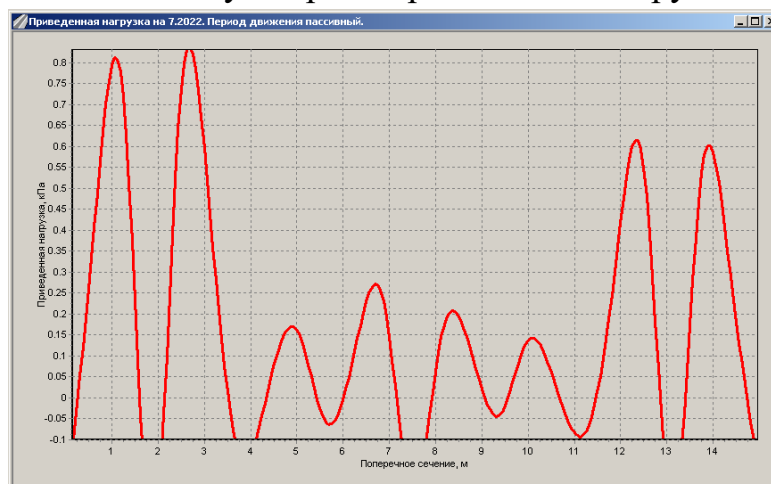


Рис. 35- Суммарная приведенная нагрузка

### ***Прогнозирование накопления остаточных деформаций.***

Окончательный этап расчета позволяет получить прогноз накопления остаточных деформаций и характер развития неровностей в элементах дорожной конструкции. Ниже приводятся максимальные расчетные значения необратимых вертикальных деформаций поверхности дорожного покрытия по внешней

полосе наката за 15 лет эксплуатации дороги с учетом воздействия погодноклиматических факторов и реальных динамических нагрузок (рисунок 36)

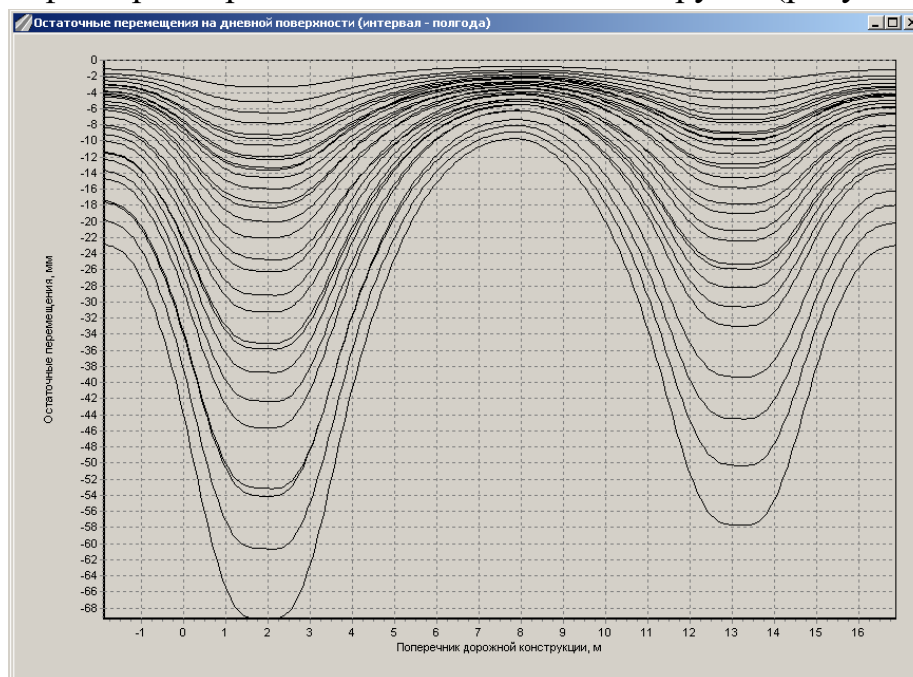


Рис. 36 - Значения необратимых вертикальных деформаций поверхности дорожного покрытия

Анализ приведенных на рисунке 36 результатов показывает, что накопление во времени максимальных остаточных деформаций на проезжей части, по абсолютной величине достигает предельно допустимых значений уже к концу 8-го года эксплуатации дороги. Из выше сказанного следует, что данная конструкция требует значительного пересмотра и изменения. В частности, было принято решение о частичной замене несвязного слоя из щебня на слой щебеночно-песчаной смеси, укрепленной цементом (тощий бетон) с маркой по прочности М75 и модулем упругости 850 МПа без изменения общего модуля упругости дорожной конструкции.

Для измененной конструкции был проведен аналогичный предыдущему расчет в результате которого были определены вертикальные перемещения поверхности покрытия под воздействием движущихся расчетных автомобилей, приведенная квазистатическая нагрузка от одного транспортного средства на расчетный период времени  $T$  (1 час), а также максимальные расчетные значения необратимых вертикальных деформаций поверхности дорожного покрытия по внешней полосе наката за расчетный период времени (15 лет) с учетом воздействия погодноклиматических факторов и реальных динамических нагрузок. На рисунке 37 показан график накопления остаточных деформаций в измененной конструкции.

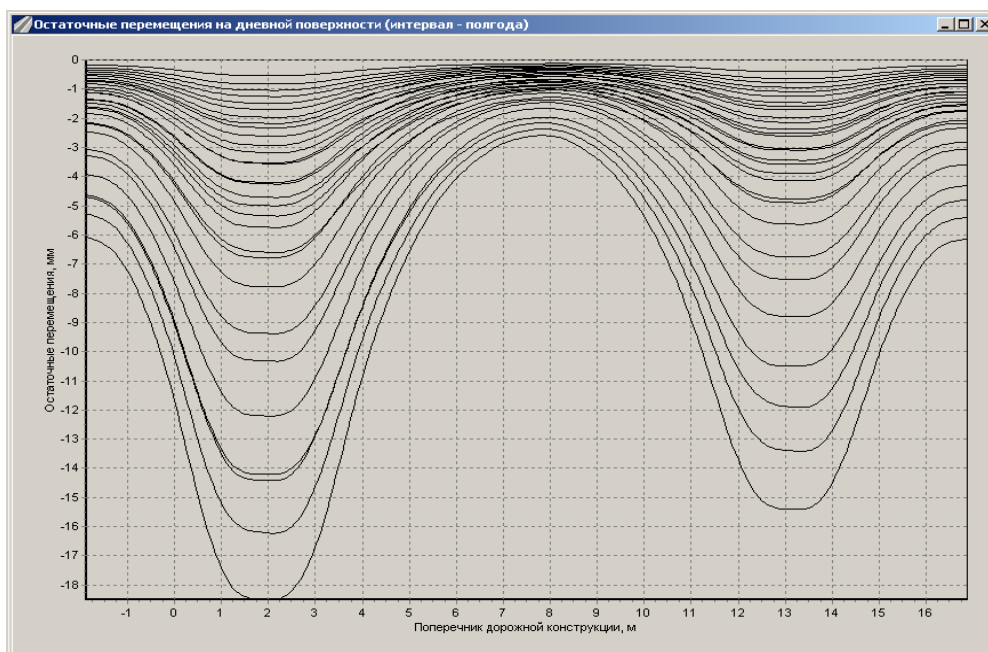


Рис. 37 - Значения необратимых вертикальных деформаций поверхности дорожного покрытия

Из данного графика видно, что остаточные деформации на поверхности покрытия к 15-му году службы не превышают 19 мм, что соответствует «Рекомендациям по выявлению и устранению колеи на жестких дорожных одеждах», утвержденных распоряжением Росавтодора № ОС-556-р от 24.06.2002 г.

Исходя из выше изложенного, в качестве окончательного варианта следует принять вариант дорожной одежды с применением слоя щебеночно-песчаной смеси, укрепленной цементом с маркой по прочности М75.

## Литература

1. Мирончук. С.А. Метод определения устойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог к накоплению остаточных деформаций под воздействием динамических нагрузок: Автореферат дис. канд. техн. наук // Воронеж: ВГАСУ. 2015. - 18 с.
2. Матуа В.П. Новое лабораторное оборудование и методика проведения испытаний дорожно-строительных материалов под воздействием динамических нагрузок / С.А. Мирончук // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. - № 4. – С.16-18.
3. Матуа В.П. Патент РФ МПК G01 N 3/36 № 152287 «Прибор динамических испытаний» С.А. Мирончук, Д.В Чирва, Д.Ю. Снитко, С.В. Сизонец В.В. Солодов.
4. Мирончук. С.А. Энергоэффективное оборудование для обеспечения качества асфальтобетонов / Ю. Я. Никулин, В. П. Матуа, Е. Н. Исаев // Журнал «Научное обозрение» №7 часть 3, Москва, 2014. – С. 884-887.