

**Матуа В.П., Баранова Е.М., Джанашия Д.Р.**

**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, РАЗВИТИЯ  
И УЧЕТА НАКОПЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ  
ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ  
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

В рамках проблемы повышения долговечности дорожных конструкций одной из важнейших справедливо считают задачу замедления потери ровности покрытия во времени.

Постепенное накопление пластических деформаций в элементах дорожных конструкций приводит к нарушению ровности поверхности дороги в продольном и поперечном направлениях, что в свою очередь способствует значительному росту динамических воздействий от движущихся автомобилей и ускоренному образованию деформаций и разрушений различных форм и размеров.

Преждевременное разрушение дорожных одежд объясняется не только недостаточно высоким качеством применяемых материалов и нарушением технологии производства работ (что в ряде случаев также имеет место), но и несовершенством самой методики конструирования и расчета дорожных одежд нежесткого типа. Вместе с тем необходимо отметить, что теория расчета дорожных одежд, разработанная нашими отечественными учеными, является общепризнанной и постоянно совершенствуется.

Взамен ВСН 46-83 в 2001 г. в Российской Федерации разработаны отраслевые дорожные нормы ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд», реализация которой, несомненно, будет способствовать повышению долговечности как вновь проектируемых, так и ремонтируемых автомобильных дорог. Однако в ОДН расчетная схема определения необходимой толщины слоев дорожной одежды по-

прежнему базируется на анализе модели слоистого упругого полупространства при воздействии на его поверхность неподвижной статической нагрузки. В то же время опыт последних лет эксплуатации автомобильных дорог показывает, что методика расчета нежестких дорожных одежд должна учитывать и естественно прогнозировать не только упругие, но и пластические деформации.

В расчетах по-прежнему используется не пространственная постановка задачи, а ее частный случай осесимметричная модель упругого полупространства, не позволяющая учитывать инерционность движущейся массы и осьность автомобиля, влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) конечных поперечных размеров автодороги и места расположения нагрузки на проезжей части.

Решение поставленных задач возможно только в пространственной постановке и при рассмотрении полной системы уравнений движения, т.к. для более объективной оценки НДС дорожных конструкций, существенно изменяющегося за малые промежутки времени, необходимо применение не статических методов решения, как это предусмотрено в действующих нормативных документах, а более общих - динамических уравнений.

Анализ существующих точных и приближенных методов решений показал, что реализация задачи в подобной постановке, вследствие сложности и многопараметричности рассматриваемой системы, возможно только при использовании численных методов.

Нами был использован наиболее популярный при решении «плоских» и «пространственных» задач теории упругости и пластичности - метод конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений, позволяющий рассматривать области со сложной топологией при различных граничных условиях.

Однако, до недавнего времени среди известных схем прямого интегрирования не было известно абсолютно устойчивых (позволяющих решение «пространственных» задач на современных компьютерах с приемлемой точностью), так как решение «пространственных» задач методом конечных элементов обуславливает резкое увеличение порядка системы разрешающих уравнений (в отдельных случаях до нескольких миллионов). Поэтому возможности численного решения ограничивались либо размерностью задачи в неявных абсолютно устойчивых схемах, либо очень малой величиной шага интегрирования в условно устойчивых явных схемах.

Впервые явные абсолютно устойчивые схемы прямого интегрирования уравнений движения были получены профессором Ростовского государственного университета Л.Н. Панасюком в середине девяностых годов XX в. Нами проведена модификация этих схем и разработаны явные абсолютно устойчивые схемы прямого интегрирования уравнений движения автотранспортных средств по поверхности пространственной анизотропной многослойной дорожной конструкции.

Для решения пространственных задач движения автотранспортных средств, описываемых уравнениями типа Мещерского, получены явные, безусловно, устойчивые схемы прямого интегрирования:

$$\begin{cases} (M + M_t) \ddot{q} + C\dot{q} + Kq + \dot{M}_t (\dot{q} - \dot{q}_t) = P_0 + P_t(t), \\ \text{при } t = 0 \quad q = q_0, \quad \dot{q} = \dot{q}_0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} q = q(t) - \text{вектор} - \text{функция узловых перемещений}; \\ P = P(t) - \text{вектор} - \text{функция внешней нагрузки}; \\ M = \sum M_i - \text{глобальная матрица масс ансамбля элементов}; \\ C = \sum C_i - \text{глобальная матрица демпфирования (вязкости системы)}; \\ K = \sum K_i - \text{глобальная матрица жесткости ансамбля элементов}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D] q_{n+1} = \\ [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - \Delta t^2 K] q_n + \\ + [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D - \Delta t C + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - 0.5 \Delta t^2 K] s_n + \\ + 0.5 \Delta t^2 (P_n + P_{n+1}), \\ s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n), s = \dot{q} \Delta t, \lambda = \max\{ \text{eig}(K_D^{-1} K) \}. \end{cases}$$

Полученные уравнения позволяют рассматривать задачи о динамическом воздействии движущихся транспортных средств на дорожную конструкцию в пространственной постановке, т.к. построенная устойчивая схема является явной, система разрешающих уравнений имеет диагональную структуру, допускает тривиальное обращение и, главное, существенно снижается потребность в ресурсах памяти ЭВМ, что является основным камнем преткновения при решении пространственных задач методом конечных элементов.

Шаг интегрирования при решении уравнений движения для получения приемлемой точности требуется назначать достаточно малым - в пределах 0,001 с. Очевидно, что рассмотрение долговременных задач требует иного подхода, т.к. с подобным шагом интегрирования невозможно построить решение на отрезке протяженностью несколько лет.

В связи с этим, для оценки напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции нами предложена методика преобразования динамической нагрузки к переменной во времени «квазистатической», постоянной в пределах некоторых «базовых» временных интервалов. В качестве таковых выбираются промежутки времени, в течение которых интенсивность и состав движения можно принять достаточно постоянным (нами принят 1 час). Учет сезонных и суточных колебаний температурно-влажностных факторов в дорожной конструкции будут обеспечиваться автоматически, т.к. на их чувствительное изменение требуется гораздо больше времени.

Методика построения «квазистатической нагрузки» заключается в следующем:

1. Проводится серия расчетов воздействия различных марок движущихся АТС на дорожную конструкцию в пространственной постановке (с учетом фактической и перспективной интенсивности и состава движения, скорости движения автомобилей и их расположения на проезжей части).

2. Для каждого возможного варианта воздействия вначале вычисляется максимальная «квазистатическая нагрузка» из условия равенства максимальных перемещений в точках поперечного сечения дороги (от движущегося автомобиля и максимальной приведенной нагрузки):

$$\bar{P}_{max.стат} = A^{-1} \times \bar{q}_{max.дин.}$$

$A$  - матрица податливости в характерных точках сечения.

3. Затем определяют «приведенную нагрузку» для данного варианта воздействия автомобиля и расчетного периода времени  $T$ , используя условие совпадения долговременных интегральных эффектов. Анализ операторным методом совпадения решений согласно динамической и квазистатической постановок:

$$M\ddot{q} + K_0(i + K) * q = P(t); \quad K_0(i + K) * q = \tilde{P}(t)$$

показывает, что равенство перемещений  $q$  возможно при условии эквивалентности соответствующих импульсов за расчетный период:

$$\int_0^T \sigma_0 dt = \int_0^T \sigma(t) d(t) .$$

Тогда приведенная статическая нагрузка для данного вида воздействия (данного типа автомобиля, скорости его движения и расположения на проезжей

части) на расчетный период определяется из выражения:

$$P_{т, разов} = \frac{\int_0^T \sigma(t) dt}{T} \cdot P_{\max, стат} .$$

Следует отметить, что подобная операция проводится для каждого транспортного средства, предполагаемого для включения в состав движения.

4. Далее суммируются все «приведенные нагрузки» от тех транспортных средств, которые включаются в пакет движения за период T:

$$P_{т} = \sum_{i=1}^N (P_{т, разов})_i .$$

На основе анализа известных физических соотношений: теорий пластичности, предельного равновесия, реологических моделей, - для дальнейшей реализации принята реологическая модель вязкого течения в форме Шведова-Бингама:

$$\begin{cases} \tau_i = G\gamma_i \text{ при } \tau_i < R_i; \\ \dot{\gamma}_i = \frac{1}{\eta} [\tau_i - R_i] + \frac{1}{G} \dot{\tau}_i \text{ при } \tau_i \geq R_i; \\ \sigma_0 = K\varepsilon_0. \end{cases}$$

В работе предложена модификация данных соотношений с учетом функционального характера от времени входящих параметров:  $R(\sigma, \varepsilon, \dot{\sigma}, \dot{\varepsilon}, t, t^\circ, W, \bar{W}) = 0$ .

При этом используется гипотеза о том, что разовые воздействия транспортных средств не вызывают пластических деформаций. Необратимые деформации являются следствием многократного воздействия на дорожную конструкцию транспортной нагрузки и погодно-климатических факторов.

Степень снижения упругих деформаций по отношению к необратимым зависит от множества факторов, влияющих на поведение материала:

продолжительности действия нагрузки, уровня напряженно-деформированного состояния, температуры, влажности, параметров колебаний системы и должна уточняться эмпирически, на основании экспериментальных исследований.

Уравнения, описывающие процесс накопления остаточных деформаций согласно модифицированной гипотезы вязкого течения и «приведенной нагрузки» имеет вид:

$$C(t)\dot{q}(t) + K(t)q(t) = \tilde{P}(t).$$

Для построения численного решения рассмотренного уравнения вязкопластичного деформирования в работе использована явная абсолютно устойчивая схема прямого интегрирования задач эволюционного типа:

$$\left\{ \begin{array}{l} [C + \gamma\lambda\Delta tK_D]q_{n+1} = \\ = [C + \gamma\lambda\Delta tK_D - \Delta tK]q_n + [i - \gamma]\Delta tP_n + \gamma\Delta tP_{n+1}; \\ \gamma \geq 0.5 - \text{для устойчивого процесса;} \\ \gamma \geq 1.0 - \text{для устойчивого процесса без колебаний;} \\ \lambda = \max \{ \text{eig}(K_D^{-1}K) \}. \end{array} \right.$$

Разработан программный комплекс, который позволяет реализовать предложенную модель на ЭВМ. Укрупненная блок-схема программного комплекса прогнозирования накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях комплекса приведена на рис. 1.

В процессе проведения расчетов на длительное воздействие кроме групп нагрузок задается сочетание погодных-климатических факторов, т.е. закон изменения во времени зависящих от влажности и температуры параметров состояния.

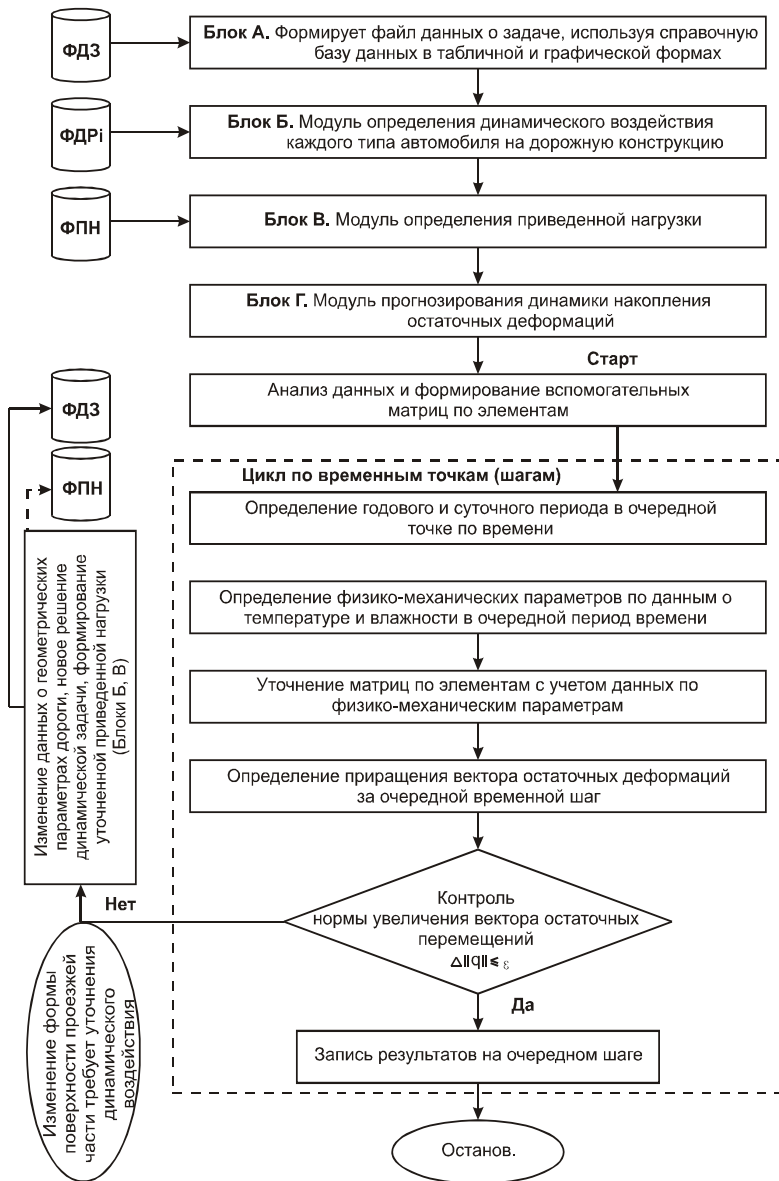
Для получения таких зависимостей выполнен целый комплекс экспериментальных исследований:

- установлен диапазон изменения температуры в слоях дорожной конструкции по месяцам года и часам суток применительно к климатическим условиям юга РФ;
- на специально сконструированных приборах проведены исследования ползучести материалов экспериментальных дорожных конструкций и получены зависимости скорости нарастания необратимых деформаций в образцах грунта от его влажности и интенсивности действующей в длительном временном интервале нагрузки;
- аналогичные зависимости получены и для асфальтобетонных образцов в области температур от +10 °С до +55 °С;
- установлено, что начальная деформация и скорость накопления остаточных деформаций в исследованных материалах в первую очередь зависят от влажности грунта и температуры асфальтобетона и в значительно меньшей степени от интенсивности действия нагрузки;
- разработаны методика и приспособления к существующим приборам для оценки в лабораторных условиях модуля сцепления трехслойных цилиндрических образцов из различных дорожно-строительных материалов.

С целью исследования напряженно-деформированного состояния и динамики накопления остаточных деформаций в элементах реальных дорожных конструкций Южного Федерального округа России с учетом их пространственного динамического нагружения и воздействия температурно-влажностных факторов был выполнен значительный численный эксперимент.



**Укрупненная блок-схема программного комплекса прогнозирования накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях**



*Рисунок 1.*

Были рассмотрены различные варианты вновь проектируемых и эксплуатируемых автомобильных дорог в Южном Федеральном округе (различных технических категорий, условий пролегания трассы, воздействия динамических нагрузок и погодноклиматических факторов).

Выполненные исследования показали, что увеличение влажности грунта земляного полотна от 0,6 до 0,7 границы текучести вызывает увеличение горизонтальных и вертикальных перемещений в элементах дорожных конструкций на 30 %.

Изменение температуры асфальтобетонного покрытия в пределах от +10 °С до +50 °С вызывает в слоях покрытий увеличение вертикальных и горизонтальных перемещений от расчетной нагрузки в 1,5-2 раза.

Отсутствие сцепления хотя бы в одном из конструктивных слоев дорожной одежды, вызывает увеличение горизонтальных перемещений от 3,7 (в верхнем слое покрытия) до 7,7 раза (в нижнем слое покрытия). На границе нижнего слоя основания и грунта земляного полотна величина горизонтальных перемещений (в зависимости от условия сопряжения слоев) может изменяться до 2,7 раза.

Анализ сопоставительных решений задач в различных постановках показал, что вертикальные и горизонтальные перемещения от расчетной нагрузки в элементах рассмотренных дорожных конструкций в «пространственной» постановке могут отличаться от соответствующих значений в «плоской» деформации до 5,3 раза, осесимметричной - до 1,67 раза; значения вертикальных и горизонтальных напряжений - до 7,9 (в плоской деформации) и до 2,83 (в осесимметричной задаче), касательных напряжений от 3,32 до 6,34 раза соответственно.

Исследование влияния интенсивности нагрузки от автотранспортных средств на НДС дорожных конструкций проводилось для различных марок

грузовых и легковых автомобилей, при различных скоростях их движения, на различном расстоянии от кромки проезжей части. Наряду с 2-х осными расчетными автомобилями были рассмотрены и многоосные транспортные единицы со сверхнормативными нагрузками.

Скорость движения автотранспорта варьировалась в широком интервале (от 5 до 200 км/ч для легковых и от 5 до 120 км/ч для грузовых автомобилей). Все расчеты в зависимости от скорости движения автомобиля были выполнены с шагом интегрирования 0,001 с. Движение транспортных средств рассматривалось как в свободном режиме, так и в плотном с соблюдением дистанции 5,10,15,20 и 25 м.

Напряженно-деформированное состояние 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 «системы» в продольном и поперечном сечениях дороги через каждые 0,25 - 1 м (ряды).

Анализ проведенных расчетов показывает, что динамические прогибы покрытия по мере приближения автомобиля к кромке проезжей части увеличиваются. Кроме того, во всех случаях отмечается выпор поверхности покрытия перед передними и задними колесами движущегося автомобиля, причем, чем выше скорость, тем выше его значение. Это обстоятельство, несомненно, будет способствовать ослаблению сил сцепления на контакте слоев покрытия и основания и образованию поперечных трещин.

В качестве примера на рис. 2 показано прогнозирование накопления остаточных деформаций на упомянутой автомобильной дороге «Ольгинская - Волгодонск», км 11 в Ростовской области при моделировании реального пространственного ее нагружения и воздействия температурно-влажностных факторов. Необратимые перемещения приведены для

19 точек поверхности верхнего слоя асфальтобетонного покрытия на половине ширины проезжей части (4,5 м) через 0,25 м в поперечном сечении дороги. Рассмотрен интервал времени от 6 месяцев до 12 лет с шагом 6 месяцев (24 ряда).

Анализ полученных результатов показывает, что накопление остаточных деформаций в исследуемой дорожной конструкции начинается с первого года эксплуатации дороги. Причем первые 5 лет эксплуатации дороги необратимые вертикальные перемещения поверхности покрытия не превышают 10 мм.

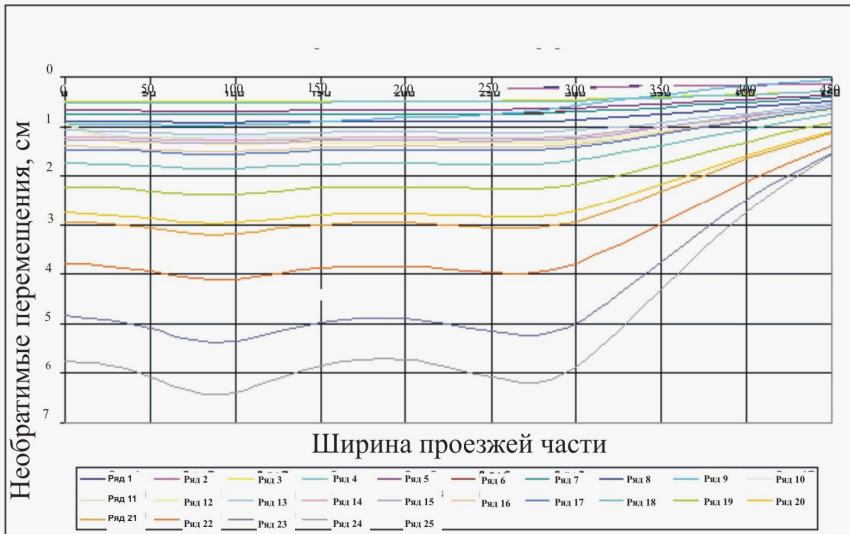
Чувствительное нарастание деформации достигается к 6-7 и особенно к 8 году эксплуатации дороги. Дальнейшая эксплуатация дороги без проведения ремонтных мероприятий приводит к ее интенсивному разрушению. Развитие неровностей в поперечном сечении дороги достигает максимальных значений по полосе наката, причем превышение глубины правой колеи над левой (для данного примера) составляет 5 %.

В случае накопления за межремонтный срок в элементах дорожных конструкций остаточных деформаций, превышающих предельно допустимые значения (с точки зрения предусмотренных действующими нормативными документами требований к ровности покрытия), дорожную одежду корректируют.

Это показано на примере конструирования дорожной одежды автомобильной дороги Ростов - Азов (на участке обход п. Койсуг) - I<sub>б</sub> технической категории.

Оценка устойчивости данной конструкции к накоплению остаточных деформаций показывает, что максимальные необратимые перемещения поверхности проезжей части к 9 году эксплуатации дороги достигает 6,4 см (рис. 3), а глубина колеи

## Динамика накопления во времени необратимых перемещений проезжей части автодороги “Ольгинская-Волгодонск”, км 11



## Нарастание во времени необратимых перемещений поверхности проезжей части в 19 точках поперечного сечения дороги

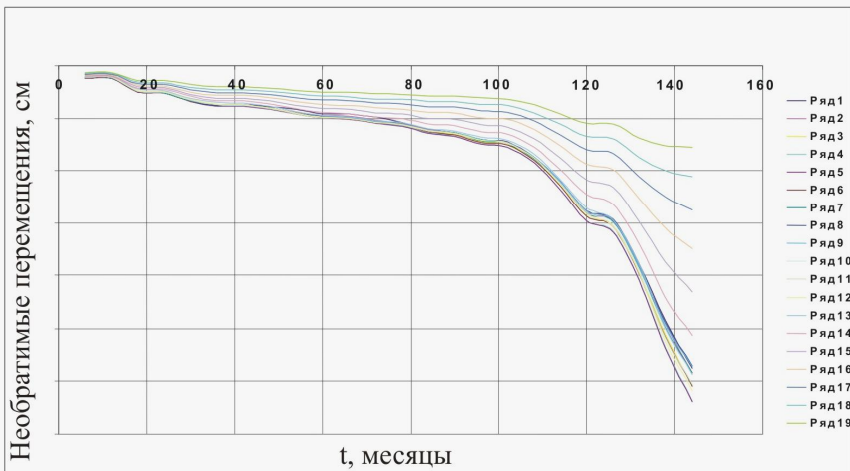


Рисунок 2.

к началу четвертого года эксплуатации дороги достигает предельно допустимые величины ( $h=25$  мм). Следовательно, требуется корректировка дорожной одежды.

Анализ выполненных исследований напряженно-деформированного состояния элементов исходной дорожной конструкции показал, что максимальные необратимые деформации наблюдаются в щебеночном основании, устроенном по способу заклинки ( $E_{щ} = 350$  МПа). В связи с этим принято решение о замене верхней части данного конструктивного слоя (толщиной  $h = 15$  см) на слой идентичной толщины из щебеночной смеси оптимального состава, укрепленной цементом I класса прочности с модулем упругости  $E_y = 800$  МПа.

Далее выполняется повторный расчет по изложенной выше методике. Конечный результат динамики развития остаточных деформаций II варианта дорожной конструкции представлен на рис. 3, анализ которого показывает значительный рост устойчивости к колееобразованию дорожной конструкции после ее корректировки - глубина колеи к концу 9 года эксплуатации не превышает 10 мм.

Корректировка дорожной одежды выполнена со значительным запасом прочности преднамеренно, с целью наглядной демонстрации возможностей разработанной методики.

Очевидно, что для практических расчетов следует принимать более рациональные решения, не приводящие к существенному увеличению стоимости проектируемой конструкции (с учетом опыта проектирования и службы автомобильных дорог в конкретных региональных условиях).

Так, например, снижение модуля упругости замененного слоя с 800 МПа до 600 МПа обеспечивает

## Накопление максимальных необратимых перемещений поверхности проезжей части автодороги “Ростов-Азов” на участке “Обход - п.Койсуг”

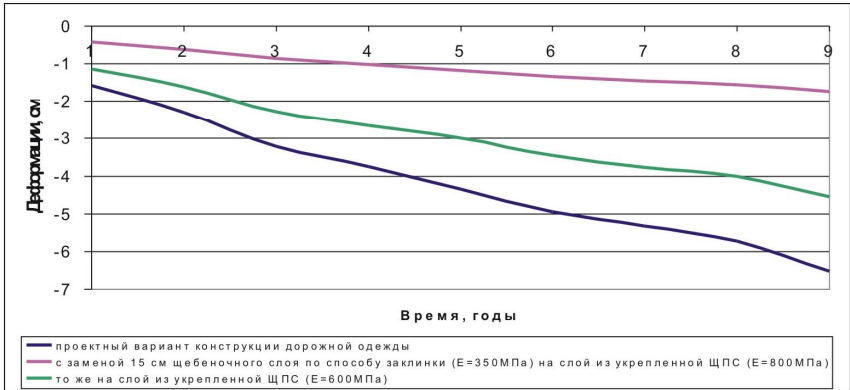


Рисунок 3.

## Развитие во времени колеи автодороги “Ростов-Азов” на участке “Обход - п.Койсуг”

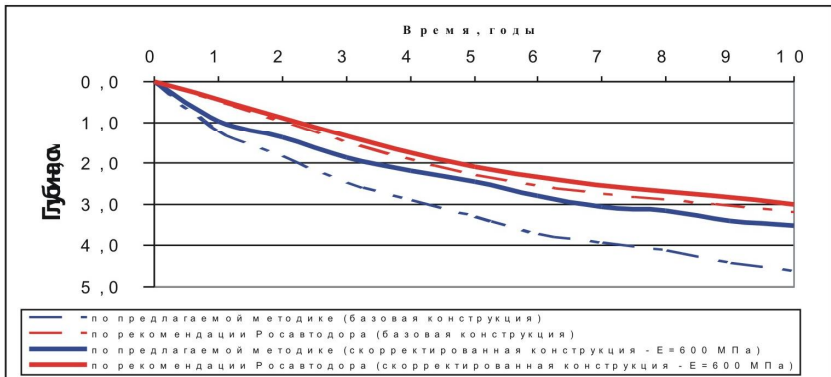


Рисунок 4.

большую устойчивость к колееобразованию по сравнению с базовым вариантом. Предельно-допустимая глубина колеи достигается только к шестому году эксплуатации дороги, что вдвое увеличивает межремонтные сроки службы покрытия (рис. 4).

Для сравнения на этом же графике представлены аналогичные зависимости развития колеи во времени, полученные по «Рекомендациям по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах» (М.: Росавтодор, 2002. - 179 с.). Расхождение в прогнозах колеблется от 15 до 35%.

С целью исследования степени соответствия результатов теоретических расчетов реальным условиям эксплуатации дороги в региональных условиях Южного Федерального округа был выполнен широкомасштабный натурный эксперимент. На дорогах различных технических категорий Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краев были созданы наблюдательные станции по определению вертикальных деформаций поверхности асфальтобетонных покрытий под воздействием реальных динамических нагрузок и температурно-влажностных факторов.

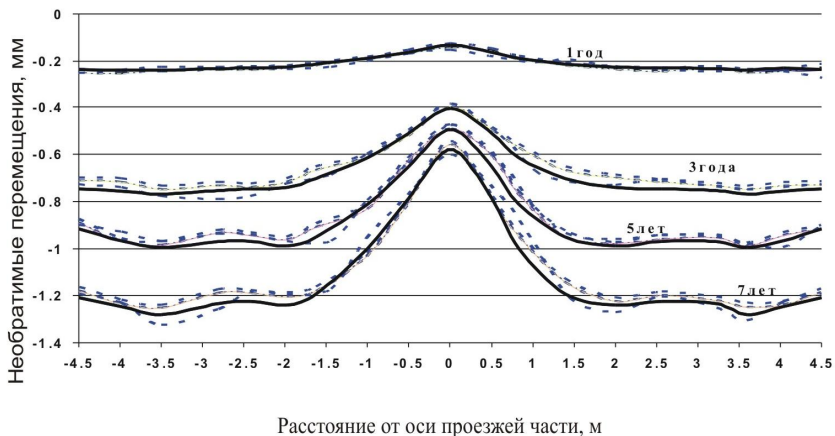
Для получения сравнительных данных и проверки адекватности разработанной механико-математической модели реальным условиям эксплуатации дороги, для каждой наблюдательной станции построены сопоставительные графики перемещений поверхности проезжей части исследуемой дороги по прогнозируемым расчетным значениям и данным экспериментальных наблюдений. Один из таких графиков для вышеупомянутых автомобильных дорог приведен на рис. 5.

Экспериментальные данные по каждой точке наблюдательных станций, полученных за годы эксплуатации участков дорог, сравнивались с расчетными значениями необратимых вертикальных перемещений, предсказанных механико-математической моделью.

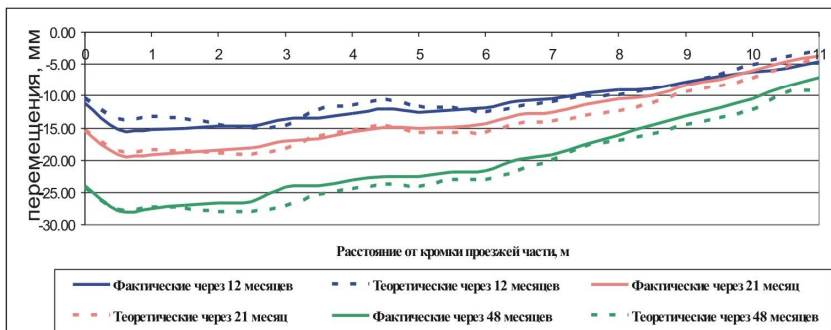


## Динамика накопления во времени максимальных необратимых перемещений на поверхности проезжей части

### Автодорога “Ольгинская-Волгодонск” Км 11



### Автодорога “Ростов-Азов” на участке “Обход п. Койсуг”



*Рисунок 5.*

Отклонения расчетных (прогнозируемых) остаточных деформаций и скорости их приращений во времени от реальных фактических значений по всем рядам наблюдательных станций не превышают 10 %. Отклонения от среднего не превышают 10 % с вероятностью 0,9.

Идентичные результаты получены по другим наблюдательным станциям, что говорит о высокой сходимости прогнозируемых и фактически наблюдаемых результатов.

Таким образом, комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволил обобщить и решить научную проблему прогнозирования и оценки во времени напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения, что несомненно будет способствовать принятию обоснованных решений при конструировании новых и расчете усиления эксплуатируемых дорожных одежд, а, следовательно, повышению срока их службы.

## **Выводы**

Экспериментальные данные по каждой точке наблюдательных станций, полученных за годы эксплуатации участков дорог, сравнивались с расчетными значениями необратимых вертикальных перемещений, предсказанных механико-математической моделью.

Отклонения расчетных (прогнозируемых) остаточных деформаций и скорости их приращений во времени от реальных фактических значений по всем рядам наблюдательных станций не превышают 10 %. Отклонения от среднего не превышают 10 % с вероятностью 0,9.

Идентичные результаты получены по другим наблюдательным станциям, что говорит о высокой сходимости прогнозируемых и фактически наблюдаемых результатов.

Таким образом, комплекс выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволил обобщить и решить научную проблему прогнозирования и оценки во времени напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения, что несомненно будет способствовать принятию обоснованных решений при конструировании новых и расчете усиления эксплуатируемых дорожных одежд, а, следовательно, повышению срока их службы.