

doi: 10.5862/MCE.51.7

Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий

*Аспирант Н.А. Кондрашов;
д.т.н., профессор А.А. Шестопапов,
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Аннотация. В работе рассмотрена существующая технология уплотнения асфальтобетонных смесей и отмечена необходимость назначения нагрузок от уплотняющих машин на материал, исходя из его прочностных и деформативных свойств.

Изложен подход к выбору дорожных катков и режимов их работы, основанный на вычислении характеристик асфальтобетона до начала уплотнения и позволяющий избежать образования дефектов в процессе укатки. Выполнен анализ методов определения физико-механических характеристик смеси на основе принципа температурно-временной суперпозиции. Разработана методика вычисления динамического модуля деформации асфальтобетона на любом этапе процесса уплотнения. Доказана эффективность применения полученного выражения на всех стадиях укатки смеси путем сравнения результатов вычисления с экспериментальными данными.

На основе модуля деформации разработана зависимость для математического описания реологической модели взаимодействия вальца катка с асфальтобетонным покрытием. Результатом внедрения указанного подхода будет повышение качества дорожного полотна при одновременном сокращении трудозатрат и себестоимости строительных работ.

Ключевые слова: асфальтобетон; уплотнение; динамический модуль деформации; дорожный каток; реологическая модель

Введение

Асфальтобетонное покрытие наиболее распространено в мировой практике дорожного строительства ввиду высоких эксплуатационных качеств. Чаще всего укладывают горячие асфальтобетонные смеси, которые в процессе уплотнения и остывания превращаются в асфальтобетон. Формирование плотной, прочной структуры материала происходит в диапазоне температур от 140–130 °С до 70–75 °С под действием внешней нагрузки, которую создают рабочие органы уплотняющих машин – катков [1, 2, 3]. За пределами этого диапазона укатка становится неэффективным способом ввиду существенных изменений прочностных и деформативных свойств уплотняемого материала.

Поскольку асфальтобетонная смесь представляет собой материал с упруго-вязко-пластичными свойствами, то каждая из этих составляющих проявляет себя в большей или меньшей степени на различных этапах процесса уплотнения. На начальной стадии укатки, при высоких температурах и незначительной плотности, смесь не способна выдерживать значительные по величине нагрузки и ведет себя как чисто пластичный материал. В конце процесса уплотнения ввиду высокой плотности и низкой температуры проявляются в большей степени упругие свойства. На промежуточных этапах уплотнения это упруго-вязко-пластичный материал [4, 5]. В указанном температурном диапазоне эти свойства изменяются плавно и непрерывно, если не происходит резкого увеличения уплотняющей нагрузки. В этом случае достижение требуемых качеств покрытия выполняется в кратчайшие сроки и с минимальными энергозатратами. На практике такого идеального нагружения материала в процессе уплотнения не происходит ввиду отсутствия текущей информации об изменении его прочностных и деформативных свойств. Отсюда возникают трудности в моделировании и оптимизации этого процесса в реальных условиях. Изучению физико-механических характеристик горячих асфальтобетонных смесей посвящено большое количество отечественных [6, 7, 8] и зарубежных исследований [9–14]. Тем не менее, несмотря на высокий научный интерес, проявляемый к данной проблеме, точное определение таких свойств материала, как вязкость и модуль деформации, на каждой из стадий укатки на данный момент все еще остается невозможным.

В настоящей работе делается попытка установления закономерности изменения модуля деформации смеси как одного из главных критериев, характеризующих уплотняемость асфальтобетона, а также использование данного показателя для разработки математического описания реологической модели взаимодействия вальца катка с дорожным покрытием.

Определение модуля деформации уплотненного асфальтобетона

Динамический модуль деформации отражает зависимость напряжения от деформации для вязкоупругих материалов под действием нагрузки, изменяющейся по синусоидальному закону.

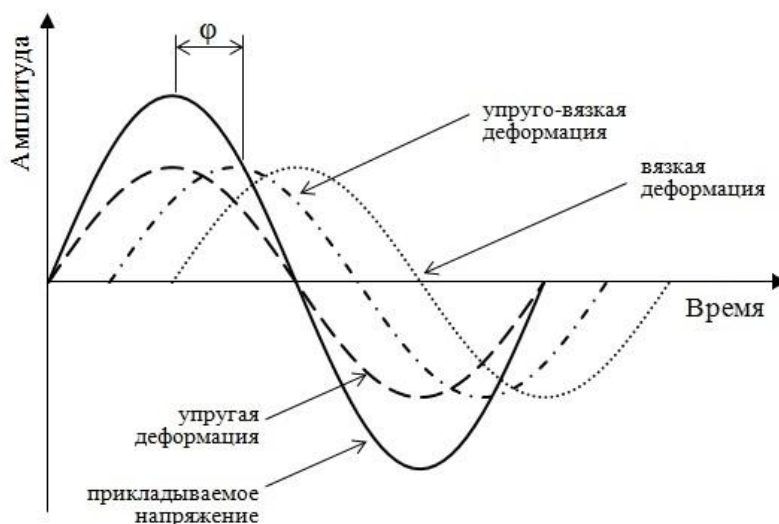


Рисунок 1. Изменение деформации и напряжения в зависимости от материала

Фазовый угол, равный нулю, свидетельствует о чисто упругом материале, в то время как его значение 90° соответствует чисто вязкому. Величина фазового угла в диапазоне между 0 и 90° , в свою очередь, будет указывать на вязкоупругий материал.

Возникающие при синусоидальной нагрузке напряжения и деформации могут быть описаны следующими уравнениями:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin (\omega t - \varphi), \quad (2)$$

где σ — напряжение в момент времени t ; σ_0 — максимальное действующее напряжение; ω — угловая скорость; φ — фазовый угол между напряжением и деформацией; ε — деформация в момент времени t ; ε_0 — максимальная деформация.

В процессе уплотнения катками асфальтобетонной смеси в ней возникает реактивное сопротивление уплотнению вследствие оказываемых со стороны рабочего органа контактных давлений. Среди составляющих данного явления можно выделить сопротивление изменению положения крупных минеральных зерен относительно друг друга. Другим слагаемым выступает сопротивление сжатию асфальтобетона с последующим перераспределением количества битума в межзерновом пространстве. Комплексным показателем, характеризующим данное свойство материала, является динамический модуль деформации смеси. Главным его преимуществом по сравнению с модулем упругости является возможность в большей степени отражать вязкоупругую природу асфальтобетона [15].

С математической точки зрения динамический модуль деформации является абсолютным значением комплексного модуля деформации $E_0 = \sigma_0 / \varepsilon_0$, однако в общепринятой практике он записывается E_0 . В таком случае динамический модуль деформации описывается выражением:

$$E_0 = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin (\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}}. \quad (3)$$

Вязкоупругие свойства асфальтобетона в большой степени зависят от его температуры и времени нагружения. Однако в выражении (3) не отражается изменение модуля деформации под действием постоянно меняющейся температуры смеси. Влияние данных факторов в широком диапазоне значений на поведение уплотняемого материала можно предсказать при помощи принципа температурно-временной суперпозиции. Согласно этому принципу изменение температуры и времени действия нагрузки воздействует на асфальтобетон схожим образом, что позволяет определить их взаимосвязь между собой. Тогда сдвиговая податливость, вязкость и другие механические свойства вязкоупругих материалов будут являться однофакторными функциями приведенного времени t_0 [16]:

$$t_0 = t/a_{T_0} \quad (4)$$

$$\log_{10} t_0 = \log_{10} t - \log_{10} a_{T_0}, \quad (5)$$

где t – время действия нагрузки; a_{T_0} – функция температурно-временного смещения.

Функция температурно-временного смещения определяется на основе экспериментальных данных исходя из следующего выражения:

$$a_{T_0} = \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \frac{T_0 \rho_0}{T \rho}, \quad (6)$$

где ρ – плотность смеси, а η – её вязкость.

Свойства асфальтобетона, необозначенные нижним индексом, соответствуют значениям при искомой температуре T , в то время как наличие индекса «0» характеризует величины, полученные при температуре приведения T_0 .

Так как температура в зависимости (6) исчисляется в кельвинах, а плотность смеси меняется вследствие изменения температуры незначительно, то данное выражение может быть приведено к виду:

$$a_{T_0} \approx \frac{\eta}{\eta_0}. \quad (7)$$

Графическая интерпретация принципа температурно-временной суперпозиции была впервые представлена в работе Тобольского и Эндрюса [17]. Так как кривые различных характеристик асфальтобетона подобны при любых значениях температуры, то существует возможность приведения всего семейства зависимостей к одной генерализованной линии. Данная обобщенная кривая может быть получена в результате смещения значений функций параллельно оси логарифма времени. Схематичное представление реализации данного принципа представлено на рисунке 2.

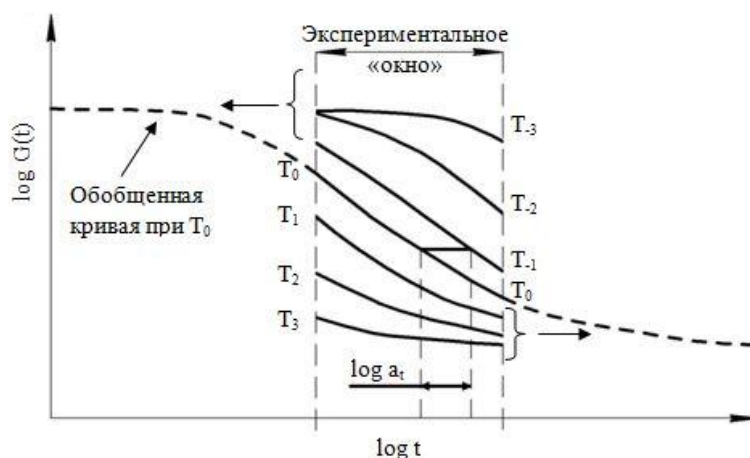


Рисунок 2. Схема принципа температурно-временной суперпозиции [18]

На основе результатов определенного количества испытаний в некотором временном диапазоне, называемом экспериментальным окном, может быть получено семейство
Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий

функциональных зависимостей. Кривые $G(t)$, полученные для температур ниже температуры приведения, сдвигаются в сторону увеличения времени действия нагрузки, в то время как значения при более высоких температурах необходимо сместить в сторону, противоположную оси абсцисс. Совокупность данных переносов позволяет построить искомую обобщенную кривую.

Таким образом, зная время действия нагрузки t_0 при температуре T_0 и значение функции температурно-временного смещения a_{T_0} , с помощью выражения (4) можно определить эквивалентное время нагружения t при температуре смеси T .

Для определения температурно-временного смещения также широкое применение получила преобразованная формула Аррениуса, изначально отражавшая взаимосвязь скорости химической реакции и температуры [19]:

$$k = Ae^{-E_a/(RT)}, \quad (8)$$

где k – константа скорости реакции; A – фактор частоты столкновения молекул; E_a – энергия активации, среднее значение которой 226 кДж/моль [20]; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Для температурного диапазона ниже температуры стеклования T_g выполняется следующая зависимость:

$$\eta \sim e^{E_a/RT}. \quad (9)$$

Тогда функция температурно-временного смещения будет иметь вид:

$$\log_{10} a_{T_0} = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right). \quad (10)$$

Большое распространение для определения a_{T_0} получило уравнение Вильямса – Ландела – Ферри (ВЛФ). По сравнению с формулой Аррениуса данное выражение может использоваться в более широком диапазоне положительных значений температуры $[T_g; T_g+100^\circ]$, что делает его пригодным для описания свойств горячих асфальтобетонов. В общей форме уравнение ВЛФ может быть представлено следующим образом [21]:

$$\log_{10} a_{T_g} = - \frac{c_1^g (T - T_g)}{c_2^g + (T - T_g)}, \quad (11)$$

где $c_1^g = 17,44$, $c_2^g = 51,6$ – эмпирические константы, полученные при температуре стеклования.

В случае использования некоторой температуры приведения T_0 из вышеобозначенного диапазона выражение (11) принимает вид:

$$\log_{10} a_{T_0} = - \frac{c_1^0 (T - T_0)}{c_2^0 + (T - T_0)}, \quad (12)$$

где c_1^0, c_2^0 – коэффициенты, вычисляемые по следующим формулам:

$$c_1^0 = \frac{c_1^1 c_2^1}{c_2^0 + T_0 - T_1}, \quad (13)$$

$$c_2^0 = c_2^1 + T_0 - T_1. \quad (14)$$

Зависимость свойств асфальтобетона от времени нагрузки и температуры наилучшим образом описывается обобщенным степенным законом. Данный метод применим в диапазоне низких и средних температур, в то время как для высоких температур необходимо также использование полиномиальной компенсирующей функции. В случае рассмотрения больших диапазонов температур и частот нагружения вследствие колебаний крайних значений обобщенной кривой возникает потребность во введении нескольких корректирующих факторов.

Для отражения изменения характеристик дорожного покрытия М. Витчаком [22, 23] было предложено использование обобщенной кривой, представленной в виде сигмоидальной зависимости, поскольку при таком подходе отсутствуют вышеназванные недостатки степенного закона. Изменение модуля деформации асфальтобетонной смеси в таком случае будет описываться следующей функцией:

$$\log_{10} E_0 = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log_{10} t_0}}, \quad (15)$$

где δ – минимальное значение модуля деформации; $\delta + \alpha$ – его максимальная величина; β , γ – параметры, характеризующие форму сигмоидальной кривой.

Показатели δ и α зависят от соотношения содержания битума, минеральных компонентов смеси и ее пористости. Свойства вяжущего и амплитуда значений модуля деформации, в свою очередь, влияют на величину γ , отражающую крутизну функции, и значение β , показывающее положение точки перегиба обобщенной кривой (рис. 3).

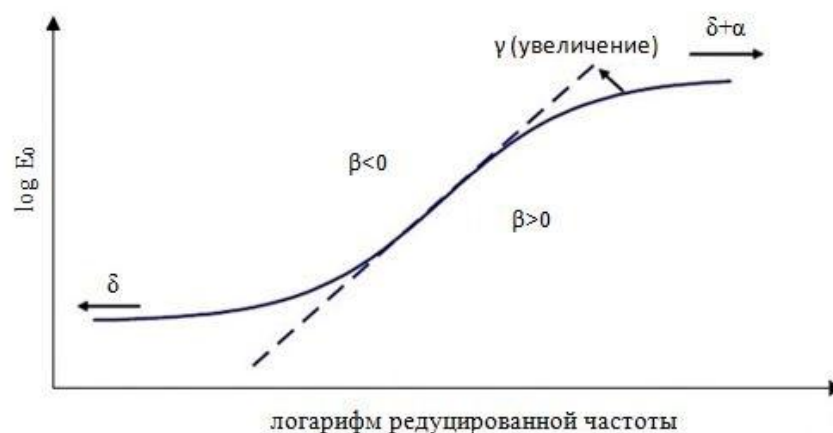


Рисунок 3. Сигмоидальная функция модуля деформации асфальтобетона [22]

Верхние значения кривой асимптотически стремятся к величине максимальной жесткости смеси, которая достигается при низких температурах вследствие уменьшения вязкости битума. В случае высокого нагрева смеси влияние вяжущего становится менее выраженным по сравнению с влиянием состава асфальтобетона, и в качестве нижней асимптоты будет выступать равновесное значение модуля деформации.

В своей работе Т. Пеллинен и М. Витчак [22] показывают взаимосвязь температуры и вязкости асфальтобетонной смеси:

$$\log_{10} t_0 = \log_{10} t - c (\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0), \quad (16)$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Результатом совместного анализа выражений (5) и (16) является следующая зависимость:

$$\log_{10} a_{T_0} = c (\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0). \quad (17)$$

Подстановка формул (5) и (17) в уравнение (15) приводит к получению основного выражения для вычисления модуля деформации асфальтобетонной смеси:

$$\log_{10} E_0 = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log_{10} t - c (\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0))}}. \quad (18)$$

Данное выражение легло в основу различных моделей прогнозирования свойств асфальтобетона и позволило установить степень влияния большого числа факторов на характеристики изучаемого материала.

Наибольшее распространение среди них получила модель М. Витчака, основанная на многолетнем эмпирическом исследовании характеристик асфальтобетона. В результате анализа более 2750 опытных значений, полученных при изучении более двухсот различных смесей, было Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий

составлено обобщенное уравнение данной модели, получившей название 1-37А. Зависимость, полученная Витчаком и его коллегами, связывает динамический модуль деформации асфальтобетона с его температурой, составом его минеральной части, а также частотой прикладываемой нагрузки [24]:

$$\log_{10} E_0 = 1,91154 + 0,02923 \rho_{200} - 0,00177 (\rho_{200})^2 - 0,00284 \rho_4 - 0,0581 V_a - \frac{0,80221 V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021 \rho_4 + 0,00396 \rho_{38} - 0,000017 (\rho_{38})^2 + 0,00547 \rho_{34}}{1 + e^{(1,364355 - 0,3136 \log_{10} f - 0,39353 \log_{10} \eta)}} \quad (19)$$

где E_0 – динамический модуль деформации смеси, Па;

η – вязкость битума, Па·с;

f – частота нагружения, Гц;

V_a – объемное содержание воздушных пор, %;

V_{beff} – эффективная объемная доля битума, %;

ρ_{34} – кумулятивный остаток на сите 19 мм от общего веса, %;

ρ_{38} – совокупный остаток на сите 9,5 мм от общего веса, %;

ρ_4 – общий остаток на сите 4,75 мм от общего веса, %;

ρ_{200} – отношение материала, прошедшего сито 0,075 мм, к общему весу, %.

В результате статистического анализа пригодности использования формулы Витчака 1-37А для определения динамического модуля деформации для указанных разновидностей смесей был получен коэффициент детерминации 0,886 для обычной шкалы и 0,941 для логарифмической [24]. Данное значение является хорошим с учетом многообразия влияющих на конечный результат факторов.

Несмотря на то, что анализ свойств асфальтобетона проводился при температурах от $-17,7$ до $54,4$ °С (от 0 до 130° F) и частотах от 0,1 до 25 Гц, представление обобщенной кривой в виде сигмоидальной зависимости позволяет значительно расширить данные диапазоны.

Влияние температуры смеси на ее деформативные характеристики в результате изменения вязкости битума отражено в выражении (19). Соответствующие значения могут быть получены при помощи метода температурной чувствительности вязкости (A-VTS). Выражение (20) отражает взаимосвязь данных двух показателей между собой:

$$\log_{10} (\log_{10} \eta - 3) = A + VTS \log_{10} (1,8 \cdot T + 491,67), \quad (20)$$

где A – коэффициент регрессии; VTS – угловой коэффициент кривой температурной чувствительности; T – температура, °С.

Зависимость (19) является линейной, поэтому для установления неизвестных коэффициентов достаточно провести всего две серии опытов по определению вязкости в лабораторных условиях. На данный момент эти значения уже являются табличными для большого числа битумов.

Влияние плотности смеси на модуль деформации

Помимо температуры смеси, одним из факторов, оказывающих наибольшее влияние на прочностные и деформативные свойства асфальтобетона, является его плотность. В результате многолетних исследований В.В. Бадаловым [25, 26, 27] была получена зависимость приращения модуля деформации от числа проходов дорожного катка, показанная на рисунке 4. Здесь ΔE_n – приращение модуля деформации в зависимости от числа проходов катка по одному следу, что эквивалентно приращению плотности слоя смеси; ΔE_T – приращение модуля деформации вследствие остывания смеси в процессе ее уплотнения.

Наибольшее изменение модуля деформации происходит после 2–3 проходов катка, в дальнейшем же количество проходов имеет не столь ярко выраженное влияние, и в конце уплотнения скорость приращения настолько затухает, что рост модуля деформации обуславливается в основном лишь снижением температуры. Это означает, что дальнейшее использование данного асфальтобетонного катка нецелесообразно.

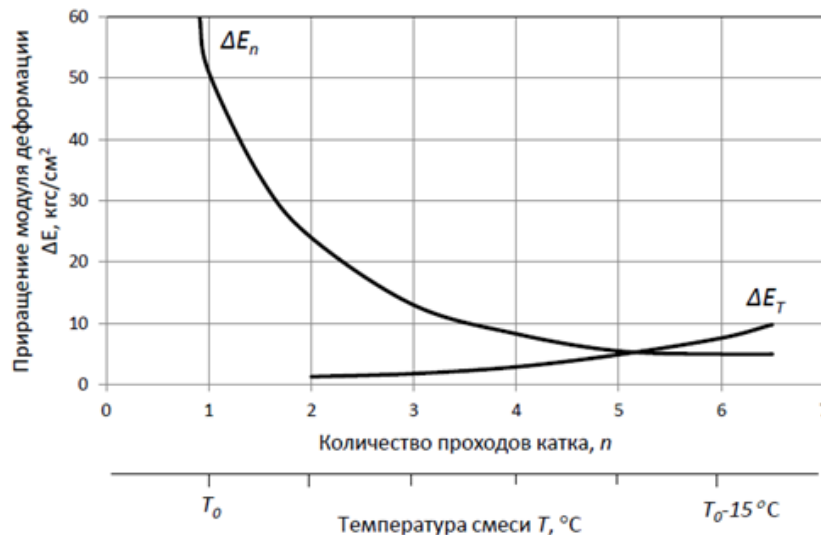


Рисунок 4. Приращение модуля деформации в процессе уплотнения

В ряде работ [28, 29, 30] также отмечается, что модуль деформации слоя в конце уплотнения растет более высокими темпами, чем предел прочности уплотняемого материала. Так, в процессе укатки последний увеличивается в 3,5–4,0 раза, в то время как модуль деформации – в 13–15 раз. В свою очередь, в ходе проведенных Т.Н. Сергеевой [15] исследований, направленных на изучение взаимосвязи между коэффициентом уплотнения различных смесей и модулем деформации, установлено более чем двадцатикратное изменение второго показателя даже в случае постоянства температуры.

Таким образом, при разработке технологии уплотнения асфальтобетона принципиально важным аспектом является учет изменения характеристик материала по мере роста его плотности.

Формула М. Витчака, разработанная для определения динамического модуля деформации уже готового дорожного покрытия, не дает возможность нахождения данного параметра для неуплотненной смеси. Так как в состав зависимости 1-37А входят такие изменяемые в процессе укатки асфальтобетона показатели, как объемное содержание воздушных пор и эффективная объемная доля битума, то корректировка этих величин с учетом коэффициента уплотнения позволит вычислять модуль деформации на всех стадиях процесса уплотнения. В результате получена следующая зависимость:

$$\log_{10} E_0 = 1,91154 + 0,02923 \rho_{200} - 0,00177 (\rho_{200})^2 - 0,00284 \rho_4 - \frac{0,0581V_a}{K_y^8} - \frac{0,80221V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021 \rho_4 + 0,00396 \rho_{38} - 0,000017 (\rho_{38})^2 + 0,00547 \rho_{34}}{1 + e^{(1,364355 - 0,31360g_{10} f - 0,39353g_{10} \eta)}}, \quad (21)$$

где K_y – коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси.

Сравнение экспериментальных данных, представленных в работе [15], со значениями модуля деформации смеси, рассчитанными по предложенной зависимости, в широком температурном диапазоне при двух различных коэффициентах уплотнения смеси представлено на следующем графике (рис. 5).

Как видно из рисунка 5, результаты вычислений хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Особенно точными расчеты являются в температурном интервале 80–140 °С, что соответствует начальной и основной стадиям укатки. Тем не менее, погрешности в диапазоне 60–80 °С можно считать незначительными, что свидетельствует о правомерности применения предложенной зависимости (21) для расчета динамического модуля деформации на всех этапах процесса уплотнения асфальтобетона.

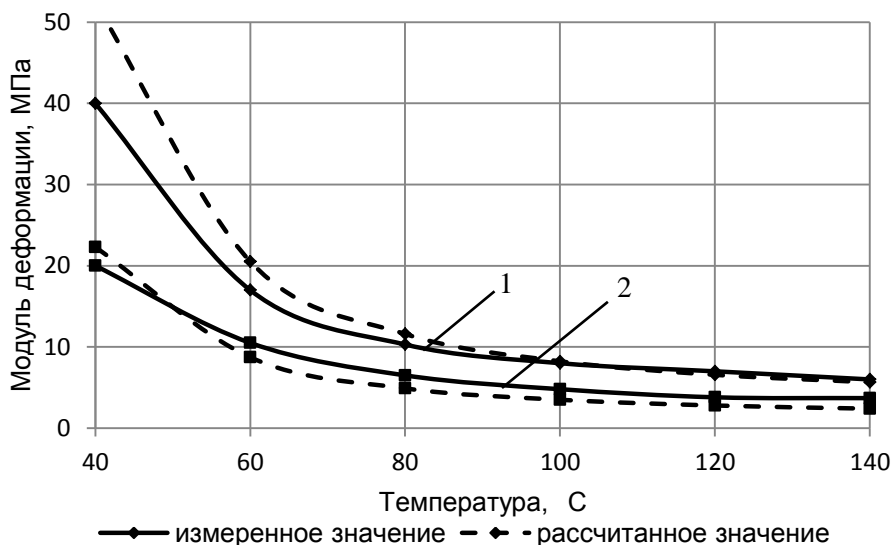


Рисунок 5. Сравнение опытных и расчетных значений модуля деформации от температуры; I – $K_y = 0,9$; II – $K_y = 0,85$

Реологическая модель процесса уплотнения асфальтобетонной смеси

Неоднородность структуры асфальтобетона и постоянное изменение его физико-механических характеристик обуславливает необходимость использования модельного подхода для описания процесса уплотнения смеси. Совместное рассмотрение нагрузок, действующих со стороны вибрационного вальца на уплотняемый слой, и процессов, протекающих в самом упруго-вязко-пластичном материале, является достоинством модели В.Б. Пермякова и В.С. Серебrenникова [5], показанной на рисунке 6.

С помощью компонентов 1 и 2 моделируется работа подвижных частей дорожного катка в режиме виброуплотнения. Возникающее вследствие гармонических колебаний рабочего органа изменение положения элементов конструкции описывается системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c \cdot (x_1 - x_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c \cdot (x_1 - x_2) = Q \cdot \sin \omega t + m_2 \cdot g - P(t) \end{cases}, \quad (22)$$

где m_1 – масса пригруза катка, кг; m_2 – масса рабочего органа, кг; x_1, x_2 – перемещение в вертикальной плоскости пригруза и вальца соответственно, м;

b – коэффициент вязкостного трения амортизаторов, Па·с; Q – возбуждающая сила, Н; c – жесткость амортизаторов, Н/м; ω – угловая частота вала вибровозбудителя, рад/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время колебания, с; $P(t)$ – реакция со стороны уплотняемого материала, Н.

Процессы, протекающие в укатываемой асфальтобетонной смеси, имитируются с помощью трех блоков компонента 3, состоящих из элементарных реологических моделей Сен-Венана (StV), Гука (H) и Ньютона (N). Блок I характеризует упруго-вязко-пластичную деформацию материала, в то время как II и III – соответственно быструю и медленную релаксацию напряжений в смеси. Связав общую передаточную функцию для компонента 3 с функцией каждого из его составных элементов, можно составить выражение, описывающее их взаимосвязь между собой [5]:

Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий

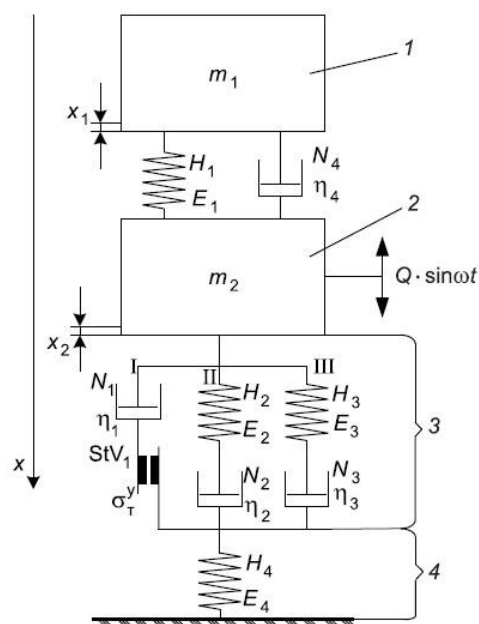


Рисунок 6. Модель уплотнения асфальтобетона: 1 – пригруз, 2 – валец, 3 – асфальтобетонная смесь, 4 – основание

$$(\eta_2\theta_3 + \eta_3\theta_2) \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} + (\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = nm\theta_2\theta_3 \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} + (\theta_2n + \theta_3m) \frac{d\sigma_k(t)}{dt} + \sigma_k(t) - \sigma_T^y, \quad (23)$$

где $\varepsilon(t)$ – относительная деформация слоя, м; σ_T^y – предел текучести смеси, Па; η_2, η_3 – вязкость смеси во втором и третьем блоке, Па·с; $\sigma_k(t)$ – контактные давления, Па; θ_2, θ_3 – время быстрой и медленной релаксации напряжений, с; n, m – безразмерные коэффициенты, характеризующие распределение напряжений между вторым и третьим блоками.

Совместное решение выражений (22) и (23) позволяет получить следующую систему дифференциальных уравнений, характеризующую взаимодействие рабочего органа вибрационного катка с асфальтобетонной смесью [5, 32]:

$$\begin{cases} \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} = a_0 + b_0 \cdot \sin \omega t - c_0 \cdot \sigma_k(t) \\ \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} = -c_1 \frac{d\sigma_k(t)}{dt} - c_2[\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + c_2(\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + c_2(\eta_2 \cdot \theta_3 + \eta_3 \cdot \theta_2) \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} \end{cases}, \quad (24)$$

где a_0, b_0, c_0, c_1, c_2 – коэффициенты, соответственно равные:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{(0,02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_{cl}(t)}; \quad b_0 = \frac{Q}{(0,02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_{cl}(t)}; \\ c_0 &= \frac{L_{AB}(t) \cdot B}{(0,02 \cdot m_1 + m_2) \cdot h_{cl}(t)}; \quad c_1 = \frac{\theta_2 \cdot n + \theta_3 \cdot m}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}; \quad c_2 = \frac{1}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}, \end{aligned} \quad (25)$$

где $L_{AB}(t)$ – длина дуги контакта вальца со смесью, м; $h_{cl}(t)$ – толщина уплотняемого слоя, м; B – ширина вальца, м.

Недостатком данной модели является необходимость вычисления вязкости смеси в заданный момент времени. Зависимость данной характеристики материала от температуры, частоты и амплитуды колебаний и многих других показателей делает определение свойств асфальтобетона на предварительном этапе на практике невозможным.

В данной работе предлагается использовать следующую зависимость между временем релаксации и вязкостью смеси второго и третьего блоков:

$$(n + m) \cdot E_0(t) = \frac{\eta_2}{\theta_2} + \frac{\eta_3}{\theta_3} = \eta_0(t) \cdot \left(\frac{n}{\theta_2} + \frac{m}{\theta_3} \right), \quad (26)$$

где $\eta_0(t)$ – общая вязкость смеси, Па·с; $E_0(t)$ – динамический модуль деформации асфальтобетона, найденный из выражения (21), Па.

Общая вязкость материала в таком случае может быть определена по следующей формуле:

$$\eta_0(t) = \frac{(n + m) \cdot E_0(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3}{n \cdot \theta_3 + m \cdot \theta_2}. \quad (27)$$

Тогда из выражения для общей передаточной функции можно получить зависимость:

$$\begin{aligned} (n + m) \cdot E_0(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot \frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2} + \frac{(n + m)^2 \cdot E_0(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3}{n \cdot \theta_3 + m \cdot \theta_2} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = [\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + \\ + \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m \cdot \frac{d^2\sigma_k(t)}{dt^2} + (n \cdot \theta_2 + m \cdot \theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k(t)}{dt} \end{aligned} \quad (28)$$

В результате преобразования выражения (24) посредством использования динамического модуля деформации и замены вязкостей блоков с помощью формул (26) и (27) получена новая система уравнений для описания взаимодействия рабочего органа дорожной машины с асфальтобетонной смесью:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2} = a_0 + b_0 \cdot \sin \omega t - c_0 \cdot \sigma_k(t), \\ \frac{d^2 \sigma_k(t)}{dt^2} = -c_2(n\theta_2 + m\theta_3) \frac{d\sigma_k}{dt} - c_2[\sigma_k(t) - \sigma_T^y] + \frac{c_3 E_0(t) \cdot (n+m)}{(n \cdot \theta_3 + m \cdot \theta_2)} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + c_3 E_0(t) \frac{d^2 \varepsilon(t)}{dt^2}, \end{cases} \quad (29)$$

где

$$c_3 = \frac{n+m}{n \cdot m}. \quad (30)$$

Таким образом, полученная система уравнений не включает показатель вязкости материала, как следствие, не имеет выше озвученного недостатка предшествующей математической модели, что позволяет с ее помощью достоверно описать процесс уплотнения дорожного покрытия асфальтобетонными катками на каждой из стадий укатки смеси.

Заключение

В работе показано, что использование принципа температурно-временной суперпозиции позволяет на основе построения обобщенной кривой и вычисления функции смещения определить характеристики асфальтобетона при различной температуре и времени нагружения без трудозатратного сбора большого количества опытных данных, а также в тех случаях, когда проведение экспериментальных исследований физически невозможно.

Получено выражение для вычисления динамического модуля деформации смеси как одного из ключевых параметров, оказывающих влияние на процесс уплотнения материала, на всех стадиях укатки дорожного покрытия. Предложено уравнение, устанавливающее соотношение между временем релаксации и вязкостью в блоках реологической модели уплотнения, что позволило на основе использования динамического модуля деформации получить новую систему уравнений, описывающую взаимодействие вальцов катка и асфальтобетона. Применение разработанных зависимостей позволяет на предварительном этапе с большой точностью произвести подбор состава смеси, разработать технологию ее уплотнения и рассчитать сроки эксплуатации покрытия. Результатом внедрения данной методики будет являться непосредственно связанное с этим повышение качества дорожного полотна при одновременном сокращении трудозатрат и себестоимости выполняемых работ.

Литература

1. Костельов М.П., Сергеева Т.Н., Посадский Л. М. Рациональные режимы уплотнения асфальтобетонной смеси // Автомобильные дороги. 1980. №6. С. 20–22.
2. Иванченко С.Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: дисс. ... д-ра. техн. наук. СПб., 1997. 482 с.
3. Калужский Я.А., Батраков О.Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1970. 160 с.
4. Пермяков В.Б. Совершенствование теории, методов расчета и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. СПб., 1992. 37 с.
5. Серебренников В.С. Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2008. 170 с.
6. Болдырев Г.Г. Методика определения динамических модулей деформации горячих асфальтобетонных смесей. Состояние вопроса // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. Пермь, 2012. Т. 3. С. 22–31.
7. Носов С.В. Методология оценки деформационных характеристик асфальтобетонных смесей и грунтов с применением теории наследственной ползучести // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Белгород, 2013. №6. С. 12–16.
8. Жайлович И.Л., Ярошенко В.Н. Совершенствование методов оценки механических свойств асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. №4. С. 23–29.
9. Телтаев Б.Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов // Дорожная техника: каталог-справочник. СПб.: Славутич, 2010. Рр. 130–137.
10. Abdo A. A. [et al]. Prediction of the dynamic modulus of superpave mixes // Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 2009. Vol. 305. P. 314.

Кондрашов Н.А., Шестопалов А.А. Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий

11. You Z., Buttlar W.G. Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures // Journal of Materials in Civil Engineering. 2004. Vol. 16. No. 2. Pp. 140–146.
12. Wan C. [et al]. Three-dimensional micromechanical finite element analysis on gauge length dependency of the dynamic modulus of asphalt mixtures // Road Materials and Pavement Design. 2012. Vol. 13. No. 4. Pp. 769–783.
13. Guo N., Zhao Y. Dynamic modulus prediction of asphalt mixtures based on micromechanics // Engineering Mechanics. 2012. Vol. 10. Pp. 13–19.
14. Coleri E. [et al]. Development of a micromechanical finite element model from computed tomography images for shear modulus simulation of asphalt mixtures // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 30. Pp. 783–793.
15. Сергеева Т. Н. Исследование взаимодействия вальца катка с асфальтобетонным слоем при его уплотнении: дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1981. 144 с.
16. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 535 с.
17. Tobolsky A.V., Andrews R.D. Systems manifesting superposed elastic and viscous behavior // The Journal of Chemical Physics. 1945. Vol. 13. No1. – Pp. 3–27.
18. Радовский Б.С. Конструирование и расчет дорожных одежд в первой половине XX столетия: ч. 1 // Дорожная техника: каталог-справочник. СПб.: Славутич, 2013. С. 96–123.
19. Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren // Zeitschrift für physikalische Chemie. 1889. Vol. 4. Pp. 226–248.
20. Chilingarian G. V., Yen T. F. (ed.). Asphaltenes and Asphalts, 1. Elsevier, 1994. Vol. 40. 476 p.
21. Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids // Journal of the American Chemical Society. 1955. Vol. 77. No.14. Pp. 3701–3707.
22. Pellinen TK., Witczak M.W. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion) // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 2002. Vol. 71. Pp. 281–309.
23. Witczak M.W., Bari J. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures // Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University. 2004. 29 p.
24. Witczak M.W., Andrei D., Mirza W. Development of revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures // Inter-team Technical Rep., NCHRP Project No. 1-37A. 1999. 40 p.
25. Бадалов В.В., Шестопапов А. А. Рациональный режим уплотнения асфальтобетонной смеси // Автомобильные дороги. 1972. №6. С. 18.
26. Бадалов В.В., Гуральник Д.С. Уплотнение асфальтобетонного покрытия катками различного типа // Автомобильные дороги. 1978. № 7. С. 17–21.
27. Бадалов В.В. Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: 1974. 17 с.
28. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. М., 1980. С. 64–71.
29. Костельов М. П., Перевалов В. П. Новая усовершенствованная технология устойчиво обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона // Дорожная техника: каталог-справочник. СПб.: Славутич, 2005. С. 120–132.
30. Хархута Н.Я., Стефанюк Е.Л. Оптимизация параметров силового воздействия на слой асфальтобетонной смеси при уплотнении его катками // В кн.: Строительные машины. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1978. С. 34–36.
31. Пермьяков В.Б., Дубков В.В., Серебренников В.С. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком // Омский научный вестник. 2008. №1. С. 67–71.
32. Иванчура В.И., Прокопьев А.П., Клевцова О.Г. Идентификация динамической системы процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожными катками // Журнал Сибирского федерального университета. 2011. №4. С. 557–566.

*Никита Александрович Кондрашов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(987)1134540; эл. почта: nikita.kondrashov@gmx.de*

*Александр Андреевич Шестопапов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб. :+7(812)5526726; эл. почта: shestop-37@yandex.ru*

© Кондрашов Н.А., Шестопапов А.А., 2014

doi: 10.5862/MCE.51.7

Dynamic modulus application in the asphalt compaction rheological model for pavement construction

N.A. Kondrashov*St-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
+79871134540; e-mail: nikita.kondrashov@gmx.de***A.A. Shestopalov***St-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia
+78125526726; e-mail: shestop-37@yandex.ru*

Key words

asphalt; compaction; dynamic modulus; road roller; rheological model

Abstract

This paper studies the existing hot-mix asphalt compaction technology and points out that designation of the appropriate asphalt rollers and working parameters has to be performed in accordance with mechanical characteristics of the layer.

A way to avoid defects during the rolling process is proposed based on determination of material properties before starting asphalt compaction. Due to a large variety of used types and compositions of asphalt mixes, determination of their characteristics by practical consideration is impossible. The study considers the method for determination of asphalt mechanical properties based on implementation of the time-temperature superposition principle. A procedure for dynamic modulus computation at each stage of the compaction process has been developed. Comparison of calculation output with experimental data verifies the determined relation for dynamic modulus. Consideration of this parameter allowed developing a new mathematical formulation for the rheological model of roller-asphalt interaction.

The conclusion is drawn pointing that application of the approach for the development of compaction technology based on calculation of dynamic modulus will result in enhanced pavement quality along with reduced labor expenditure and higher cost saving.

References

1. Kostelov M. P., Sergeeva T. N., Posadskiy L. M. Ratsionalnyye rezhimy uplotneniya asfaltobetonnay smesi [Rational modes of sealing bituminous mixture]. *Avtomobilnyye dorogi*. 1980. No. 6. Pp. 20–22. (rus)
2. Ivanchenko S.N. *Nauchnyye osnovy formirovaniya rabochikh organov dorozhnykh mashin dlya uplotneniya asfaltobetonnaykh smesey* [The scientific basis for the formation of working bodies of road machines for sealing asphalt mixtures]. Doctoral dissertation. Saint-Petersburg, 1997. 482 p. (rus)
3. Kaluzhskiy Y.A., Batrakov O.T. *Uplotneniye zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Compaction of subgrade and road pavement]. Moscow: Transport, 1970. 160 p. (rus)
4. Permyakov V.B. *Sovershenstvovaniye teorii, metodov rascheta i konstruksiy mashin dlya uplotneniya asfaltobetonnaykh smesey* [Improving the theory, calculation methods and designs of machines for sealing asphalt mixtures]. Doctoral dissertation. Saint-Petersburg, 1992. 37 p. (rus)
5. Serebrennikov V.S. *Obosnovaniye rezhimnykh parametrov vibratsionnykh katkov dlya uplotneniya asfaltobetonnaykh smesey* [Justification of regime parameters of vibrating rollers for compacting asphalt mixtures]. Doctoral dissertation. Omsk, 2008. 170 p. (rus)
6. Boldyrev G.G. Metodika opredeleniya dinamicheskikh moduley deformatsii goryachikh asfaltobetonnaykh smesey. Sostoyaniye voprosa [Method of determining the dynamic modulus of deformation hot asphalt mixtures. state of matter]. *Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse* [Upgrade and research in the transport sector]. Perm, 2012. Vol. 3. Pp. 22–31. (rus)
7. Nosov S.V. Metodologiya otsenki deformatsionnykh kharakteristik asfaltobetonnaykh smesey i gruntov s primeneniym teorii nasledstvennoy polzuchesti [Methodology for estimating the deformation characteristics of asphalt mixtures and soil by applying the theory of hereditary creep]. *Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2013. No. 6. Pp. 12–16. (rus)
8. Zhaylovich I.L., Yaroshenko V.N. Sovershenstvovaniye metodov otsenki mekhanicheskikh svoystv asfaltobetona [Improvement of methods of evaluating the mechanical properties of asphalt concrete]. *Science and Engineering for Roads*. 2008. No.4. Pp. 23–29. (rus)
9. Teltayev B.B. Analiz raschetnykh znacheniy modulya uprugosti asfaltobetonov [The analysis of the calculated values of the elastic modulus of asphalt concrete]. *Dorozhnaya tekhnika: katalog-spravochnik* [Road Construction Equipment: Business Directory]. Saint-Petersburg: Slavutich, 2010. Pp. 130–137. (rus)

Kondrashov N.A., Shestopalov A.A. Dynamic modulus application in the asphalt compaction rheological model for pavement construction

10. Abdo A. A. [et al]. Prediction of the dynamic modulus of superpave mixes. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. 2009. Vol. 305. P. 314.
11. You Z., Buttler W. G. Discrete element modeling to predict the modulus of asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16. No. 2. Pp. 140–146.
12. Wan C. [et al]. Three-dimensional micromechanical finite element analysis on gauge length dependency of the dynamic modulus of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2012. Vol. 13. No. 4. Pp. 769–783.
13. Guo N., Zhao Y. Dynamic modulus prediction of asphalt mixtures based on micromechanics. *Engineering Mechanics*. 2012. Vol. 10. Pp. 13–19.
14. Coleri E. [et al]. Development of a micromechanical finite element model from computed tomography images for shear modulus simulation of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. Pp. 783–793.
15. Sergeeva T. N. *Issledovaniye vzaimodeystviya valtsa katka s asfaltobetonnyy sloyem pri yego uplotnenii* [Investigation of the interaction of roller skating rink with a layer of asphalt under his seal]. PhD thesis. Leningrad, 1981. 144 p. (rus)
16. Ferri D. *Vyazkouprugiye svoystva polimerov* [Viscoelastic properties of polymers]. Moscow: Izd-vo inostrannoy literatury, 1963. 535 p.
17. Tobolsky A.V., Andrews R.D. Systems manifesting superposed elastic and viscous behavior. *The Journal of Chemical Physics*. 1945. Vol. 13. No. 1. Pp. 3–27.
18. Radovskiy B. S. *Konstruirovaniye i raschet dorozhnykh odezhd v pervoy polovine KhKh stoletiya: ch. 1* [Design and calculation of road pavements in the first half of the twentieth century: Part 1]. *Dorozhnaya tekhnika: katalog-spravochnik* [Road Construction Equipment: Business Directory]. Saint-Petersburg: Slavutich, 2013. Pp. 96–123. (rus)
19. Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1889. Vol. 4. Pp. 226–248.
20. Chilingarian G. V., Yen T. F. (ed.). *Asphaltenes and Asphalts*, 1. Elsevier, 1994. Vol. 40. 476 p.
21. Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*. 1955. Vol. 77. No. 14. Pp. 3701–3707.
22. Pellinen T.K., Witczak M. W. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2002. Vol. 71. Pp. 281–309.
23. Witczak M.W., Bari J. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures. *Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University*. 2004. 29 p.
24. Witczak M. W., Andrei D., Mirza W. Development of revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. *Inter-team Technical Rep., NCHRP Project No. 1-37A*. 1999. 40 p.
25. Badalov V.V., Shestopalov A.A. Ratsionalnyy rezhim uplotneniya asfaltobetonnoy smesi [Rational mode of sealing asphalt concrete mixture]. *Avtomobilnyye dorogi*. 1972. No. 6. P. 18. (rus)
26. Badalov V.V., Guralnik D.S. Uplotneniye asfaltobetonnoy pokrytiya katkami razlichnogo tipa [Compaction of asphalt concrete pavement rollers of various types]. *Avtomobilnyye dorogi*. 1978. No. 7. Pp. 17–21. (rus)
27. Badalov V.V. *Issledovaniye katkov pri uplotnenii asfaltobetonnykh dorozhnykh pokrytiy* [Research of rinks in compaction of asphalt pavements]. Abstract of PhD thesis. Leningrad, 1974. 17 p. (rus)
28. Kharkhuta N. Y. *Voprosy teorii uplotneniya dorozhnykh pokrytiy* [Questions to theory of seal pavements]. *Uplotneniye zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd: Tr. SoyuzdorNII* [Compaction of subgrade and road pavement: Proceedings of SoyuzdorNII]. Moscow, 1980. Pp. 64–71. (rus)
29. Kostelov M. P., Perevalov V. P. Novaya usovershenstvovannaya tekhnologiya ustoychivo obespechivayet vysokoye kachestvo uplotneniya asfaltobetona [New advanced technology provides high quality stable sealing asphalt concrete]. *Dorozhnaya tekhnika: katalog-spravochnik* [Road Construction Equipment: Business Directory]. Saint-Petersburg: Slavutich, 2005. Pp. 120–132. (rus)
30. Kharkhuta N. Y., Stefanyuk E. L. Optimizatsiya parametrov silovogo vozdeystviya na sloy asfaltobetonnoy smesi pri uplotnenii yego katkami [Optimization of parameters of power influence on a layer of asphalt concrete mixture compaction by rollers]. *V kn. Stroitelnyye mashiny* [In book: Construction machines]. Yaroslavl: Izd-vo: YaPI, 1978. Pp. 34–36. (rus)
31. Permyakov V. B., Dubkov V. V., Serebrennikov V. S. Analiticheskoye opisaniye protsessa uplotneniya asfaltobetonnoy smesi vibratsionnyy katkom [Analytical description of the seal asphalt concrete mixture with vibrating rollers]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2008. No.1. Pp. 67–71. (rus)
32. Ivanchura V. I., Prokopyev A. P., Klevtsova O. G. Identifikatsiya dinamicheskoy sistemy protsessa uplotneniya asfaltobetonnoy smesi dorozhnymi katkami [Identification of the Dynamic Compaction Process of Asphalt Mixture Rollers]. *The Siberian Federal University Journal*. 2011. No.4. Pp. 557–566. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 46–54