

*pasnost' dvizhenija: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk* [The development of technological schemes of production of winter maintenance of roads, enhancing traffic safety: author. dis. cand. tehn. sciences]. Voronezh: 2011. 162 p.

3. Vasil'ev A.P. *Proektirovanie dorog s uchetom vlijanija klimata na uslovija dvizhenija* [Designing roads with the influence of climate on the traffic conditions]. Moscow, Transport, 1986. 248 p.

4. Lobanov E.N., Sil'janov V.V. *Propusknaja sposobnost' avtomobil'nyh dorog* [The capacity of the roads]. Moscow, Transport, 1970. 152 p.

5. Babkov V.F., Andreev O.V. *Proektirovanija avtomobil'nyh dorog* [Road design]. Moscow, Transport, 1987. 368 p.

6. Bobrova T.V., Sleptsov I.V. *Modelirovanie reshenij po snegoochistke gorodskoj ulichno-dorozhnoj*

*seti v mnogoagentnoj sisteme* [Simulation solutions for snow removing the urban road network in the multi-agent system]. *Vestnik SibADI*, 2013. pp. 51-57.

*Слепцов Игорь Викторович (Россия, г. Омск) – аспирант кафедры «Экономика и проектное управление в транспортном строительстве» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sleptsov\_igor@mail.ru).*

*Sleptsov Igor Viktorovich (Russian Federation, Omsk) – the graduate student of "Economy and Project Management in Transport Construction" chair of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sleptsov\_igor@mail.ru).*

УДК 625.7

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ

А.В. Смирнов, Е.В. Андреева, В.Ф. Игнатов  
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

**Аннотация:** Рассмотрены модели загрузки слоев многослойной дорожной конструкции при воздействии подвижной вертикальной нагрузки, а также формы затухающих колебаний. Численным анализом установлены значения динамического прогиба, его скорости и ускорений колебаний, динамических напряжений сжатия – растяжения, являющихся критериями прочности, а также ориентиром для испытаний дорожно-строительных материалов на выносливость.

**Ключевые слова:** динамический прогиб, скорости и ускорения колебаний, импульсы напряжений.

### Введение

Динамические процессы в дорожных конструкциях проезжей части автомагистралей являются естественной их реакцией на кратковременное ударное воздействие колес подвижных транспортных средств. Проявляются процессы в слоях дорожных конструкций в форме напряжений и знакопеременных перемещений (колебаниях). Динамические процессы изучены еще недостаточно, чтобы с их использованием улучшить дорожные конструкции или увеличить срок их службы. В связи с этим в данной статье показаны модели и критерии динамических процессов\*.

### Постановка задачи, алгоритм и методы решения

Необходимо установить параметры и характеристики динамического процесса, развивающегося в слоистой многослойной системе при горизонтальном движении вертикальной нагрузки.

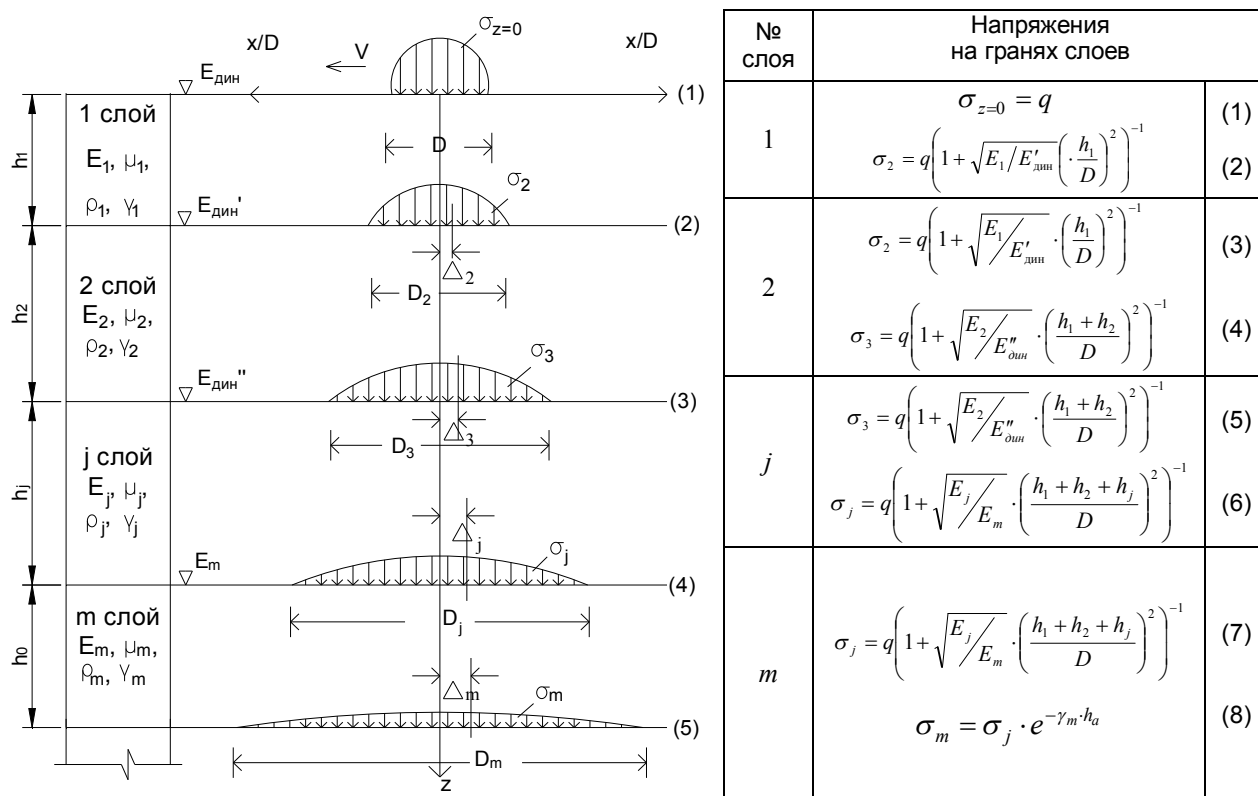
Многослойная система состоит из  $m$  числа плоско-параллельных слоев ( $1 \leq j \leq m$ ).

Каждый слой характеризуется динамическим модулем упругости  $E_j$ , плотностью  $\rho_j$  коэффициентом Пуассона  $\mu_j$ , скоростью распространения продольных волн напряжений  $C_{pj}$ , коэффициентом затухания напряжений  $\gamma_j$ , толщиной  $h_j$ . Нагрузка  $P$  распределена по круговой площадке диаметром  $D$ , с максимальным удельным давлением  $q$  и меняется во времени по закону  $\sigma_1 = \frac{4P}{\pi D^2} \cdot \sin\left(\pi \frac{t}{T_0}\right)$ . Здесь  $t$  время, а  $T_0 = \frac{D}{V}$  – время действия нагрузки горизонтально движущейся со скоростью  $V$ .

### Алгоритм решения

1. Ниже показана схема распределения напряжений сжатия их расчет по плоскостям слоев (формулы с 1 по 8). Предварительно устанавливаются последовательно  $E_m$ ,  $E_{дин.}$ ,  $E_{дин.}$  и  $E_{дин.}$  по известным методикам приведения двухслойной системы к однослойной [1,2].

\*В подготовке материалов статьи приняла участие Грязнова М.К. – бакалавр ФГБОУ ВПО «СибАДИ»



При этом толщину нижнего грунтового слоя назначают из соображений, что напряжения сжатия составят не более 5 % от напряжений на поверхности этого слоя:  $h_0 = \frac{3}{\gamma_m}$  при коэффициенте затухания  $\gamma_m = 0,03 \text{ см}^{-1}$ . Затем вычисляют среднее напряжение в слое как  $\sigma_j^{cp} = \frac{\sigma_j + \sigma_{j-1}}{2}$ .

2. Рассчитывают динамический прогиб слоя по формуле:

$$u_j = \frac{\sigma_j^{cp} \cdot h_j (1 - \mu_j^2)}{E_j} \left( 1 - \frac{t}{5T_{0j}} \right) \cdot \sin \left( \pi \frac{t}{T_{0j}} \right). \quad (9)$$

Здесь  $\mu_j$  – коэффициент Пуассона,  $T_{0j} = \frac{D_{j-1}}{V}$ ;  $D_{j-1} = D \cdot \sqrt{\frac{q}{\sigma_{j-1}}}$ ;  $\left( 1 - \frac{t}{5T_{0j}} \right)$  – функция учета убывания амплитуд колебаний в три раза по Бесселю как  $J_1(x)$  при  $x = T_0 \div 5T_0$  [3].

Рассчитывают полный динамический прогиб слоистой конструкции [2,4]:

$$u_{дин} = \sum_1^m u_j. \quad (10)$$

Рассчитывают отставание (запаздывание) динамических прогибов слоев от центра приложения нагрузки

$$\Delta_j = \frac{h_{j-1}}{c_{j-1}} \cdot V \cdot \sum_1^{j-1} \Delta_{j-1}. \quad (11)$$

Здесь  $c_{j-1} = \sqrt{\frac{E_{j-1} \cdot g_0}{\rho_{j-1} (1 - \mu_{j-1})^2}}$  – скорость

распространения продольных волн в слое, а  $g_0 = 981 \text{ см/с}^2$ .

3. Устанавливают параметры динамического процесса в слоистой конструкции путем расчета:

а) Динамического прогиба поверхности –

$$u_{дин} = \sum_1^m u_j;$$

б) Производных прогиба по поверхности:

$$\frac{du}{dS} \approx \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta S} \text{ и } \frac{d^2u}{dS^2} \approx \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left( \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta S} \right);$$

в) Радиус кривизны изгибаемой поверхности –  $R_d \approx \frac{1}{\frac{d^2u}{dS^2}}$  и напряжения растяжения при изгибе –  $\sigma_r = \frac{E_j h_j}{2R_j} \sqrt{2}$ ;

$$\sigma_r = \frac{E_j h_j}{2R_j} \sqrt{2};$$

г) Импульс растягивающих напряжений –

$$J = \sigma_r \cdot \Delta t;$$

д) Скорость и ускорение вертикальных колебаний –  $\frac{\Delta u}{\Delta t}$  и  $\frac{d^2 u}{dt^2}$ .

Все вычисления произведены численным методом путем расчетов ординат упругих динамических прогибов меняющихся во времени с шагом  $\Delta t = 0,001$  с. Расчеты произведены для скорости движения подвижной нагрузки  $V = 20 \div 120$  км/ч, значения нагрузки на колесо транспортного средства  $P = 50$  кН,  $D = 34$  см.

Для расчетов принята 4-слойная дорожная конструкция с покрытием из асфальтобетона и цементобетона с модулями упругости  $E_1 = 5000 \div 30000$  МПа и толщиной  $h_1 = 20$  см. Основание конструкции представлено слоем толщиной  $h_2 = 25$  см и модулем упругости  $E_2 = 600$  МПа. Подстилающий слой – песчаный толщиной  $h_3 = 30$  см и модулем упругости  $E_3 = 100$  МПа, а грунт земляного полотна представлен суглинком тяжелым толщиной  $h_0 = 50$  см и модулем упругости  $E_4 = 30 \div 41$  МПа, что соответствует расчетному влагосодержанию в нем в условиях II и III дорожно-климатических зонах.

#### Результаты и выводы

На рисунке 1 представлены результаты развития динамического процесса в 4-слойной конструкции во времени с начала приложения нагрузки. Характерным здесь является развитие знакопеременных затухающих колебаний в каждом слое конструкции ( $u_1, u_2, u_3$  и  $u_4$ ) и получение путем сложения амплитуд колебаний общей кривой динамического прогиба поверхности конструкции  $\Sigma u_j$ . Как видно из рис. 1 на поверхности формируется дисгармоничная кривая прогиба конструкции вызванная различием прогибов и их смещением индивидуально в каждом слое [5].

Путем комфортного преобразования кривой  $\Sigma u_j$  из рисунка 1 и смещения начала кривой в центр нагружения (при  $t = 0,01$  с.) получают кривые волнового поля на поверхности покрытия конструкции (рис. 2). Очевидно, что с увеличением скорости движения нагрузки динамический прогиб под ней убывает, но возрастает число гребней и впадин в волновом поле и его размер до 12 м. Этот размер превышает размер статической чаши прогибов почти в 4,5 раза, а число гребней и впадин, где развиваются растягивающие напря-

жения на гранях слоя покрытия существенно больше единицы, что предусмотрено в статических расчетах прочности конструкций.

На рисунке 3 показана зависимость динамического прогиба различных дорожных конструкций от общей упругости и значения растягивающих напряжений в нижних плоскостях слоев  $\sigma_r$ . В сочетании с вертикальными сжимающими  $\sigma_1$  и горизонтальными растягивающими  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  наблюдается объемное напряженное состояние, убывающие по глубине конструкции. Так в покрытиях  $\sigma_1 = 0,27$  МПа,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,289$  МПа, основаниях  $\sigma_1 = 0,123$  МПа,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,175$  МПа, подстилающем слое и верхней части грунта земляного полотна  $\sigma_1 = 0,072$  МПа,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,075$  МПа. Закономерное убывание прогиба конструкции в зависимости от общего модуля упругости конструкции, показанное на рис. 3 хорошо аппроксимируется выражением  $u_{дин.} = 0,5305 \cdot E_{дин.}^{-0,431}$  ( $R^2 = 0,8895$ ) для расчетов динамических прогибов конструкций с покрытиями нежесткого и жесткого типов.

Из анализов результатов следуют выводы для уточнения испытаний и прочности дорожно-строительных материалов. При воздействии на слоистую дорожную конструкцию колесной нагрузки в 50 кН движущейся со скоростью 60 км/ч частоты колебаний убывают с глубиной конструкции с 27 до  $7,5 \text{ с}^{-1}$ , а собственные амплитудно-частотные характеристики возрастают с  $59 \cdot 10^{-4}$  мм·с в покрытии до  $1280 \cdot 10^{-4}$  мм·с в грунте земляного полотна. Время достижения максимума деформации возрастает по глубине конструкции с 0,01 до 0,03 с в грунте земляного полотна. Скорости колебаний слоев возрастают с глубиной от 16 до 32 мм/с, а наибольшие ускорения наблюдаются на грунтовом основании конструкции – до  $1066 \text{ мм/с}^2$ . При этом общие скорости колебаний поверхности конструкции достигают 143 мм/с, а ускорения  $476 \text{ см/с}^2$  ( $\approx 0,5g$ ) [6,7,8,9,10].

Импульсы действия в слоях сжимающих и разжимающих напряжений убывают по глубине с 0,0058 МПа·с до 0,00385 МПа·с в грунте земляного полотна. При этом импульс удельных давлений от колесной нагрузки на поверхности конструкции достигает 0,012 МПа·с.

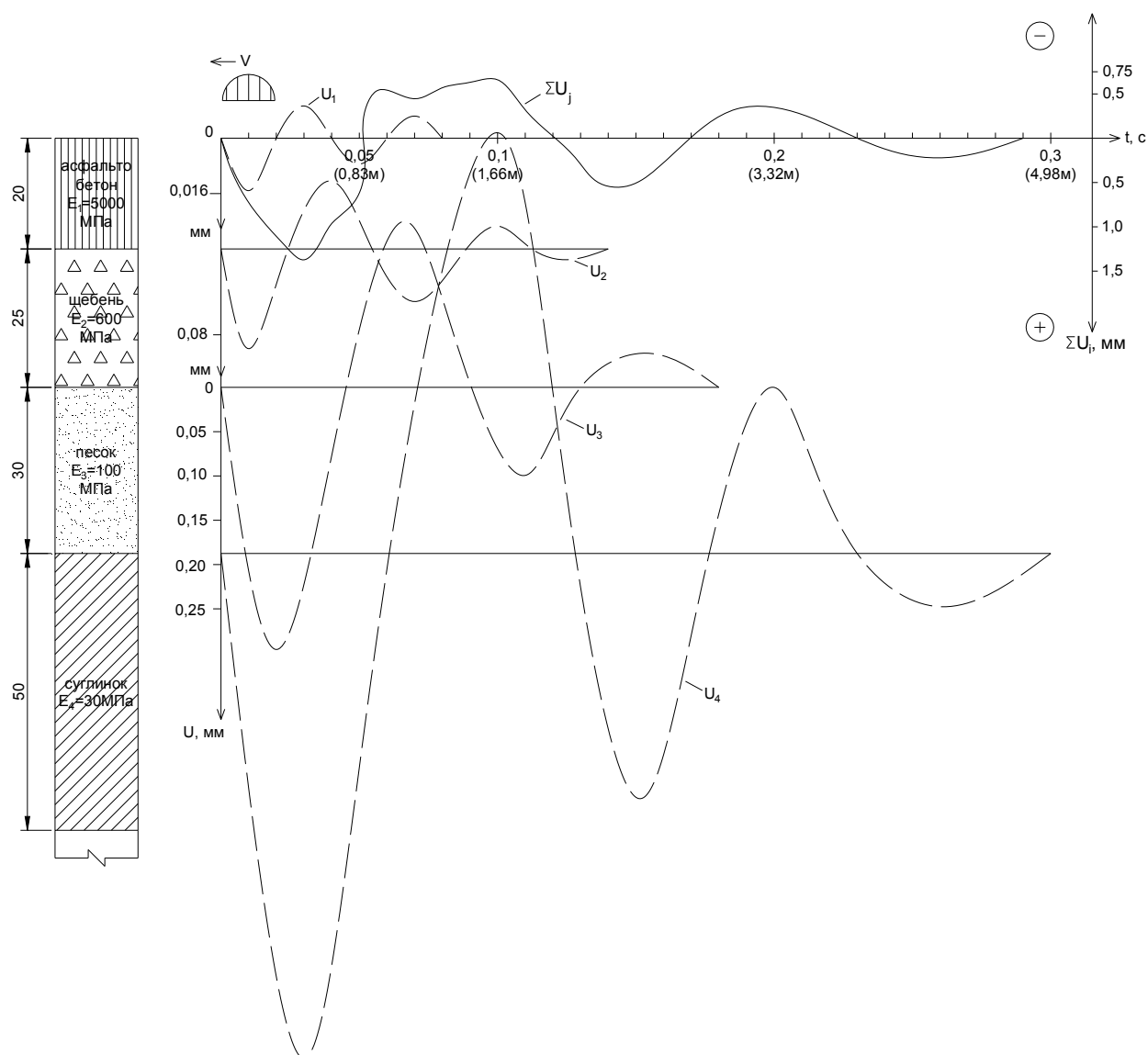


Рис. 1. Колебания поверхности  $\Sigma u_i$  и 4-х слоев конструкции ( $u_1, u_2, u_3, u_4$ ) при  $V=60$  км/ч и  $P=50$  кН ( $D=34$  см)

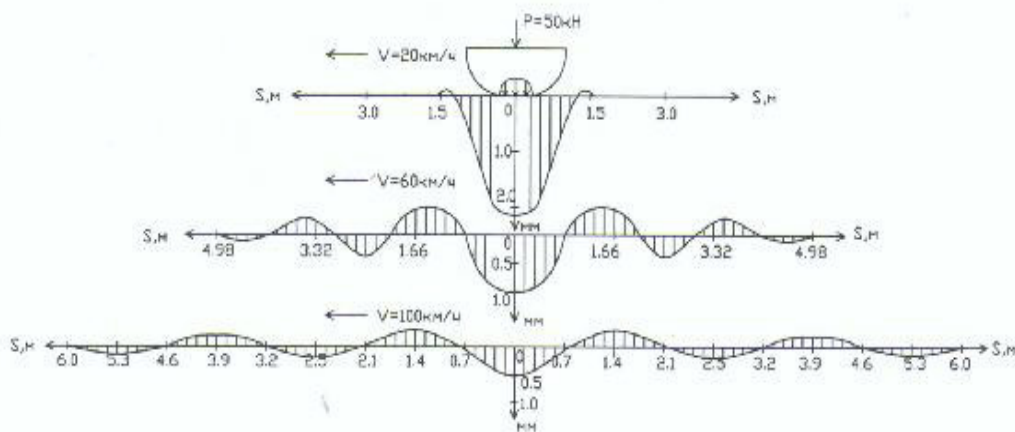


Рис. 2. Формы вертикальных колебаний поверхности четырехслойной дорожной конструкции

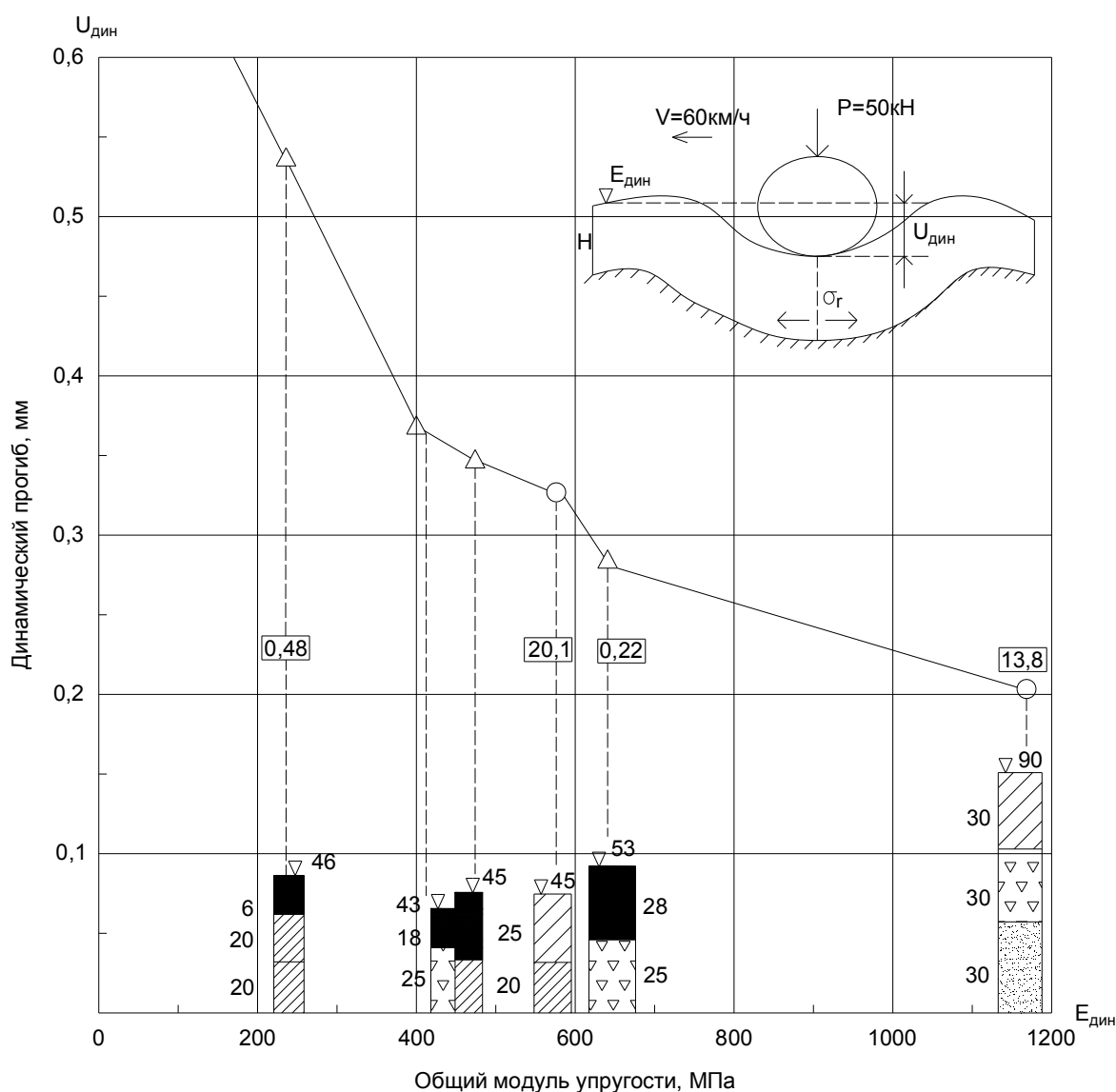


Рис. 3. Зависимость динамического прогиба ( $U_{дин.}$ ) и напряжений растяжения при изгибе  $\sigma_r$  в покрытии, слоистых дорожных конструкциях от их общей упругости конструкции  $E_{дин.}$

■ - асфальтобетон; ▨ - цементобетон; ▩ - укрепленный цементогрунт;  
 ▧ - щебень; ▫ - песок

#### Библиографический список

1. Андреева, Е.В. Современные методы проектирования дорожных конструкций автомагистралей на воздействие транспортных потоков / Е.В. Андреева, А.В. Смирнов. – СибАДИ, 2014. – 135 с.
2. Смирнов, А.В. Механика дорожных конструкций / А.В. Смирнов, А.С. Александров. – Омск: СибАДИ, 2009. – 211 с.
3. Андре Анго Математика для электро и радиоинженеров. – Наука, Москва, 1964. – 771 с.
4. Смирнов, А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог / А.В. Смирнов. – Омск: Зап.-Сиб. Изд-во, 1975. – 182 с.

5. Smirnov A.W. Dr-Ing, Jordan K. Dr-ing Besonderheiten der Formänderungen von Stabkonstruktionen unter der Einwirkung von rollenden Kraftfahrzeugbelastungen. Zeitschrift «Die Strasse» №5, 1973. DDR. Berlin.
6. Смирнов, А.В. Требования к материалам для армирования покрытий автомобильных дорог и аэродромов / А.В. Смирнов, В.В. Приходько // Новости в дорожном деле: научно-технический информационный сборник / Министерство транспорта РФ. – М.: 2010. – № 3. – С.23-50.
7. Смирнов, А.В. К расчету дорожных одежд с цементогрунтовыми основаниями / А.В. Смирнов

// Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1968. – № 9. – С. 78-82.

8. Смирнов, А.В. Измерение прогибов дорожной одежды при движении автомобилей / А.В. Смирнов, А.Г. Малофеев // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – С. 11-12.

9. Смирнов, А.В. Колебания дорожных одежд при воздействии автомобилей / А.В. Смирнов, А.Г. Малофеев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – № 7. – С. 25-29.

10. Смирнов, А.В. Экспериментальное исследование волн колебаний дорожных покрытий при движении автомобиля / А.В. Смирнов, А.Г. Малофеев // Прикладная механика. – Киев, 1973. – С. 50-52.

#### DYNAMIC PROCESSES IN ROAD DESIGNS HIGHWAYS

A.V. Smirnov, E.V. Andreyeva, V. F. Ignatov

**Abstract.** The models loading layers of the multi-layer road construction under the influence of the moving vertical load was reviewed, as well as forms of forced and natural vibrations. By numerical analysis are set to dynamic deflection, the speed and acceleration of vibration, dynamic compressive stress - strain, which is a measure of strength, also a benchmark for testing road construction materials on endurance

**Keywords:** dynamic deflection, vibrations speed and acceleration, impulse tension.

#### References

1. Andreeva E.V., Smirnov A.V. *Sovremennye metody pro-ektirovaniya dorozhnykh konstrukcij avtomagistralej na vozdejstvije transportnyh potokov* [Modern methods of design of road designs of highways on influence of transport streams]. Omsk, SibADI, 2014. 135 p.

2. Smirnov A.V., Aleksandrov A.S. *Mehanika dorozhnykh konstrukcij* [Mekhanika of road designs]. Omsk: SibADI, 2009. 211 p.

3. Andre Ango *Matematika dlja jelektro i radioinzhenierov* [Matematika for electro and radio engineers]. Nauka, Moskva, 1964. 771 p.

4. Smirnov A.V. *Dinamika dorozhnykh odezhd avtomobil'nyh dorog* [Dinamika of road clothes of highways]. Omsk: Zap.Sib. Izd-vo, 1975. 182 p.

5. Smirnov A.W. Dr-Ing, Jordan K. Dr-ng Besonderheiten der Formänderungen von Stabkonstruktionen unter der Einwirkung von rollenden Kraftfahrzeugbelastungen. Zeitschrift «Die Strasse» №5, 1973.DDR. Berlin.

6. Smirnov A.V., Prihod'ko V.V. Trebovaniya k materialam dlja armirovaniya pokrytij avtomobil'nyh dorog i ajerodromov [Requirements to materials for reinforcing of coverings of highways and airfields].

*Novosti v dorozhnom dele: nauchno-tehnicheskij informacionnyj sbornik, Ministerstvo trans-porta RF, Moscow, 2010, no 3. pp. 23-50.*

7. Smirnov A.V. K raschetu dorozhnyh odezhd s cementogruntovymi osnovanijami [To calculation of road clothes with the tsementogruntovy bases]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1968, no 9. pp. 78-82.

8. Smirnov A.V., Malofeev A.G. Izmerenie progibov do-rozhnoj odezhd pri dvizhenii avtomobilej [Measurement of deflections of road clothes at the movement of cars]. *Avtomobil'nye dorogi*, 1972, № 6. pp. 11-12.

9. Smirnov, A.V, Malofeev A.G. Kolebanija dorozhnyh odezhd pri vozdejstvii avtomobilej [Fluctuations of road clothes at influence of cars]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1972, no 7. pp. 25-29.

10. Smirnov A.V., Malofeev A.G. *Jeksperimental'noe issle-dovanie voln kolebanij dorozhnyh pokrytij pri dvizhenii avtomobilja* [Experimental research of waves of fluctuations of pavings at the movement car]. *Prikladnaja mehanika*. Kiev, 1973. pp. 50-52.

*Смирнов Александр Владимирович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Заслуженный деятель науки РФ (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).*

*Андреева Елена Владимировна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент За-ведующий кафедрой "Строительство и эксплуатация дорог" ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).*

*Игнатов Виталий Федорович (Россия, г. Омск) – старший преподаватель кафедры "Строительство и эксплуатация дорог" ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5).*

*Smirnov Alexander Vladimirovich (Russian Federation, Omsk) – doctor technical, professor of The Siberian automobile and highway academy (SibADI), the Honored worker of science of the Russian Federation (644080, Omsk, Mira Ave., 5).*

*Andreyeva Elena Vladimirovna (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, the associate professor the Head of the department "Construction and operation of roads" of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: andreeva402@mail.ru).*

*Ignatov Vitaly Fedorovich (Russian Federation, Omsk) – the senior teacher of "Construction and Operation of Roads" of The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5).*