

Моделирование системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон»

Д.И. Перебейнос

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: В настоящей работе рассматриваются результаты моделирования системы «вибрационный валец - уплотняемый асфальтобетон». Дан анализ состояния качества уплотнения асфальтобетонной смеси методом непрерывного контроля уплотнения асфальтобетона, а также влияния поведения колеблющейся массы катка на вязкостные свойства асфальтобетона. Разработана математическая модель, позволяющая учитывать влияние изменяющихся в процессе уплотнения свойств асфальтобетона на характеристики колебаний вибрационного вальца. Получены спектр ускорений вибрационного вальца и график зависимости напряжения асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения. Разработанная модель позволяет определять изменения свойств уплотняемого материала и характер колебаний вибровальца. Определено, что происходит смена режима работы вибрационного катка с постоянного контакта на режим частичного отрыва вибрационного вальца, с последующим переходом в режим «двойного прыжка».

Ключевые слова: вибрационный валец, асфальтобетон, уплотнение материала, динамическая модель, характеристики колебаний, спектр ускорений.

Введение.

При исследовании процессов уплотнения дорожного материала применяются методы математического моделирования. Используются передаточные функции, моделирование технологических процессов в среде «MATLAB&Simulink» и других программных комплексов. К наиболее значимым исследованиям последних лет, посвященным вопросам теории математического моделирования процесса уплотнения слоев дорожных одежд, справедливо отнести работы таких отечественных ученых, как: Пермяков В.Б., Иванченко С.Н., Носов С.В., Тюремнов И.С., Прокопьев А.П. а также зарубежных: Anderegg R., Briaud J.L., Chang G. и другие.

В исследованиях [1 – 2] рассматривается вопрос проектирования дорожных машин методом пространства состояний. Согласно ему колебательный процесс уплотняющих машин зависит от реологических свойств уплотняемого материала, что в результате влияет на технические

характеристики машин и отражается на технических решениях при их проектировании.

На данный момент активно развивается направление по разработке неразрушающих методов контроля уплотнения [3], а также технологии интеллектуального уплотнения на базе искусственных нейронных сетей, с целью формирования простого и точного метода оценки качества уплотнения дорожных покрытий. В работах [4 – 5] приведена нейросетевая система контроля уплотнения материала с помощью программного комплекса MATLAB, с возможностью обучения и прогнозирования коэффициента уплотнения дорожных одежд. Как итог моделирования искусственной нейронной сети, авторами был получен график изменения коэффициента уплотнения асфальтовой смеси с ошибкой прогнозирования менее 10 %, что подтверждает эффективность выбранного метода.

В работе [6] рассмотрены методы повышения качества устройства дорожного полотна, основанные на реологическом подходе к совершенствованию технологий уплотнения дорожно-строительных материалов.

В работе [7] приведены разработки по созданию катков с отечественной системой контроля уплотнения DMControl. Для данной системы было предложено использовать новый показатель «Compaction Value» (CV), отличающийся расширенным диапазоном учитываемых сигналов.

В работе [8] авторы предлагают рассмотреть каток и уплотняемый им материал, как единую систему, в которой образуются различные колебательные структуры, зависящие от степени уплотнения. В качестве исходных данных в работе приняты сигналы виброускорения оси

уплотняющего органа дорожного катка, полученные на испытательном полигоне при помощи акселерометров.

В работах [9 – 10] система «вибрационный валец – уплотняемый материал» рассматривается, как одномассная нелинейная динамическая модель для вибрационных катков и выглаживающих плит. Результатом исследований являются предложенные авторами дифференциальные уравнения контактной силы, вертикальных ускорений вибровальца, рамы катка и поверхности уплотняемого слоя дороги.

Недостатком приведенных математических моделей является невозможность учета меняющейся реологии материалов в процессе уплотнения. Для решения обозначенной проблемы разработана математическая модель «вибрационный валец – уплотняемый асфальтобетон», позволяющая учитывать влияние свойств асфальтобетона на характеристики колебаний вибрационного вальца.

Описание объекта исследования.

Для описания процесса уплотнения асфальтобетона будем использовать реологическую модель, показанную на рис. 1. Модель учитывает динамику колебаний вибрационного вальца и реологические свойства уплотняемой среды. Первая часть модели имеет явно выраженные упруго-диссипативные связи между пригрузом и вальцом. Валец катка уплотняет материал на величину x_2 . Со стороны дорожного полотна на валец действует реакция уплотняемого материала. Блок асфальтобетонной смеси рассматривается как упруго-диссипативная система. Основание дорожного полотна выполнено в виде упругого элемента.

Упругая деформация системы предшествует пластической и исчезает со снятием нагрузки. Пластическая деформация материала после снятия нагрузки остается. На практике используется понятие напряжения, как

отношение нагрузки к площади контакта рассматриваемой системы. За пластической деформацией тела следует его разрушение.

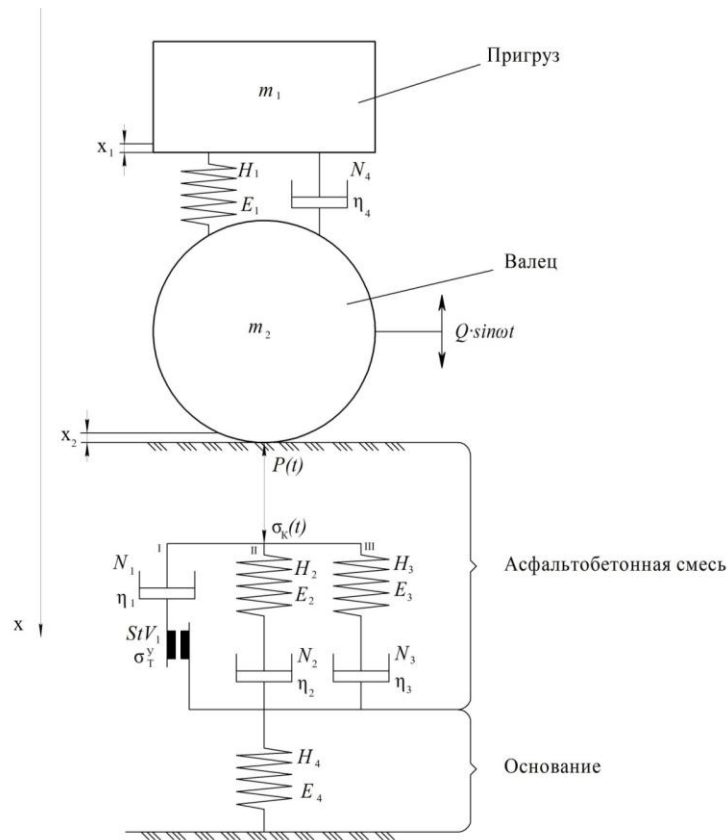


Рис. 1. – Модель уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком : N – модель Ньютона; η – вязкость модели Ньютона; H – модель Гука; E – модуль упругости по модели Гука; StV – модель Сен-Венана; σ_т – предел текучести модели Сен-Венана.

Дифференциальные уравнения колебательной системы катка (1), запишутся следующим образом:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + b \left(\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right) + c [x_1(t) - x_2(t)] = m_1 g ; \\ m_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} - b \left(\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right) - \\ - c [x_1(t) - x_2(t)] = Q \sin(\omega t) + m_2 g - P(t), \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – масса пригруза, кг; m_2 – масса вальца, кг; x_1, x_2 – вертикальное перемещение корпуса катка и вибровальца, соответственно, м; b – коэффициент вязкого трения амортизаторов, Па·с/м; c – жесткость резиновых амортизаторов, Н/м; Q – вынуждающая сила вибровозбудителя, Н; ω – угловая частота вращения дебалансного вала, рад/с; t – текущее время вибрационного воздействия, с; $P(t)$ – реакция уплотняемого материала на валец, Н.

Реализация модели (рис. 1) выполнена в программе MATLAB&Simulink. На рис. 2 приведен спектр ускорений колебательного процесса вибровальца катка при $b = 160 \frac{\text{кН}\cdot\text{с}}{\text{м}}$, $c = 75 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$.

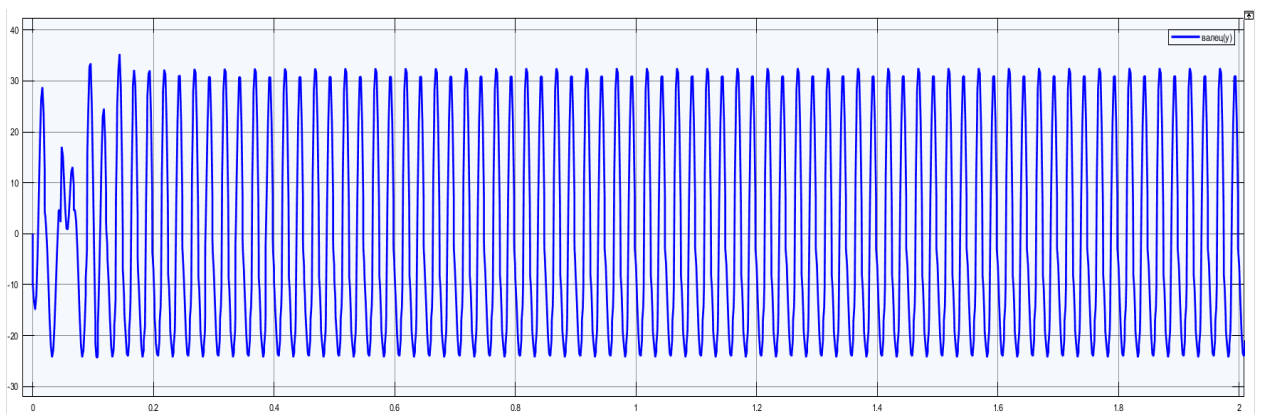


Рис. 2. – Спектр ускорений вибровальца

Колебательный процесс вибровальца синусоидальный. В начальный момент работы вибровозбудителя наблюдается несколько гармоник. Через 0,1 с процесс стабилизируется с явно выраженной основной гармоникой. В дальнейшем по ходу моделирования каждый цикл колебаний сопровождается отрывом рабочего органа от поверхности с сохранением синусоидального характера. Однако при переходе из режима частичного отрыва в режим «двойного прыжка» характер колебаний вибрационного вальца изменяется на субгармонический.

Напряженно-деформированное состояния асфальтобетона описывается системой уравнений (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_K C \frac{1}{\sigma_1^2 \operatorname{tg} \varphi} \frac{d\sigma_1}{dt} + E_K \frac{\sigma_1 - C}{\sigma_1 \operatorname{tg} \varphi} + \sigma_1 = \eta_K \frac{d\varepsilon}{dt} + E_K \varepsilon \\ \frac{\eta_M}{E_M} \frac{d\sigma_2}{dt} + \sigma_2 = \eta_M \frac{d\varepsilon}{dt} \\ \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma \end{array} \right. \quad (2)$$

где E_K, η_K – модуль деформации и вязкость асфальтобетона (Кельвиновская); E_M, η_M – модуль деформации и вязкость асфальтобетона (Максвелловская); σ_1, σ_2 – напряжения в асфальтобетоне; C – сопротивление асфальтобетона сдвигу; φ – угол внутреннего трения; ε – деформация асфальтобетона.

Исследование напряжённого состояния асфальтобетона в процессе укатки также выполнено в MATLAB&Simulink (рис. 3).

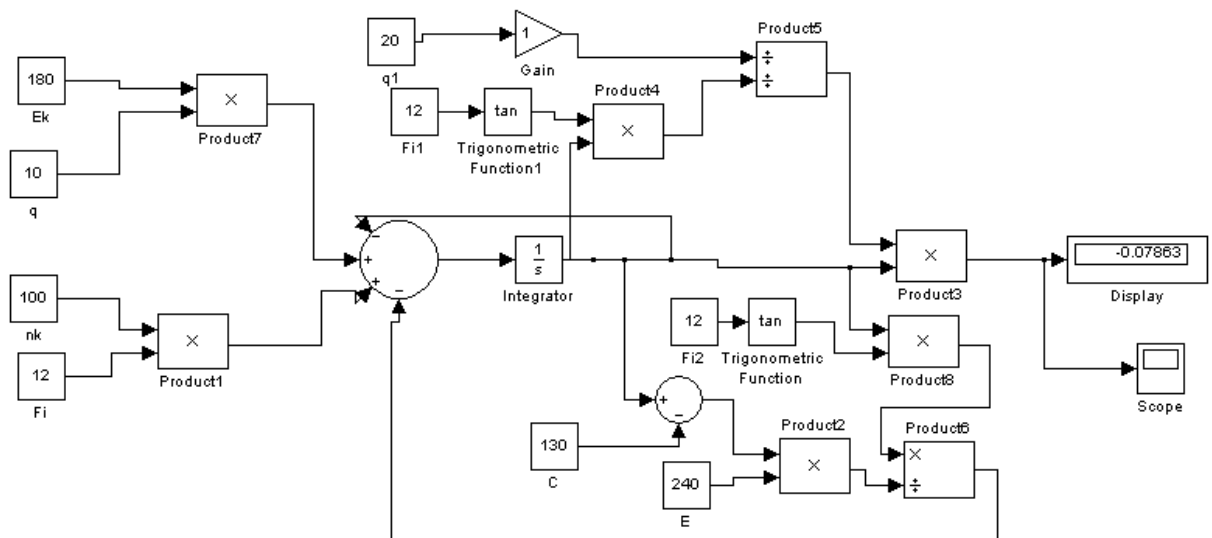


Рис. 3. – Блок схема реологической модели асфальтобетона в процессе укатки

Результаты математического моделирования напряженного состояния асфальтобетона приведены на рис. 4.

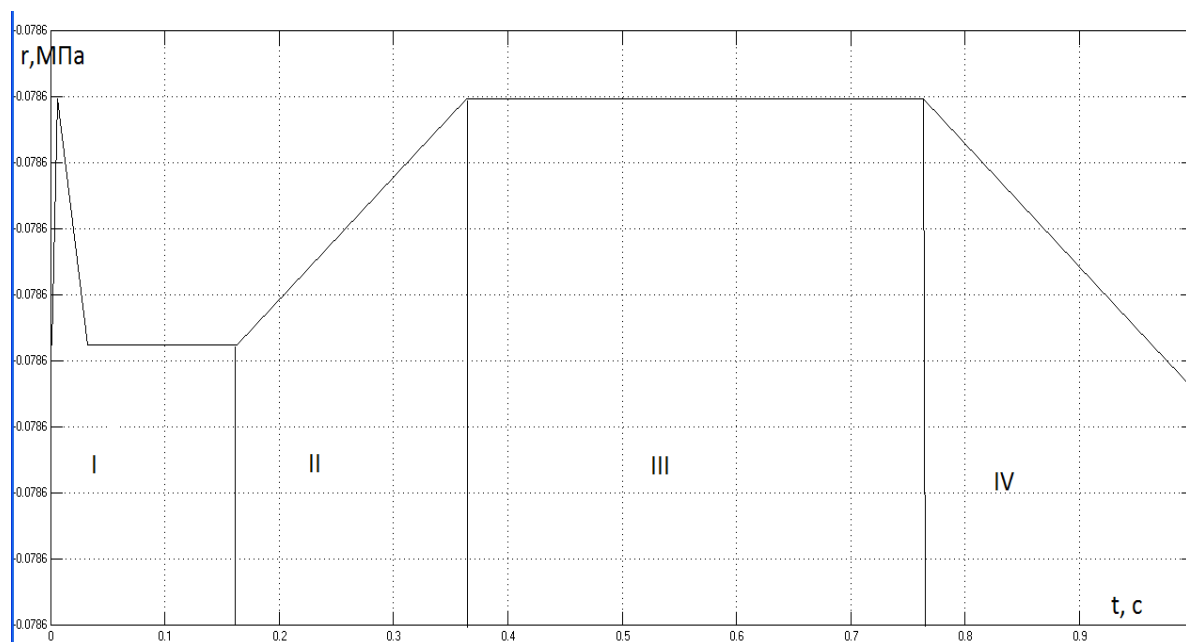


Рис. 4. – Графическая зависимость напряженного состояния асфальтобетона, без учета остаточной деформации

Процесс уплотнения асфальтобетона разделен на четыре основные стадии. В первой стадии происходит его деформирование с равномерным распределением напряжений. Вторая стадия обусловлена набором прочности асфальтобетона. Третья стадия протекает в равномерном режиме уплотнения. В четвертой стадии снятие нагрузки вызывает релаксацию напряжений и определяет необходимость дополнительного уплотнения.

Выводы

Предложенная модель «вибрационный валец – уплотняемый асфальтобетон» показывает динамику распределения напряжений в асфальтобетоне и учитывает изменение режимов работы вибровальца при уплотнении.

При увеличении значения коэффициента жесткости асфальтобетона также меняются спектры ускорений вибрационного вальца. При работе вибрационного катка в постоянном контакте с поверхностью на спектре ускорений видна лишь гармоника на рабочей частоте вибрационного катка, без проявления других гармоник и субгармоник.

Литература

1. Пермяков В. Б., Дубков В. В., Серебренников В. С. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком // Омский научный вестник. – 2008. – № 1(64). – С. 67-71.

2. Зубков А. Ф., Однолько В. Г. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. – Москва: Машиностроение, 2009. – 224 с.

3. Яворский О.В., Чернов С.А., Ширяев Н.И. Оценка качества производства работ по устройству верхних слоев покрытия автомобильных дорог неразрушающим методом // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.

4. Прокопьев А. П., Емельянов Р. Т., Иванчура В. И. Методы управления технологическими процессами строительства асфальтобетонных покрытий: монография // М-во образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный ун-т, [Инженерно-строительный ин-т]. – 2-е изд., перераб. и доп.. – Красноярск: СФУ, 2012. – 255 с.

5. Прокопьев А. П., Емельянов Р. Т., Янаев Е. Ю. и др. Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465.

6. Носов С. В. Концепция совершенствования технологий уплотнения дорожных грунтов и асфальтобетонных смесей на основе развития их реологии // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2012. – № 1(20). – С. 86-94.

7. Тюремнов И. С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования

и «Интеллектуальное уплотнение» // Вестник ТОГУ. – 2016. – № 2(41). – С. 115-122.

8. Briaud J. L., Seo J. Intelligent compaction: overview and research needs // Texas A&M University. – 2003. – pp. 84.

9. Chang G., Xu O., Rutledge J. A Study on Intelligent Final Report Compaction and In-Place Asphalt Density // 2014. – pp. 309. URL: rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38554.

10. Anderegg, R., Dominik A., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // Intelligent compaction. URL: researchgate.net/publication/239543578_Compaction_Monitoring_Using_Intelligent_Soil_Compactors.

References

1. Permyakov V. B., Dubkov V. V., Serebrennikov V. S. Omskij nauchnyj vestnik. 2008. № 1(64). pp. 67-71.

2. Zubkov A. F., Odnol'ko V. G. Tehnologija stroitel'stva asfal'tobetonyh pokrytij avtomobil'nyh dorog [Technology of construction of asphalt concrete pavement of highways]. Moskva: Mashinostroenie, 2009. 224 p.

3. Javorskij O.V., Chernov S.A., Shirjaev N.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4845.

4. Prokop'ev A. P., Emel'janov R. T., Ivanchura V. I. Metody upravlenija tehnologicheskimi processami stroitel'stva asfal'tobetonyh pokrytij [Methods for managing technological processes in the construction of asphalt concrete pavements]: monografija. M-vo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii, Sibirskij federal'nyj un-t, [Inzhenerno-stroitel'nyj in-t]. 2-e izd., pererab. i dop.. Krasnojarsk : SFU, 2012. 255 p.

5. Prokop'ev A. P., Emel'janov R. T., Janaev E. Ju. i dr. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7465.



6. Nosov S. V. Vestnik Lipeckogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2012. № 1(20). pp. 86-94.
7. Tjurenov I. S. Vestnik TOGU. 2016. № 2(41). pp. 115-122.
8. Briaud J. L., Seo J. Texas A&M University. 2003. pp. 84.
9. Chang G., Xu O., Rutledge J. 2014. pp. 309. URL: rosap.nsl.bts.gov/view/dot/38554.
10. Anderegg, R., Dominik A., Kaufmann K. Intelligent compaction. URL: researchgate.net/publication/239543578_Compaction_Monitoring_Using_Intelligent_Soil_Compactors.