

*На правах рукописи*

**КОНДРАШОВ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КАТКА ДЛЯ  
УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ДОРОЖНЫХ  
ПОКРЫТИЙ**

Специальность: **05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-  
транспортные машины**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **доктор технических наук, профессор  
Шестопалов Александр Андреевич**

Официальные оппоненты: **Иванченко Сергей Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тихоокеанский  
государственный университет», ректор,  
г. Хабаровск;

**Носов Сергей Владимирович**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный  
технический университет», профессор  
кафедры «Транспортные средства и  
техносферная безопасность»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Ярославский  
государственный технический  
университет»**

Защита диссертации состоится «21» апреля 2016 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190103, г. Санкт-Петербург, ул. Курляндская, д. 2/5, аудитория 340-К.

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте [www.spbgasu.ru](http://www.spbgasu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

Олещенко Елена Михайловна

## I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы.** Рост экономики страны и ее территориальная целостность, транспортная мобильность населения, а также повышение уровня национальной безопасности во многом определяются наличием развитой сети автомобильных дорог государства. В настоящее время дорожное строительство России отстает от развития ее народного хозяйства и тормозит дальнейшее расширение его масштабов. В нашей стране насчитывается всего 670 тыс. км дорог общего пользования, в то время как в Китае данный показатель превосходит 1900 тыс. км, а в США 6200 тыс. км. Более 30% федеральных автомагистралей и 60% дорог местного значения не удовлетворяют нормативным требованиям по своим прочностным характеристикам, ровности и сцепным свойствам. При этом в России стоимость строительства одного километра дорожного покрытия в 2 раза выше, чем в европейских странах, а также в 5 раз выше по сравнению с Китаем. Основными причинами возникновения сложившейся ситуации являются низкая производительность технологии укатки горячих асфальтобетонных смесей, несовершенство применяемой строительной техники и преждевременное разрушение автомобильных дорог, вызванное главным образом недостаточным уплотнением покрытия.

Применяемые в настоящее время дорожные катки не могут выполнять укатку смеси на протяжении всего процесса уплотнения вследствие их неуниверсальности и узкого диапазона регулирования силовых воздействий. В результате возникает необходимость содержания большого парка дорожных машин, и сохраняется потребность в использовании комплекта катков с различными контактными давлениями, оказываемыми на уплотняемый материал, с постоянно изменяющимися физико-механическими свойствами. В связи с этим существующая технология уплотнения отличается сложной организацией, высокой зависимостью от человека и большим количеством вынужденных простоев оборудования. Это приводит к снижению производительности катков в составе комплекта машин и увеличению себестоимости укатки дорожного покрытия.

Таким образом, существующие средства уплотнения асфальтобетонных смесей являются неэффективными с точки зрения производительности и себестоимости укатки, что обуславливает потребность в создании многофункционального дорожного катка, исследовании и разработке методов расчета его параметров.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиям, направленным на совершенствование конструкций дорожных катков и формирование теории уплотнения асфальтобетонных смесей, посвящены научные труды Бабкова В.Ф., Батракова О.Т., Варганова С.А., Захаренко А.В., Зубкова А.Ф., Иванченко С.Н., Калужского Я.А., Носова С.В., Пермякова В.Б., Прусова А.Ю., Путка А.И., Репина С.В., Хархуты Н.Я., Чабуткина Е.К., Шестопалова А.А. и многих других. Среди зарубежных специалистов в этом направлении можно отметить работы Akesson F.,

Beainy F., Darabi M.K., Dongre R., Geske D.M., Huan Q., Kole L.L., Rakowski S., Ryan S., Pellinen T.K., Scherocman J.A., Schwartz C.W, Serafin P.J., West R.C., Witczak M.W. Однако существующие проблемы, возникающие при создании новой уплотняющей техники, определении рациональных параметров катков, подборе комплекта дорожных машин и установлении режимов их работы, в исследованиях перечисленных авторов не были решены.

Недостатком существующих дорожных катков выступает отсутствие конструктивной возможности изменения в широких пределах контактных давлений, оказываемых рабочими органами на слой смеси, вызванные этим ограничения по температурному диапазону использования и необходимость введения в работу нескольких машин с различными силовыми показателями на соответствующих стадиях укатки.

На практике назначение дорожных машин производится зачастую полуэмпирическим путем, так как установление рациональных параметров катков крайне затруднительно вследствие наличия большого количества факторов, оказывающих влияние на процесс взаимодействия их рабочих органов с уплотняемым материалом.

Известные методики определения параметров средств уплотнения не учитывают изменение прочностных и деформативных свойств рабочей среды во время укатки, что не позволяет установить рациональные значения контактных давлений катков, обеспечивающие получение качественного покрытия и достижение максимальной производительности работ.

**Целью работы** является исследование и разработка методов расчета параметров многофункционального катка для повышения эффективности процесса уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий.

#### **Задачи исследования:**

- разработать математическую модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью;
- разработать методику определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения;
- разработать методику расчета параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий;
- разработать алгоритм расчета и программный продукт для определения рациональных параметров и режимов работы дорожных катков;
- определить рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения.

**Объект исследования** – процесс уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий многофункциональным катком.

**Предмет исследования** – рациональные конструктивные и технологические параметры многофункционального катка.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих результатов:

1. Уточнена математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью за счет учета состава материала и изменения его физико-механических свойств во время укатки посредством использования динамического модуля деформации слоя.

2. Уточнена методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей при значениях коэффициента уплотнения и температуры, соответствующих процессу укатки слоя дорожными катками.

3. Разработана методика расчета параметров многофункционального катка и режимов его работы, позволяющая повысить эффективность процесса уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий.

4. Впервые определены рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения, позволяющие обеспечить максимальную производительность и гарантировать качество укатки дорожного покрытия.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в уточнении математической модели взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью за счет учета изменения физико-механических свойств рабочей среды в процессе уплотнения.

**Практическая значимость** диссертационного исследования состоит в применении уточненной методики расчета параметров многофункционального катка для создания нового средства уплотнения, а также использовании уточненной методики определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе укатки при назначении рационального комплекта дорожных катков и установлении режимов их работы.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Методологической основой диссертационного исследования выступают работы отечественных и зарубежных авторов, методические материалы и нормативные акты в области уплотнения горячих асфальтобетонных смесей дорожными катками. Решение поставленных задач базируется на известных теоретических положениях процесса взаимодействия рабочих органов катков с уплотняемым слоем, методах математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных и системном подходе к описанию объектов исследования.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- уточненная математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью, учитывающая состав и изменение ее физико-механических свойств во время укатки;
- уточненная методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей при значениях коэффициента уплотнения и температуры, соответствующих процессу укатки слоя дорожными катками;

– методика расчета параметров многофункционального катка и режимов его работы, позволяющая повысить эффективность процесса уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий;

– рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения, позволяющие обеспечить максимальную производительность и гарантировать качество укатки дорожного покрытия.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины, а именно п.2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения» и п.3 «Совершенствование технологических процессов на основе новых технических решений конструкций машин».

**Степень достоверности результатов** базируется на использовании фундаментальных и достоверно изученных положений теории уплотнения, применении апробированных аналитических зависимостей, характеризующих процессы, протекающие в слое асфальтобетонной смеси, использовании развитого математического аппарата, современных вычислительных методов и известной методики планирования и проведения эксперимента, а также на качественном и количественном согласовании полученных результатов исследования с экспериментальными данными.

**Апробация результатов.** Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы были представлены на международных научно-практических конференциях: III-й и IV-й международных научно-практических конференциях «Современное машиностроение: наука и образование» (г. Санкт-Петербург, 2013 и 2014 года), на XLII-й научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (г. Санкт-Петербург, 2013) и научном форуме с международным участием «XLIII Неделя науки СПбПУ» (г. Санкт-Петербург, 2014 год), а также на семинарах кафедры «Транспортные и технологические системы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Уточненная методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе укатки внедрена на предприятии ООО «Строительная компания «Орион плюс» при назначении рационального комплекта дорожных катков и установлении режимов их работы, что подтверждается соответствующим актом.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке специалистов по направлению «Наземные транспортно-технологические средства» и магистров по программе «Строительные и дорожные машины» направления «Наземные транспортно-технологические комплексы».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ общим объемом 1,8 п.л., в том числе 4 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация изложена на 152 страницах печатного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 196 источников, и двух приложений на 16 страницах. В работе представлено 44 рисунка, 13 таблиц и 99 формул.

*Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.*

*В первой главе* выполнен анализ существующих катков и режимов их работы на различных стадиях укатки смеси, рассмотрены физико-механические характеристики материала, изменяющиеся в процессе уплотнения, обоснованы проблемы использования дорожных машин вследствие низкой универсальности и сложности определения их рациональных параметров, выполнен анализ традиционной технологии уплотнения асфальтобетонных покрытий, обоснована цель и задачи исследования.

*Во второй главе* представлена конструктивная схема многофункционального катка, проведены теоретические исследования расчетных схем нагружения дорожных покрытий рабочими органами машин, разработана уточненная модель взаимодействия вальцов катков с уплотняемым материалом и методика расчета динамического модуля деформации слоя, обоснована необходимость экспериментального определения прочностных свойств асфальтобетонных смесей в диапазоне температур, соответствующем укатке.

*В третьей главе* представлено проведенное экспериментальное исследование асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения, разработана уточненная методика определения их прочностных характеристик, выполнен анализ совокупного влияния температуры, коэффициента уплотнения и скорости приложения нагрузки, произведена статистическая обработка результатов полного факторного эксперимента, и получены закономерности изменения предела прочности материала во время укатки, позволяющие определить рациональные значения контактных давлений под рабочими органами дорожных машин и разработать методику расчета параметров многофункционального катка и режимов его использования.

*В четвертой главе* представлены разработанная методика расчета параметров многофункционального катка для уплотнения асфальтобетонных смесей, алгоритм проведения вычислений на ЭВМ и программный продукт для автоматизации выполняемых расчетов, определены рациональные массогабаритные и технологические характеристики рассматриваемой дорожной машины.

## II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

**1. Уточнена математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью за счет учета состава материала и изменения его физико-механических свойств во время укатки посредством использования динамического модуля деформации слоя.**

Проведенный анализ существующих математических моделей взаимодействия вальцов катков с рабочей средой позволил установить, что данные расчетные схемы не учитывают влияние состава асфальтобетонной смеси и изменение ее физико-механических свойств в процессе укатки.

На основе анализа расчетных схем укатки асфальтобетонной смеси гладковальцовным статическим, вибрационным и пневмошинным катком разработана обобщенная модель рабочего органа в процессе нагружения смеси и определена зависимость для расчета контактных давлений, оказываемых на слой каждым из вышеперечисленных типов вальцов:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB_{экв}}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB_{экв}}(t) \cdot B} \cdot \chi \cdot \sin \omega t - \frac{(\psi \cdot m_1 + m_2)}{L_{AB_{экв}}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}; \quad (1)$$

где  $\sigma_k$  – контактные давления, Па;  $m_1$  – масса пригруза катка, кг;  $m_2$  – масса рабочего органа, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $B$  – ширина вальца, м;  $Q$  – центробежная сила, Н;  $\chi$  – коэффициент, учитывающий вид нагружения;  $\omega$  – угловая частота вала вибровозбудителя, рад/с;  $t$  – время колебания, с;  $\psi$  – коэффициент, учитывающий передачу возмущений на раму катка;  $h$  – толщина слоя, м;  $\varepsilon$  – относительная деформация слоя;  $L_{AB_{экв}}$  – эквивалентная длина дуги контакта рабочего органа с уплотняемым слоем, м.

Для гладкого металлического катка  $L_{AB_{экв}}$  не отличается от абсолютной величины длины дуги контакта  $L_{AB_k}$ , а при расчете данного показателя для пневмошинных катков гибкий рабочий орган заменяется жестким колесом эквивалентного диаметра, рассчитываемого следующим образом:

$$D_{экв} = D + \frac{L_{AB_k}^2}{4\Delta e_k}; \quad (2)$$

где  $D_{экв}$  – эквивалентный диаметр жесткого вальца, м;  $D$  – диаметр пневматической шины, м;  $\Delta e_k$  – прирост деформации после одного прохода жесткого вальца, м;  $L_{AB_k}$  – длина дуги контакта жесткого вальца со слоем, м.

В настоящем исследовании развит подход Серебренникова В.С. и Пермякова В.Б. для описания процесса уплотнения материала вибрационным катком. Использование вязкости асфальтобетонной смеси в реологической модели обуславливает необходимость экспериментального определения закономерности изменения данного показателя в процессе укатки для каждого уплотняемого материала, что существенно ограничивает практическое применение данной методики. Для отражения в модели

физико-механических свойств асфальтобетонной смеси осуществлена замена вязкости материала динамическим модулем деформации, и получена модифицированная реологическая модель асфальтобетонной смеси.

В результате совместного рассмотрения обобщенной модели рабочего органа в процессе нагружения слоя и модифицированной реологической модели, получена уточненная математическая модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью, представленная на рисунке 1:

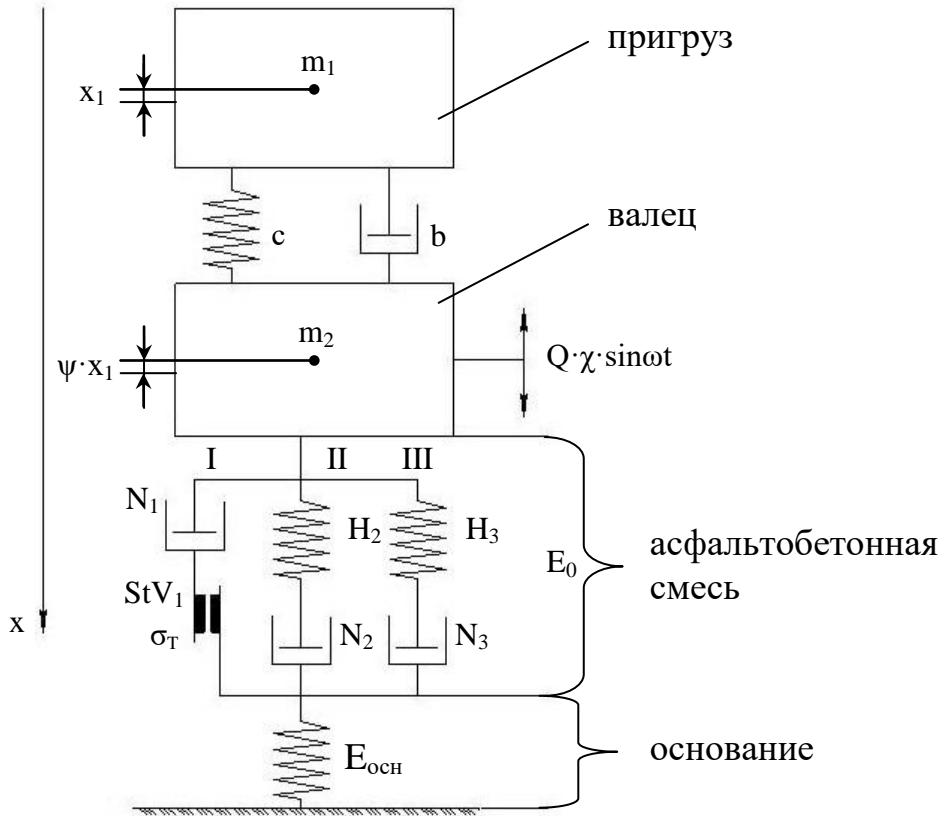


Рисунок 1 – Уточненная модель процесса взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью

Динамический модуль деформации модели вычисляется по формуле:

$$E_m = \frac{\eta_0}{(n+m)} \cdot \left( \frac{n}{\theta_2} + \frac{m}{\theta_3} \right); \quad (3)$$

где  $E_m$  – динамический модуль деформации расчетной модели, Па;  $\eta_0$  – вязкость смеси, Па·с;  $\theta_2, \theta_3$  – время «быстрой» и «медленной» релаксации напряжений во втором и третьем блоках соответственно, с;  $n, m$  – безразмерные коэффициенты, отражающие распределение напряжений между вторым и третьим блоком соответственно.

Общая передаточная функция реологической модели примет вид:

$$\sum W(p) = \frac{\sigma_k}{\varepsilon} = \frac{\sigma_T}{\varepsilon} + \frac{n \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_2 + 1)} + \frac{m \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_3 + 1)}, \quad (4)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести асфальтобетонной смеси, превышение которого приводит к развитию пластических деформаций, Па.

После приведения дробей к общему знаменателю получена взаимосвязь модуля деформации модели и относительной деформации слоя:

$$(n+m) \cdot E_m(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{(n+m)^2 \cdot E_m(t) \cdot \theta_2 \cdot \theta_3}{n \cdot \theta_3 + m \cdot \theta_2} \cdot \frac{d \varepsilon}{dt} = \\ = \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m \cdot \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + (\sigma_k - \sigma_T) + (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} \quad (5)$$

Для учета влияния толщины материала на деформативные свойства смеси составлена аналитическая зависимость, описывающая предложенную Хархутой Н.Я. графическую закономерность изменения модуля деформации системы от относительной толщины уплотняемого слоя:

$$E_m = E_0 + E_{och}^{(1-h/B)}; \quad (6)$$

где  $E_0$ ,  $E_{och}$  – динамический модуль деформации слоя смеси и основания соответственно, Па;  $B$  – поперечный размер контактной площадки, равный ширине вальца, м.

После подстановки выражения (6) в формулу (5) и одновременного решения с зависимостью (1) получена система дифференциальных уравнений, описывающая уточненную модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = a_0(t) + b_0(t) \cdot \chi \cdot \sin \omega t - c_0(t) \cdot \sigma_k(t), \\ \frac{d^2 \sigma}{dt^2} = c_1 \left[ E_0(t) + E_{och}^{(1-h(t)/B)} \right] \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{c_1 \cdot [E_0(t) + E_{och}^{(1-h(t)/B)}] \cdot (n+m)}{(n\theta_3 + m\theta_2)} \frac{d\varepsilon}{dt} - \\ - c_2 \cdot (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} - c_2(\sigma_k - \sigma_T) \end{cases} \quad (7)$$

где

$$a_0(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (8)$$

$$b_0(t) = \frac{Q}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (9)$$

$$c_0(t) = \frac{L_{AB_{ЭК6}}(t) \cdot B}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (10)$$

$$c_1 = \frac{n+m}{n \cdot m}; \quad (11)$$

$$c_2 = \frac{1}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}; \quad (12)$$

При уплотнении смеси дорожными катками контактные давления под рабочими органами должны превышать предел текучести материала, а для обеспечения качества укатки напряжения, развивающиеся в слое, должны

быть меньше 75% от предела прочности, то есть необходимо выполнение следующего условия:

$$\sigma_T < \sigma_k < 0,75 \cdot \sigma_p; \quad (13)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности материала, Па.

Уточненная математическая модель взаимодействия вальцов катков с асфальтобетонной смесью характеризует динамику рабочих органов дорожных машин в процессе нагружения слоя, отражает влияние состава и изменение свойств материала в процессе укатки, что позволяет с ее помощью вычислять рациональные значения контактных давлений и исходя из этого определять параметры средств уплотнения.

## **2. Уточнена методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей при значениях коэффициента уплотнения и температуры, соответствующих процессу укатки слоя дорожными катками.**

Проведенный анализ моделей прогнозирования динамического модуля деформации асфальтобетонной смеси показал отсутствие существующих методов расчета искомого показателя для неуплотненного материала.

За основу для разработки методики определения динамического модуля деформации асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения принята модель Витчака 1-37А, полученная в результате анализа более двух тысяч различных составов. В стандартном виде данной модели зависимость, связывающая динамический модуль деформации асфальтобетона с его температурой, составом минеральной части и частотой прикладываемой нагрузки, имеет вид:

$$\log_{10} E_0 = 7,588583 + 0,02923\rho_{200} - 0,00177\rho_{200}^2 - 0,00284\rho_4 - 0,0581V_a - \\ - \frac{0,8022V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021\rho_4 + 0,00396\rho_{38} - 0,000017\rho_{38}^2 + 0,00547\rho_{34}}{1 + e^{(2,151411 - 0,3136 \log_{10} f - 0,39353 \log_{10} \eta)}} \quad (14)$$

где  $\rho_{200}$  – отношение материала прошедшего сите 0,075 мм к общему весу, %;  $\rho_4$  – общий остаток на сите 4,75 мм от общего веса, %;  $\rho_{38}$  – совокупный остаток на сите 9,5 мм от общего веса, %;  $\rho_{34}$  – кумулятивный остаток на сите 19 мм от общего веса, %;  $V_a$  – объемное содержание воздушных пор, %;  $V_{beff}$  – эффективная объемная доля битума, %;  $f$  – частота нагружения, Гц;  $\eta$  – вязкость битума, П;

Влияние температуры смеси на ее деформативные характеристики отражено в выражении (14) посредством изменения вязкости битума, соответствующие значения которой рассчитываются при помощи метода температурной чувствительности вязкости (A-VTS) по формуле:

$$\log_{10}(3 + \log_{10} \eta) = A + VTS \cdot \log_{10}(1,8T + 491,67); \quad (15)$$

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

Учет коэффициента уплотнения в изменяемых в процессе укатки показателях асфальтобетонной смеси, таких как объемное содержание воздушных пор и эффективная объемная доля битума, позволяет уточнить

существующую методику расчета и определять модуль деформации на всех стадиях процесса уплотнения:

$$\log_{10} E_0 = 7,588583 + 0,02923\rho_{200} - 0,00177\rho_{200}^2 - 0,00284\rho_4 - \frac{0,0581V_a}{K_y^8} - \frac{0,8022V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021\rho_4 + 0,00396\rho_{38} - 0,000017\rho_{38}^2 + 0,00547\rho_{34}}{1 + e^{(2,151411 - 0,3136\log_{10} f - 0,39353\log_{10} \eta)}} \quad (16)$$

где  $K_y$  – коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси.

Сравнение известных экспериментальных данных с расчетными значениями модуля деформации смеси, вычисленными по разработанной зависимости (16), в широком температурном диапазоне для двух коэффициентов уплотнения смеси показано на рисунке 2:

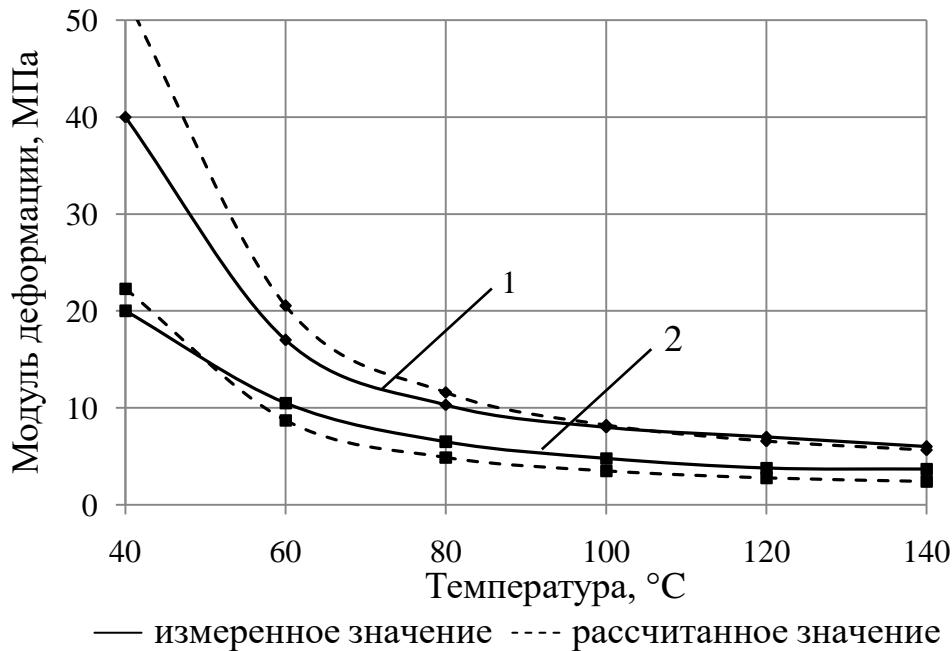


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений динамического модуля деформации: 1 –  $K_y = 0,9$ ; 2 –  $K_y = 0,85$

Представленные результаты вычислений хорошо коррелируют с экспериментальными данными, при этом особенно точными расчеты являются в интервале температур 70-140 °C, что свидетельствует о правомерности применения уточненной методики определения динамического модуля деформации на всех стадиях процесса уплотнения.

В ходе экспериментальных исследований по одноосному сжатию цилиндрических образцов асфальтобетонных смесей производилось уточнение методики определения закономерностей изменения прочностных свойств материала в диапазоне значений, соответствующем укатке.

На основании проведенных однофакторных экспериментов, результаты которых представлены на рисунке 3, установлено, что закономерность изменения предела прочности от температуры и коэффициента уплотнения с высокой степенью точности описывается линейной зависимостью.

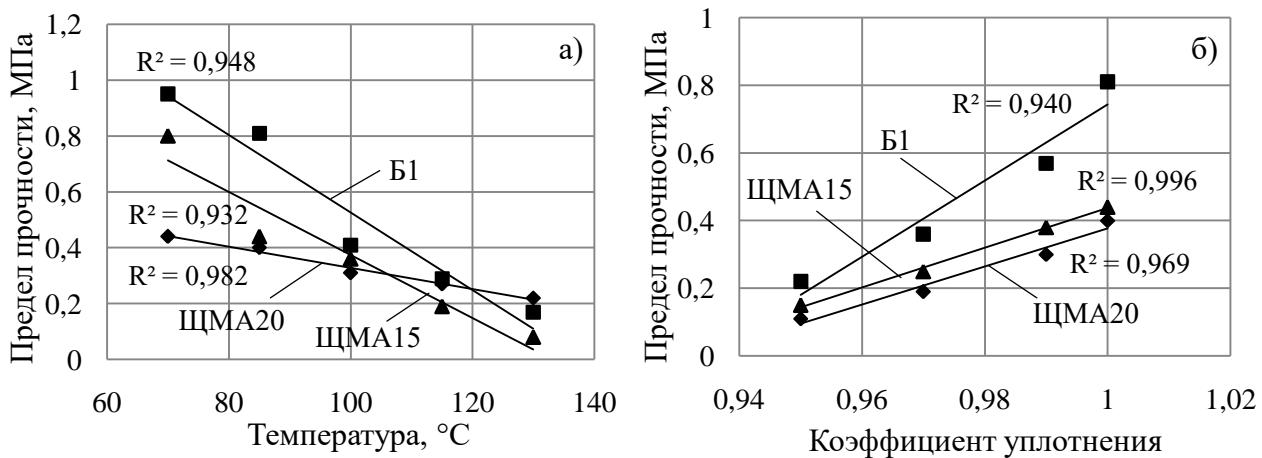


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности асфальтобетонной смеси при сжатии: а – от температуры; б – от коэффициента уплотнения

Влияние совокупности факторов температуры, коэффициента уплотнения и скорости приложения нагрузки на предел прочности асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения изучалось посредством регрессионного анализа данных, представленных в таблице 1, полученных в рамках полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2<sup>k</sup>.

Таблица 1 – Результаты полного факторного эксперимента

Б1				ЩМА15				ЩМА20			
T, °C	K <sub>y</sub>	V <sub>def</sub> , мм/мин	σ <sub>p</sub> , МПа	T, °C	K <sub>y</sub>	V <sub>def</sub> , мм/мин	σ <sub>p</sub> , МПа	T, °C	K <sub>y</sub>	V <sub>def</sub> , мм/мин	σ <sub>p</sub> , МПа
70	0,95	3	0,28	70	0,95	3	0,24	70	0,95	3	0,16
100	0,95	3	0,09	100	0,95	3	0,04	100	0,95	3	0,05
70	1,0	3	0,95	70	1,0	3	0,8	70	1,0	3	0,44
100	1,0	3	0,41	100	1,0	3	0,36	100	1,0	3	0,31
70	0,95	50	1,37	70	0,95	50	1,22	70	0,95	50	0,61
100	0,95	50	0,39	100	0,95	50	0,27	100	0,95	50	0,18
70	1,0	50	2,79	70	1,0	50	2,45	70	1,0	50	2,17
100	1,0	50	1,67	100	1,0	50	1,64	100	1,0	50	1,45

На основании закономерностей, установленных в ходе однофакторных экспериментов, выбран линейный вид уравнения регрессии при проведении статистической обработки результатов ПФЭ. При использовании метода наименьших квадратов установлены зависимости между пределом прочности и температурой, коэффициентом уплотнения, а также скоростью приложения нагрузки смеси в диапазоне значений, соответствующем режиму укатки дорожных покрытий. Полученные закономерности изменения прочностных характеристик рассмотренных асфальтобетонных смесей представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Математическая зависимость предела прочности

Материал	Уравнение регрессии
Б1	$\sigma_p = -0,027T + 2,921K_y + 0,026V_{def}$
ЩМА15	$\sigma_p = -0,022T + 2,712K_y + 0,023V_{def}$
ЩМА20	$\sigma_p = -0,012T + 1,826K_y + 0,021V_{def}$

Уточненная методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей при значениях коэффициента уплотнения и температуры, соответствующих процессу укатки, позволяют определить рациональные значения контактных давлений под вальцами дорожных катков, а также разработать методику расчета параметров средств уплотнения и режимов их работы.

**3. Разработана методика расчета параметров многофункционального катка и режимов его работы, позволяющая повысить эффективность процесса уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий.**

Определение рациональных параметров катков и режимов уплотнения осуществлялось на основе вычисления характеристик напряженно-деформированного состояния, развивающегося в слое, при помощи уточненной модели процесса взаимодействия рабочих органов дорожных машин с асфальтобетонной смесью.

Для решения системы дифференциальных уравнений (7), описывающей математическую модель взаимодействия, с целью повышения точности и скорости выполнения расчетов использовался метод конечных разностей. В результате получена разностная схема, имеющая следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{i+1} = 2 \cdot \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1} + a_{0i} \cdot \tau^2 + b_{0i} \cdot \tau^2 \cdot \chi \cdot \sin(2f\pi\tau) - c_{0i} \cdot \tau^2 \cdot \sigma_i, \\ \sigma_{i+1} = \frac{1}{1 + \tau \cdot c_2(n\theta_2 + m\theta_3)} \cdot (2\sigma_i - \sigma_{i-1} + c_2 \cdot \tau \cdot (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \sigma_i + \\ + c_1 \cdot [E_0(t_i) + E_{och}^{(1-h(t_i)/B)}] \cdot (\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}) - c_2 \cdot \tau^2 \cdot (\sigma_i - \sigma_T) + \\ + \frac{c_1 \cdot \tau \cdot [E_0(t) + E_{och}^{(1-h(t_i)/B)}] \cdot (n+m)}{(n\theta_3 + m\theta_2)} (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)) \end{cases} \quad (17)$$

где  $i$  – номер итерации;  $\tau = \Delta t$  – временной шаг разностной сетки, с.

С помощью установленных зависимостей предела прочности от скорости деформирования, температуры и плотности смеси в каждый момент времени определяются прочностные характеристики материала, после чего производится их сравнение с контактными напряжениями, найденными по формуле (17). В случае если условие  $\sigma(t) < 0,75\sigma_p$  не выполняется, то, ввиду невозможности гарантировать качество дорожного покрытия, дальнейшее вычисление параметров нагружения прекращается.

После каждого прохода катка производится расчет достигнутой величины коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси по формуле:

$$K_{y_i} = K_{y_{i-1}} \cdot \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} - e_i}; \quad (18)$$

В процессе выполнения вычислений осуществляется последовательное увеличение количества циклов приложения нагрузки со стороны рабочих органов асфальтобетонных катков, на основании чего определяется необходимое число проходов для получения заданной плотности покрытия. Расчеты производятся до достижения требуемого коэффициента уплотнения материала  $K_{y_{Tp}}$ , т.е. до момента выполнения следующего условия:

$$K_{y_i} \geq K_{y_{tp}}; \quad (19)$$

С целью определения технологических возможностей многофункционального катка проведен анализ конструкции данной машины, схематическое изображение которой представлено на рисунке 4. Особенностью данной машины является закрепление на раме 1 двух рабочих модулей 2, каждый из которых состоит из пары разнородных вальцов: пневмошинного 3 и гладковальцового 4. Принципиальным отличием многофункционального дорожного катка от других средств уплотнения также служит наличие балансирной тележки 5, соединенной с поворотной платформой 6 горизонтальной осью 7 и парой гидроцилиндров 8. С помощью последних производится вывешивание одного из вальцов рабочего модуля с одновременным вводом в работу другого, что дает возможность регулировать контактные давления, оказываемые на слой смеси, и использовать необходимую комбинацию вальцов на соответствующей стадии укатки.

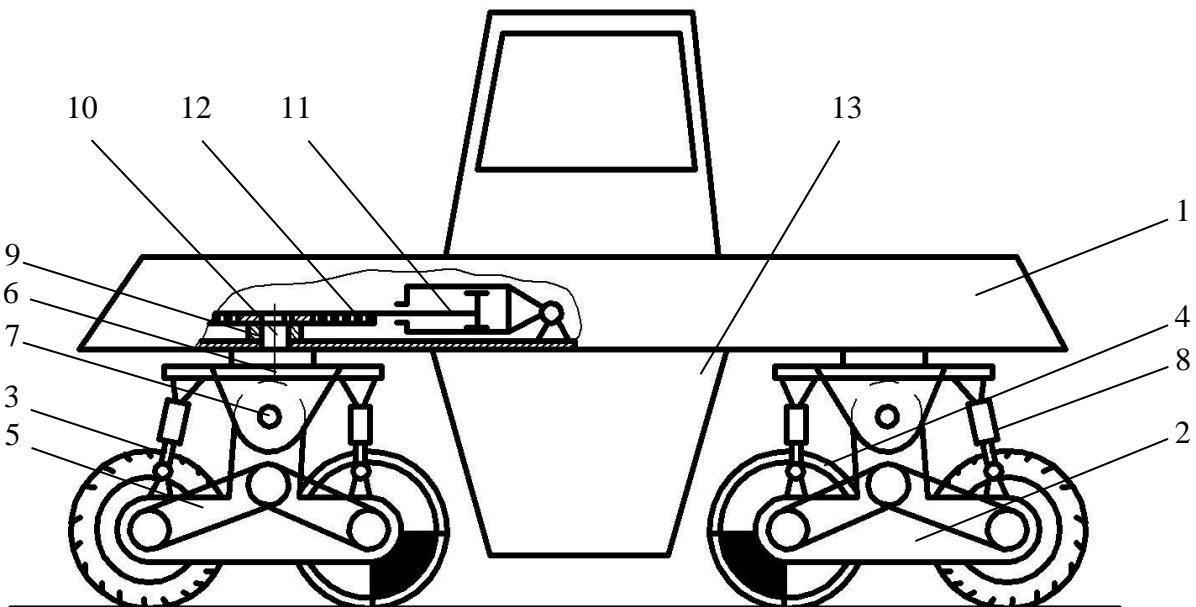


Рисунок 4 – Схематическое изображение многофункционального катка

Повышенная маневренность и значительное увеличение ширины захвата реализуется за счет использования поворотной платформы 6, закрепленной в подшипнике 9 при помощи вертикальной оси 10, а вращение платформы осуществляется гидроцилиндром 11, связанным с осью реевой передачей 12. Двигатель 13 машины расположен между рабочими модулями, равномерно распределяя вес на каждый из них.

Показано, что способность многофункционального катка изменять оказываемое на материал силовое воздействие значительно расширяет диапазон его применения. Режимы работы дорожной машины представлены на рисунке 5. Критерием перехода из начального положения с опорой на все рабочие органы к статической укатке с вывешиванием на пневмошинных вальцах служит двадцатипроцентное увеличение коэффициента уплотнения от требуемого диапазона его изменения. Последующая смена контактных

давлений осуществляется после дальнейшего равнозначного прироста плотности смеси.

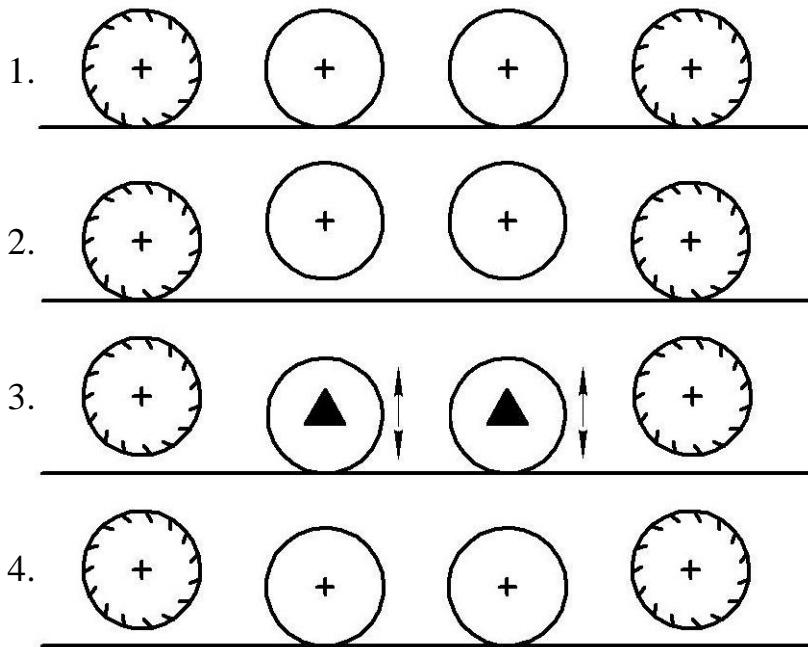


Рисунок 5 – Режимы работы многофункционального катка

Вибрационное уплотнение асфальтобетонной смеси выполняется многофункциональным катком на основной и заключительной стадиях укатки до получения проектной плотности дорожного покрытия. Выражения для требуемых коэффициентов уплотнения, определяющих моменты перехода между режимами работы дорожной машины, имеют следующий вид:

$$K_{y_{TP1}} = K_{y_{H4\text{ч}}} + 0,2 \cdot (K_{y_{КОН}} - K_{y_{H4\text{ч}}}); \quad (20)$$

$$K_{y_{TP2}} = K_{y_{H4\text{ч}}} + 0,4 \cdot (K_{y_{КОН}} - K_{y_{H4\text{ч}}}); \quad (21)$$

где  $K_{y_{H4\text{ч}}}$ ,  $K_{y_{КОН}}$  – начальный и конечный коэффициент уплотнения.

В практике дорожного строительства распространено проведение силового тренинга асфальтобетонного покрытия тяжелым статическим катком вследствие образования поверхностных микротрещин при использовании вибрации на заключительном этапе уплотнения. Выполнение двух дополнительных проходов в статическом режиме при вывешивании многофункционального катка на гладких металлических вальцах способствует формированию прочной структуры материала и получению дорожного покрытия с высокими показателями плотностной однородности. Критерием перехода является достижение конечного коэффициента уплотнения:

$$K_{y_{TP3}} = K_{y_{КОН}}; \quad (22)$$

Таким образом, использование критериев смены контактных давлений позволяет определить требуемое количество проходов на каждой стадии укатки асфальтобетонной смеси. Тогда алгоритм расчета рациональных параметров и режимов работы многофункционального, вибрационного и статического катков будет представлен в виде, показанном на рисунке 6.

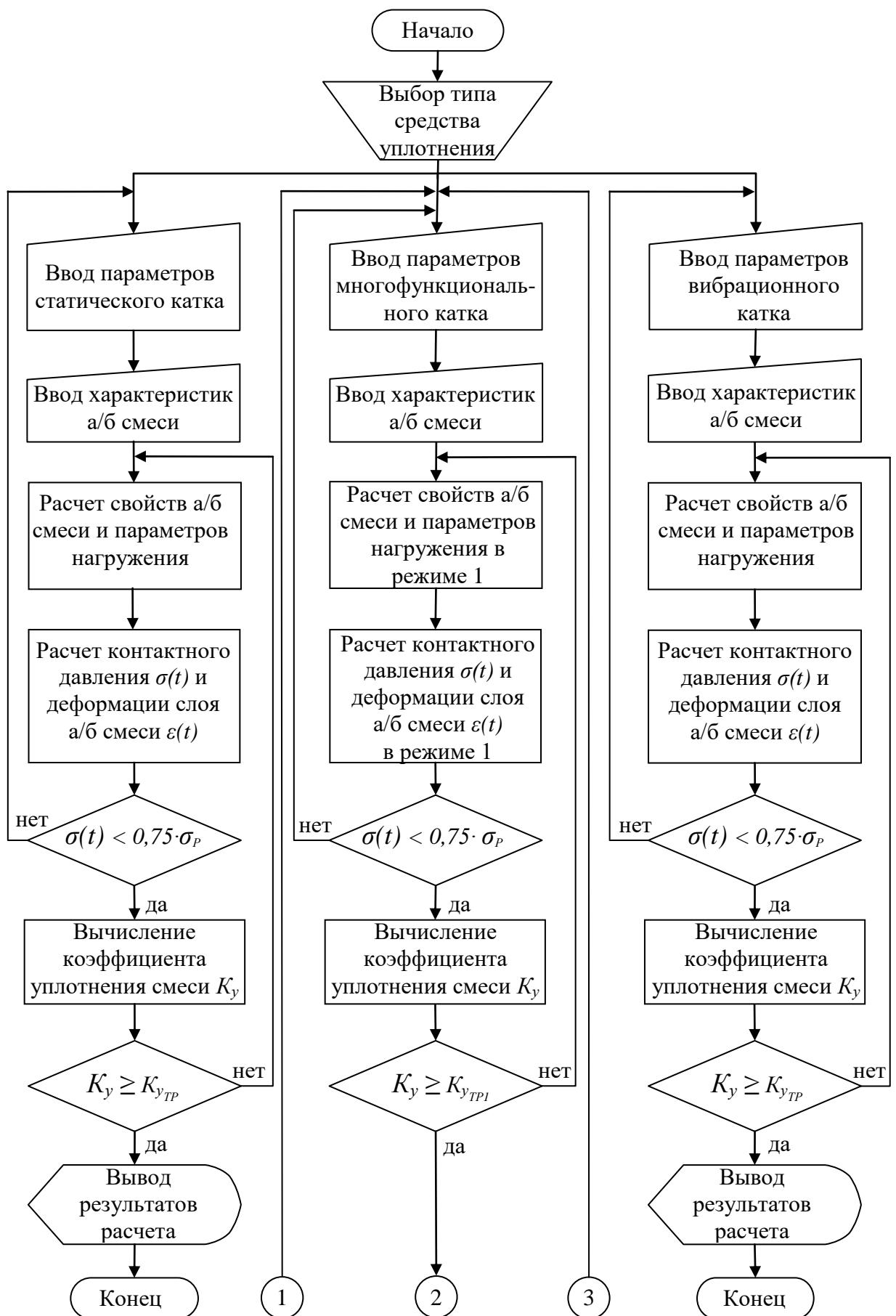


Рисунок 6 (начало) – Алгоритм расчета параметров и режимов работы катков

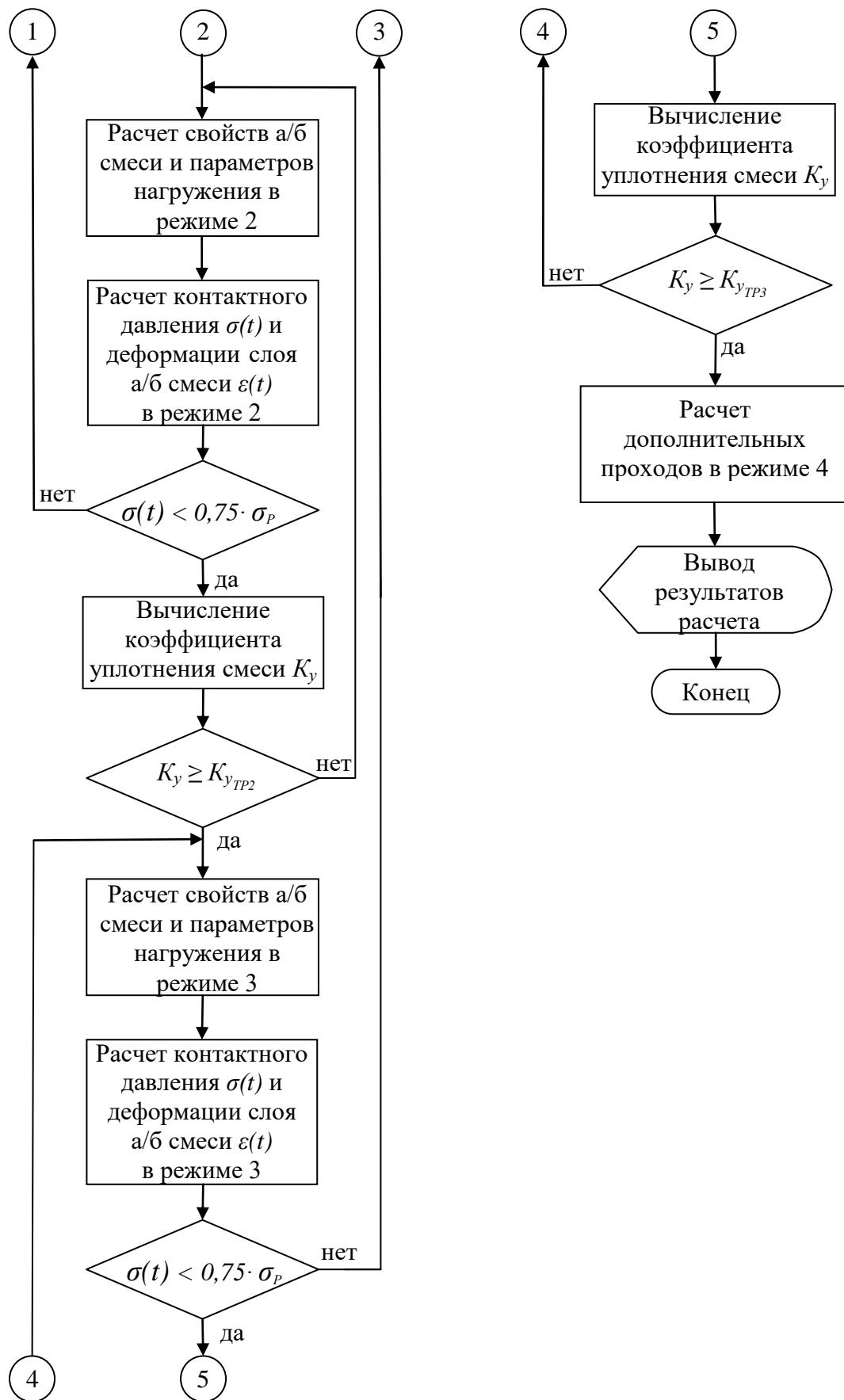


Рисунок 6 (окончание)

Разработанная методика расчета параметров многофункционального катка позволяет определить рациональные массогабаритные и технологические характеристики машины, а также установить моменты смены контактных давлений, обеспечив тем самым повышение эффективности процесса уплотнения асфальтобетонных смесей.

**4. Впервые определены рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения, позволяющие обеспечить максимальную производительность и гарантировать качество укатки дорожного покрытия.**

Определение рациональных характеристик многофункционального средства уплотнения выполнялось по разработанной методике расчета при помощи программного продукта «Unikat». В качестве критерия оптимизации выбрано требуемое число проходов катка для достижения единичного коэффициента уплотнения дорожного покрытия.

Проведено исследование влияния массы многофункционального катка на суммарное количество проходов машины по следу. Как показано на рисунке 7, а, для каждой из изучаемых смесей имеется максимальное значение массы  $M_{kp}$ , при превышении которого в слое развиваются напряжения, превосходящие предельно допустимые величины. Установлено, что минимальное число проходов, требуемое для уплотнения смеси, достигается при массе катка 13 т.

Определена зависимость количества проходов от массы рабочего органа многофункционального катка, представленная на рисунке 7, б. Показано, что увеличение массы вальца до 2 т приводит к снижению требуемого количества проходов, в то время как дальнейший рост весового показателя не оказывает влияния на уменьшение работы, затрачиваемой на уплотнение покрытия. Вследствие этого данное значение массы вальца является рациональным с точки зрения производительности и металлоемкости.

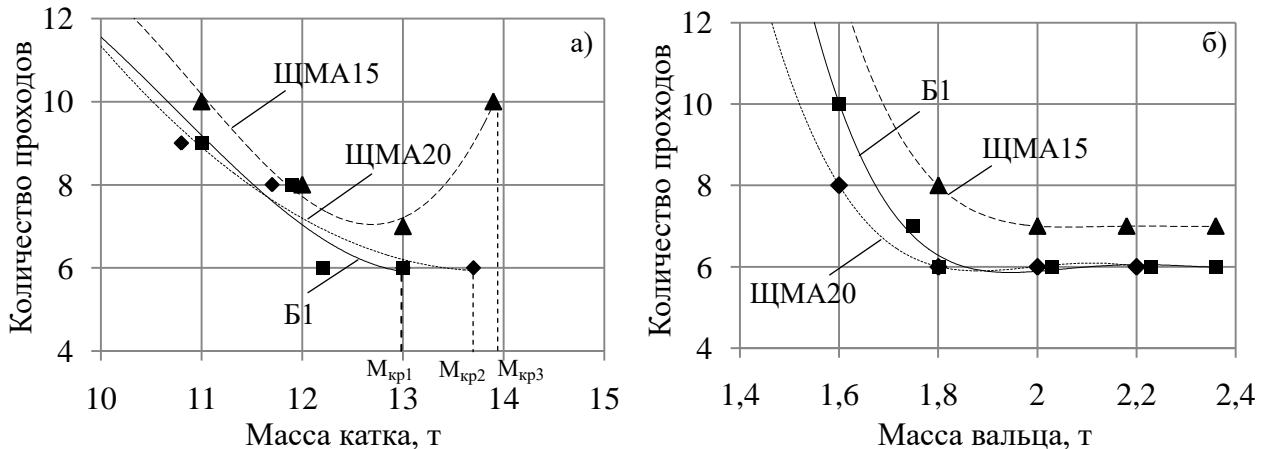


Рисунок 7 – Зависимость количества проходов многофункционального катка от: а – массы машины, б – массы вальца

Наравне с изучением весовых параметров многофункционального катка проведено исследование геометрических характеристик рабочего органа машины. Установленная закономерность изменения требуемого числа

проходов от ширины вальца представлена на рисунке 8, а. Вследствие того, что уменьшение данной геометрической характеристики влечет за собой увеличение контактных давлений, оказываемых со стороны рабочих органов на слой смеси, размер вальца должен превышать критическое значение  $B_{kp}$ . Показано, что укатка при ширине вальца катка 1,5 м обеспечивает получение заданной плотности при минимальном количестве проходов.

На основании соотношения между шириной и диаметром рабочего органа многофункционального катка и зависимостей, построенных для поперечного размера вальца, получены закономерности изменения количества проходов от диаметра, представленные на рисунке 8, б. Уменьшение радиуса рабочего органа приводит к снижению размера контактной площадки и, как следствие, увеличению напряжений в уплотняемом слое. Установлено, что критическое значение диаметра вальца  $D_{kp}$  составляет 1,2 м, а его увеличение приводит к росту необходимого количества проходов.

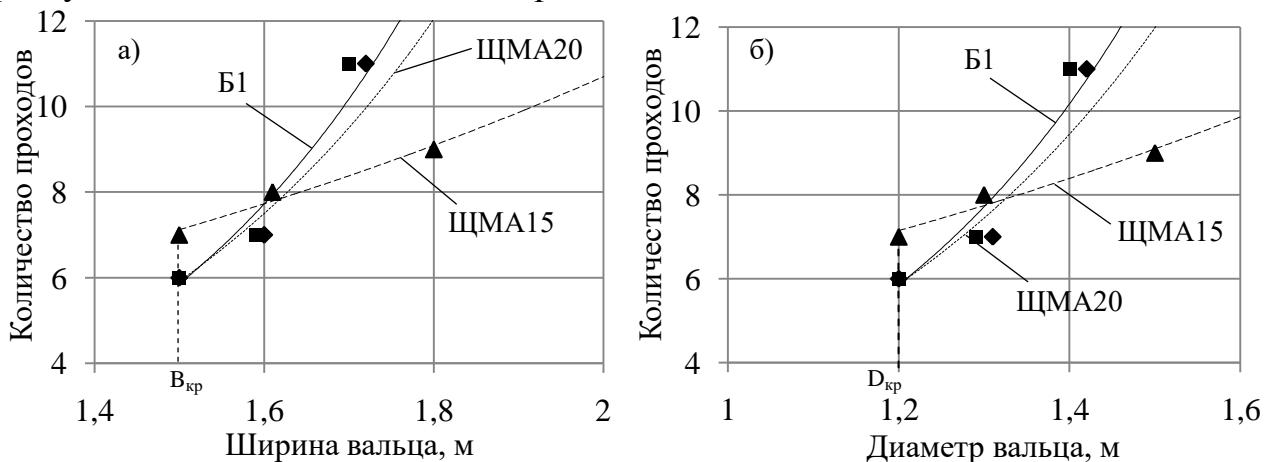


Рисунок 8 – Зависимость количества проходов многофункционального катка от: а – ширины вальца, б – диаметра вальца

В работе определены рациональные параметры процесса вибрационного уплотнения. В ходе проведенного исследования влияния величины центробежной силы на требуемое количество проходов построены зависимости, представленные на рисунке 9, а. Установлено, что увеличение возмущающей силы вызывает снижение необходимого числа проходов, но при этом существует критическое значение данного параметра  $Q_{kp}$ , превышение которого приводит к образованию дефектов дорожной поверхности. Показано, что уплотнение рассматриваемых материалов с центробежной силой 60 кН обеспечивает максимальную производительность укатки асфальтобетонных смесей.

Установлена закономерность изменения необходимого числа проходов от частоты вибрации рабочего органа, представленная на рисунке 9, б. Увеличение периода колебаний вызывает рост показателя оптимизации, вследствие уменьшения количества циклов нагружения смеси за один проход. Показано, что частота вибрации 50 Гц позволяет наиболее эффективно уплотнять изучаемые материалы.

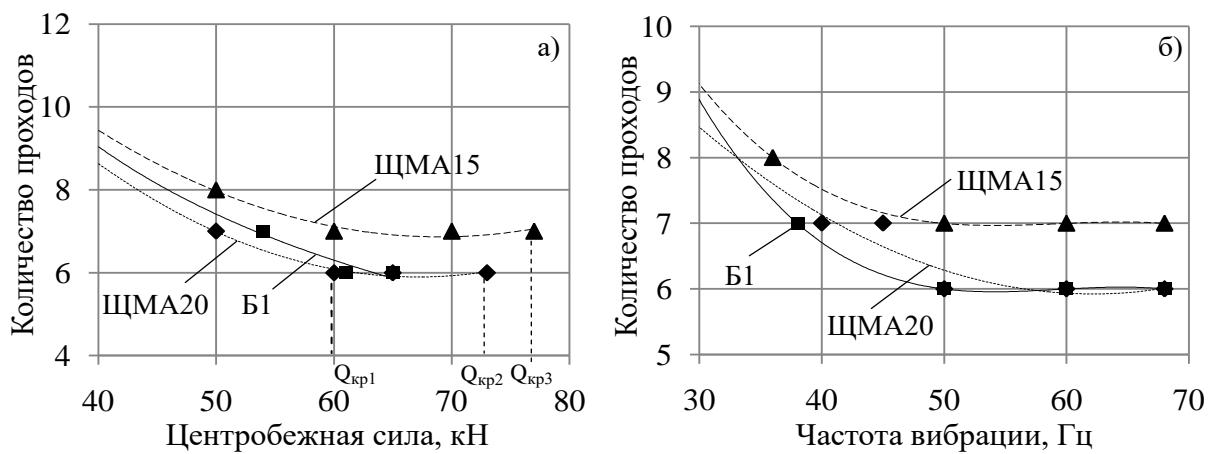


Рисунок 9 – Зависимость количества проходов многофункционального катка от: а – центробежной силы, б – частоты вибрации

Таким образом, впервые определены рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения, а именно: общая масса 13 т, масса рабочего органа 2 т, ширина вальца 1,5 м и его диаметр 1,2 м, а также центробежная сила 60 кН и частота вибрации 50 Гц

### III ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Разработана методика расчета параметров многофункционального катка, позволяющая повысить эффективность процесса уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий.
2. Использование динамического модуля деформации материала позволило посредством учета состава смеси и изменения ее физико-механических свойств во время укатки разработать уточненную математическую модель процесса взаимодействия рабочих органов катков с уплотняемым слоем.
3. На основании анализа существующих расчетных моделей динамического модуля деформации и проведенного экспериментального исследования асфальтобетонных смесей разработана уточненная методика определения закономерностей изменения прочностных и деформативных характеристик дорожных материалов при значениях коэффициента уплотнения и температуры, соответствующих процессу укатки.
4. Разработан алгоритм расчета и программный продукт, позволяющие с погрешностью, не превышающей 5%, производить вычисление рациональных конструктивных параметров и режимов работы средств уплотнения, а также определять моменты смены силовой нагрузки многофункционального катка, оказываемой на слой асфальтобетонной смеси.
5. Впервые определены рациональные массогабаритные параметры многофункционального катка и характеристики режима вибрационного уплотнения, а именно: общая масса 13 т, масса рабочего органа 2 т, ширина вальца 1,5 м и его диаметр 1,2 м, центробежная сила 60 кН и частота 50 Гц.

6. Использование многофункционального катка обеспечит рост годовой эксплуатационной производительности, приведенной к дорожной машине, на 28,4% и экономический эффект в размере 349290 рублей в год, что позволит достичь окупаемости вложений через 2,86 года.

#### **IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

##### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Кондрашов, Н.А.** Определение рациональных параметров многофункционального дорожного катка [Текст] / Н.А. Кондрашов // Научное обозрение. – 2015. – № 19. – С. 125-130 (0,36 п.л.).

2. **Кондрашов, Н.А.** Исследование зависимости угла внутреннего трения и сцепления от температуры [Текст] / Н.А. Кондрашов // Научное обозрение. – 2015. – № 18. – С. 79-83 (0,31 п.л.).

3. **Кондрашов, Н.А.** Исследование закономерности изменения свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения [Текст] / Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопалов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 1(48). – С. 139-144 (0,37 п.л./0,18 п.л.).

4. **Кондрашов, Н.А.** Использование модуля деформации в реологической модели уплотнения асфальтобетонной смеси при строительстве дорожных покрытий [Текст] / Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопалов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 7(51). – С. 55-65 (0,68 п.л./0,34 п.л.).

##### **Публикации в других изданиях:**

5. **Кондрашов, Н.А.** Модель процесса уплотнения асфальтобетонных смесей дорожными катками [Текст] / Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопалов // XLII-я Неделя науки СПбПУ: материалы науч.-практ. конференции с международным участием. Лучшие доклады.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 347-349 (0,18 п.л./0,09 п.л.).

6. **Кондрашов, Н.А.** Конструкция и обоснование параметров универсального дорожного катка [Текст] / Н.А. Кондрашов, Д.Ю. Таиров, А.А. Шестопалов // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 4-й международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 680-688 (0,56 п.л./0,18 п.л.).

7. Таиров, Д.Ю. Инновационная технология и средство уплотнения дорожных покрытий [Текст] / Д.Ю. Таиров, **Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопалов** // XXXXII-я Неделя науки СПбГПУ: материалы науч.-практ. конференции с международным участием. Лучшие доклады.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 291-293 (0,18 п.л./0,06 п.л.).

8. **Кондрашов, Н.А.** Рекомендации по выбору параметров машин и технологий уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях [Текст] / Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопалов // Современное машиностроение: наука и образование: материалы 3-й международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 943-951 (0,56 п.л./0,28 п.л.).