

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

*На правах рукописи*

**КОНДРАШОВ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор  
Шестопапов А.А.

Санкт-Петербург

2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
<b>ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДОРОЖНЫМИ КАТКАМИ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Средства уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий .....	10
1.2 Изменение физико-механических свойств асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения.....	20
1.3 Существующая технология уплотнения асфальтобетонных смесей.....	27
Выводы по первой главе.....	36
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КАТКА С АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСЬЮ .....</b>	<b>37</b>
2.1 Конструкция многофункционального катка .....	37
2.2 Анализ расчетных моделей процесса взаимодействия вальцов дорожных катков с уплотняемым покрытием .....	40
2.3 Обоснование использования динамического модуля деформации в модели нагружения асфальтобетонной смеси .....	51
2.4 Математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов многофункционального катка с асфальтобетонной смесью.....	61
Выводы по второй главе .....	72
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ .....</b>	<b>73</b>
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований .....	73
3.2 Описание экспериментального оборудования .....	79
3.3 Результаты экспериментальных исследований.....	82
3.3.1 Влияние температуры на предел прочности асфальтобетонной смеси .....	82

3.3.2 Влияние коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси на предел прочности .....	86
3.3.3 Определение влияния совокупности факторов на предел прочности асфальтобетонной смеси .....	89
Выводы по третьей главе.....	91
<b>ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОРОЖНОГО КАТКА .....</b>	<b>92</b>
4.1 Методика расчета параметров многофункционального катка .....	92
4.2 Описание программного продукта .....	97
4.3 Определение основных характеристик многофункционального катка.....	102
4.3.1 Установление весовых параметров .....	102
4.3.2 Определение геометрических характеристик рабочего органа .....	105
4.3.3 Установление рационального режима виброуплотнения .....	107
4.4 Техничко-экономическое обоснование эффективности использования многофункционального катка.....	109
Выводы по четвертой главе.....	115
Заключение .....	116
Список литературы .....	117
Приложения .....	137

## Введение

*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 [85, 97]. Более 30% федеральных автомагистралей и 60% дорог местного значения не удовлетворяют нормативным требованиям по своим прочностным характеристикам, ровности и сцепным свойствам [49]. 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 [13, 128]. 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.

# ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДОРОЖНЫМИ КАТКАМИ

## 1.1 Средства уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий

Одним из наиболее важных аспектов строительства дорожных покрытий является уплотнение асфальтобетонных смесей, уложенных на заранее подготовленное основание. Целью данной операции является получение асфальтобетона, обладающего целым рядом эксплуатационных качеств, таких как долговечность, трещиностойкость, высокая сопротивляемость колееобразованию и других.

Для устройства дорожных покрытий существующей нормативно-технической документацией [100] регламентируется использование комплектов машин, состоящих из самоходного асфальтоукладчика, катков различных типоразмеров и вспомогательных машин с соответствующими приспособлениями. Назначением асфальтоукладчиков является равномерное распределение смеси по поверхности основания и ее укладка слоем требуемой толщины с заданным профилем. Конструкцией данных машин предусматривается наличие трамбующего бруса и выглаживающей плиты, выполняющих предварительное уплотнение материала. Анализ исследований [26, 28, 29, 39, 73, 87, 134], посвященных изучению уплотняющей способности данного вида машин, позволяет сделать вывод, что современные асфальтоукладчики не могут обеспечить требуемый СНиП 3.06.03-85 коэффициент уплотнения дорожного покрытия, что обуславливает необходимость применения катков на завершающем этапе строительных работ.

Оптимизация существующих и разработка новых конструкций катков, а также изучение процессов взаимодействия вальцов дорожных машин с уплотняемым материалом выполняется профессорско-преподавательским составом БГТУ, ВГАСУ, МАДИ, СиБАДИ, СПбГАСУ, СПбПУ, СФУ, ЯГТУ и специалистами ОАО «Раскат» (г. Рыбинск), ЗАО «ПО «Ирмаш» (г. Брянск), ООО

«Завод Дорожных машин» (г. Рыбинск), ООО «Завод ДМ» (г. Москва), ЗАО СоюзДорНИИ (г. Москва).

Наибольшую значимость для формирования теории уплотнения асфальтобетонных смесей, совершенствования конструкций катков и их рабочих органов представляют работы Бадалова В.В., Батракова О.Т., Богуславского А.М., Варганова С.А., Горелышева Н.В., Носова С.В., Иванченко С.Н., Калужского Я.А., Коваленко Ю.Я., Ложечко В.П., Пермякова В.Б., Попова Г.Н., Сергеевой Т.Н., Хархуты Н.Я., Шестопалова А.А., Chehab G.R., Hirsch V., Nijboer L.W., Pellinen T.K., Witczak M.W. и др. [4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 22, 26, 41, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 58, 59, 69, 77, 86, 91, 92, 93, 96, 98, 99, 113, 114, 123, 124, 125, 129, 130, 131, 145, 153, 168, 169, 171, 185].

В настоящее время для уплотнения покрытий, устраиваемых из горячих асфальтобетонных смесей, наиболее часто применяются самоходные дорожные катки различных типов. К ним относятся катки с гладкими металлическими вальцами, на пневматических шинах, вибрационные, а также комбинированные уплотняющие машины, состоящие из двух осей, одна из которых пневматическая, а другая – гладкий металлический вибровалец. Каждый тип катков выпускается с различными конструктивными параметрами: по массе, размерам рабочего органа, устройству вибратора и т.д. Это обусловлено исторически в связи с постоянно изменяющимися требованиями производства дорожных работ.

Ввиду своей универсальности широкое применение получили гладковальцовые статические катки. В зависимости от общей массы можно выделить три класса данных дорожных машин: легкие – до 6 т, средние – 6-8 т и тяжелые – более 10 т, что позволяет использовать их на начальной, основной и заключительной стадиях уплотнения соответственно. Дополнительными параметрами работы статического катка, оказывающими влияние на качество конечного дорожного покрытия, являются скорость движения машины и количество проходов по одному следу. В начале укатки следует ограничить скорость до 1,5-2,0 км/ч, на основной стадии данный показатель должен находиться в диапазоне 3-5 км/ч, а на заключительном этапе не превышать 2-3

км/ч. Необходимое количество проходов определяется исходя из типа и температуры асфальтобетонной смеси, толщины слоя материала и скорости движения уплотняющего средства. Статические гладковальцовые катки отличаются высокой надежностью и простотой в использовании, однако обладают рядом существенных недостатков, к числу которых относятся низкая производительность и высокая металлоемкость.

Частично избежать данных недостатков удалось путем применения пневмоколесных катков для укатки дорожных покрытий. Большой вклад в изучение процесса уплотнения горячих асфальтобетонных смесей данными машинами внесли работы Батракова О.Т., Карасевой А.Н., Островцева Н.А., Путка А.И., Чабуткина Е.К., Шубина С.И. и др. [1, 8, 54, 101, 133, 166, 178, 182]. Отличительной особенностью пневмоколесных катков является деформация рабочих органов в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси, в результате чего увеличивается площадь контакта шины с дорожной поверхностью и время оказываемого на материал силового воздействия, что позволяет сократить количество проходов по одному следу и повысить скорость укатки [105, 107].

Исследованиями Островцева Н.А. [88] установлено, что при использовании пневмоколесных катков значительно возрастает глубина активной зоны уплотнения, более чем в 3 раза превышая значения, характерные для гладковальцовых дорожных машин. В связи с этим рациональным является применение пневмошинных катков для уплотнения толстых слоев асфальтобетонных смесей, поскольку при этом достигается наибольшая производительность работ.

Важным преимуществом катков с пневматическими шинами по сравнению с другими типами уплотняющих машин является отсутствие дробления минерального скелета смеси, что снижает образование волосяных трещин на поверхности дорожного покрытия и существенно увеличивает его водостойкость [88, 89]. Данный факт обуславливает широкое использование пневмоколесных катков при укатке смесей, состоящих из малопрочных материалов, а также имеющих высокое содержание щебня.

Ввиду конструктивных особенностей пневмошинных катков данные дорожные машины имеют ряд недостатков. Колебания уплотняющего средства в вертикальной плоскости, вследствие упругой деформации пневматических шин, приводит к неудовлетворительной продольной ровности покрытия, в то время как наличие зазоров между колесами катка вызывает снижение данного показателя в поперечном направлении [9, 53, 126]. В работах Путка А.И. отмечается, что высокой производительностью пневмоколесные катки обладают только на начальном этапе укатки асфальтобетонной смеси при температуре 140-115 °С, что существенно снижает степень их применения в рабочем процессе [104, 105, 106]. Таким образом, для обеспечения качества уплотнения необходимо совместное использование гладковальцовых и пневмошинных катков, что нашло отражение в исследованиях Калужского Я.А. и Батракова О.Т. [52].

С ростом требований к плотности верхних слоев дорожного покрытия, а также темпам выполнения работ по укатке асфальтобетонной смеси увеличилась востребованность вибрационных катков. Исследованию влияния вибрации на уплотняемый материал, установлению рациональных режимов работы машин с вибровальцем и оптимизации их конструкций посвящены работы Варганова С.А., Зубанова М.П., Зубкова А.Ф., Коваленко Ю.Я., Прусова А.Ю., Серебренникова В.С., Пермякова В.Б., Хархуты Н.Я. и др. [36, 39, 70, 71, 102, 103, 115, 127, 156, 170, 193]. Применение данного типа катков позволило значительно интенсифицировать процесс укатки при одновременном снижении металлоемкости машин. Вследствие уменьшения трения между вибровальцем и материалом возрастает подвижность смеси в зоне контакта, что позволяет добиться лучшей уплотняемости асфальтобетонной смеси [34]. Поверхность, укатанная вибрационными катками, имеет более высокие показатели прочности и водостойкости и соответственно обладает большим сроком службы.

Рабочий орган вибрационного катка совершает несколько циклов нагружения асфальтобетонной смеси за один проход, в связи с чем существенно сокращается необходимое количество проходов машины по одному следу и общее время укатки дорожной поверхности. На практике частота приложения

нагрузки варьируется в диапазоне 40-70 Гц, что согласуется с результатами экспериментальных исследований Варганова С.А. [14, 15], в которых в качестве оптимального было установлено значение 50 Гц.

Другим показателем, оказывающим большое влияние на процесс укатки смеси, является относительная возмущающая сила, равная отношению центробежной силы к массе колеблющихся частей машины. В работах Зубанова М.П. [34, 35] отмечается, что увеличение данного параметра приводит к росту эффективности виброуплотнения, и рекомендуется принимать его большим трех. Коваленко Ю.Я. [58, 59] указывает на значительное повышение динамических нагрузок, если значение относительной возмущающей силы превосходит шесть, и предлагает устанавливать его в пределах 3,5-4,0.

По мнению Варганова С.А. и Зубанова М.П. [14, 34] вибрационное уплотнение асфальтобетонных смесей следует производить при скорости 1,5-2,0 км/ч, что позволяет обеспечить наилучшее сочетание качества укатки и темпов выполняемых работ.

В случае если вышеперечисленные параметры вибрационных катков и режимов уплотнения будут принимать свои оптимальные значения, то производительность данного типа уплотняющих машин будет наивысшей и будет эквивалентна показателям статического катка, обладающего в 3-4 раза большей массой, что подтверждается исследованиями Хархуты Н.Я., Зубкова А.Ф. и Коваленко Ю.Я. [37, 59, 123, 125]. Однако авторами установлено, что столь высокая эффективность уплотнения может быть достигнута лишь при температурах выше 80 °С. Костельов М.П. в своих работах [62, 67] отмечает, что вследствие чрезмерного динамического воздействия на неуплотненный материал, вызывающего разуплотнение смеси и приводящего к образованию сдвигов, применение данного типа машин на начальной стадии укатки возможно только при выключенном вибраторе. Уплотнение в статическом режиме существенно снижает производительность виброкатков и неотъемлемо увеличивает время производства дорожных работ.

Использование вибрационного режима на завершающей стадии укатки может негативно отразиться на качестве асфальтобетонного покрытия, так как возможно образование неровностей и трещин на поверхности. Причиной этого служит неконтролируемый рост динамических усилий со стороны рабочего органа вследствие увеличения реальных значений амплитуды колебаний и центробежной силы.

Таким образом, наиболее рациональным является применение вибрационных катков на основной стадии уплотнения в температурном диапазоне 90-120 °С. На завершающем этапе укатки, как и в случае с пневмоколесными уплотняющими машинами, следует применять тяжелые статические катки.

Существует ограничение по использованию вибрационных катков при уплотнении тонких слоев асфальтобетонных покрытий, имеющих жесткие основания, так как чрезмерное динамическое воздействие на материал приводит к дроблению минерального скелета смеси и, как следствие, снижению прочности и долговечности дорожного покрытия [27].

Немаловажным остается вопрос защиты оператора от вибраций. Несмотря на внедрение крупнейшими производителями катков своих последних разработок, полностью оградить человека от ее негативного воздействия пока не представляется возможным [29, 82].

Совместить преимущества пневмошинных и вибрационных катков частично удалось в конструкции комбинированных уплотняющих машин, имеющих рабочие органы обоих типов. Однако свою эффективность данная разновидность дорожных катков доказала только при укатке слоев асфальтобетонной смеси с толщиной 10-15 см [55, 79].

Другой подход к объединению уплотняющих воздействий различных типов катков был реализован фирмой Sakai, разработавшей дорожную машину с пневмоколесным вибрационным рабочим органом. Комбинация положительного эффекта от увеличения глубины активной зоны уплотнения и действия вибрации позволяет данному катку сравниться по производительности с классическим пневмошинным катком, имеющим в 2,5 раза большую массу [16, 117]. Однако

при низких давлениях в шинах потенциал виброуплотнения реализуется в данной конструкции не в полной мере вследствие поглощения рабочим органом возмущений, создаваемых вибровозбудителем. Ввиду очень низкой сжимаемости жидкости замещение воздуха в шинах водой приводит к значительному увеличению степени передачи уплотняющих воздействий асфальтобетонному слою со стороны вибратора. В результате энергоемкость процесса укатки дорожного покрытия вибрационным гидрошинным катком, разработанным Захаренко А.В. [30], была снижена в 1,84 раза по сравнению с базовым ДУ-98. Тем не менее, данные вибрационные средства уплотнения сохраняют главный недостаток машин с колесным рабочим органом, выражающийся в невозможности обеспечения требуемой ровности поверхностного слоя, что обуславливает необходимость использования на завершающей стадии укатки тяжелого статического катка.

Применение статического катка с обрешеченными вальцами позволяет сочетать высокие показатели ровности покрытия с преимуществами использования пневмошинного рабочего органа [63]. Но высокая подверженность резинового покрытия изнашиванию и трудоемкость его последующей замены ограничивают распространение данного средства уплотнения.

Интересен дорожный каток с перфорированными вальцами, предложенный Угай С.М. [119, 188, 189]. Наличие отверстий в рабочем органе дорожной машины вызывает образование на поверхности зон нагружения и разгрузки, что помогает интенсифицировать процесс уплотнения. Равномерное распределение плотности покрытия обеспечивается последовательным смещением областей с низким контактным давлением ввиду невозможности их точного повторного совпадения. Разновременное приложение нагрузок со стороны рабочего органа и постоянное изменение свойств смеси может привести к появлению неровностей на поверхности, поэтому при уплотнении верхних слоев дорожной одежды данный каток следует использовать в звене с гладковальцовым.

Принципиальное отличие виброволнового катка Головнина А.А. [20, 21] от других дорожных машин заключается в наличии гибкой обечайки вальца, внутри

которого установлены несколько опорных роликов и вибровозбудитель. Динамические воздействия со стороны последнего передаются деформирующейся обечайкой на покрытие, вследствие чего происходит его уплотнение. Противофазное движение частей обечайки, обладающей сравнительно небольшой массой, снимает потребность в использовании специальных средств виброзащиты оператора и на 20% снижает металлоемкость катка [19]. В то же время данная конструкция характеризуется высоким уровнем шума и сложностью в исполнении, что представляет потенциал для ее дальнейшего улучшения.

Возможностью бесступенчатого регулирования контактных давлений, оказываемых рабочими органами на слой смеси, обладает каток с вакуумным устройством [45, 129]. Дополнительный узел дорожной машины представляет собой камеру, расположенную между вальцов катка, жестко соединенную воздухопроводом с его рамой и вакуумным насосом. Создаваемое в полости камеры разрежение способствует смене схемы нагружения материала со сжатия после прохода первого вальца на растяжение, ускоряя тем самым протекание релаксационных процессов и, как следствие, снижая остаточные напряжения в слое перед его последующим повторным сжатием [43]. Это позволяет значительно интенсифицировать процесс укатки асфальтобетонной смеси и более чем в 2 раза повысить ее уплотняемость. Кроме того, вакуумирование снижает показатели остаточной пористости и водонасыщения дорожной поверхности, способствует улучшению структуры материала и повышает однородность покрытия [42, 120]. Несмотря на большие преимущества данного типа катков, их серийное производство пока не начато.

Современные иностранные производители дорожной техники также предлагают асфальтобетонные катки с регулируемым воздействием на уплотняемый материал. За счет варьирования амплитуды и частоты колебаний рабочего органа машинист получает необходимые значения центробежной силы. Катки Dунарас позволяют производить уплотнение с частотой 48 Гц и 67 Гц [122], в то время как продукция фирмы Caterpillar оснащается пятиамплитудной вибрационной системой [149]. Наибольшее количество настроек получила

дорожная машина Ingersoll Rand DD-90HF, имеющая 8 значений амплитуды для каждого из двух частотных режимов [146]. Анализируя существующий рынок уплотняющей техники, Костельов М.П. [65] отмечает, что шаг регулировки параметров катка выбран производителем слишком мелким, а при частоте колебаний 67 Гц и амплитуде 0,39 мм каток становится излишне динамичным.

Перспективной является разработка системы направленной вибрации Variomatic компании Bomag [142]. На рабочем органе катка устанавливается механизм, состоящий из двух параллельных валов с вращающимися в противоположном направлении дебалансами, позволяющий производить бесступенчатое регулирование амплитуды колебаний, а изменение положения устройства относительно оси вальца дает возможность варьировать направление вектора центробежной силы.

Схожую конструкцию имеют катки фирмы Hamt с осциллирующими вальцами [194]. Смещенные на  $180^\circ$  дебалансы, сонаправленно вращаясь, создают крутящий момент вокруг оси рабочего органа, в результате чего происходит воздействие на материал по схеме «статическое сжатие + реверсивный сдвиг». Важным преимуществом таких катков является возможность осуществления укатки асфальтобетонных смесей на мостах, путепроводах и в других местах, где запрещается применение вибрации [173]. Несмотря на то, что в катках Hamt используется комбинация осцилляторного и вибрационного вальцов, в ряде работ отмечается низкое качество уплотнения такими дорожными машинами тонких слоев асфальтобетонной смеси [64, 66]. Причиной этому служат чрезмерное динамическое воздействие со стороны вибрационного рабочего органа и недостаточная эффективность работы следующего за ним осцилляторного, вследствие чего возникает потребность в проведении силового тренинга покрытия гладковальцовым статическим катком.

Общим недостатком дорожных машин последних двух типов является повышенный абразивный износ контактной поверхности рабочего органа при уплотнении покрытий с низким коэффициентом трения вследствие

систематического проскальзывания вальца и увеличение в результате требуемого количества проходов катка по следу [64].

Наибольшее внимание со стороны научного сообщества в настоящее время уделяется концепции «интеллектуального уплотнения». Суть ее заключается в оснащении дорожных катков различными датчиками, определяющими параметры асфальтобетонной смеси, и регулировании на основании полученных данных силового воздействия на слой в автоматическом режиме. На рынке уплотняющей техники на сегодняшний день уже присутствует множество таких систем большинства ведущих мировых производителей, среди которых Ammann [139], Dynapac [138], Caterpillar [175] и др.

Наиболее прогрессивной разработкой в области интеллектуального уплотнения является система «Асфальт Менеджер» фирмы Bomag [116, 142]. Программным обеспечением непрерывно контролируется состояние уплотняемого слоя путем постоянного измерения температуры смеси и ее динамического модуля деформации, и с помощью системы Variomatic автоматически регулируется амплитуда колебаний вальца.

В ходе исследований [154, 165, 176] результатов укатки дорожного покрытия катками, оснащенными системами интеллектуального уплотнения, отмечается большой потенциал таких разработок. Тем не менее, на данный момент их использование не может обеспечить требуемое качество укатки. Причиной тому служит низкая степень корреляции измеренных значений динамического модуля деформации и остаточной пористости смеси, что не позволяет системе правильно оценивать нормируемые показатели покрытия.

Таким образом, на основе проведенного анализа средств уплотнения горячих асфальтобетонных смесей можно сделать вывод о том, что существующие катки обладают недостаточной универсальностью и узким диапазоном изменения силовых воздействий оказываемых на слой, вследствие чего являются неэффективными с точки зрения производительности и себестоимости укатки, а также не позволяют гарантировать получение качественного дорожного покрытия.

## 1.2 Изменение физико-механических свойств асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения

Наибольшее распространение в мировой практике дорожного строительства получили покрытия из асфальтобетона. Данный материал образуется в результате уплотнения дорожными катками асфальтобетонных смесей, в состав которых входят щебень, песок, минеральный порошок и битум, подобранные в рациональных соотношениях [27].

В большинстве российских и зарубежных исследований уделяется внимание изучению физико-механических свойств уплотненного асфальтобетона при температурах, не превышающих 60 °С, с целью повышения эксплуатационных характеристик [18, 40, 50, 144, 155, 159]. К сожалению, полученные данные не позволяют оценить изменчивость характеристик материала во время укатки.

Наибольший вклад в изучение асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения и выявление факторов, оказывающих влияние на их прочностные и деформативные характеристики, внесли работы Горельшева Н.В., Рыбьева И.А., Сахарова П.В., Хархуты Н.Я., Yen T., West R.C. и др. [23, 111, 112, 123, 167, 195].

Между тем вследствие своей многокомпонентности асфальтобетон является одним из наиболее сложных по своей структуре дорожных материалов, свойства каждой из составляющих которого оказывают влияние на характеристики готового покрытия. В теории, предложенной Сахаровым П.В. [112], производится разделение структуры материала на асфальтовое вяжущее, состоящее из битума и минерального порошка, и минеральный остов, который образуют песок и щебень. По мнению Гезенцевя Л.Б. [27], минеральный порошок является составляющей минерального остова, а Рыбьев И.А. [111], отмечая различную природу протекающих при формировании асфальтобетона процессов, выделяет микро- и макроструктуры материала.

Макроструктуру асфальтобетона образует минеральный остов, основными характеристиками которого являются структура входящих в него материалов, плотность, определяющая в широком температурном диапазоне деформативные

свойства, и величина внутреннего трения. К компонентам микроструктуры относится битум, взаимодействующий с минеральным порошком. На поверхности последнего образуются коагуляционные связи, обуславливающие формирование пространственной структуры асфальтобетона. Вследствие того, что битум в определенной степени обладает тиксотропными свойствами, сопротивление асфальтобетонной смеси уплотнению значительно снижается при использовании вибрации.

Во время укатки смеси, ввиду многократных циклических воздействий, оказываемых со стороны рабочих органов, происходит взаимное перемещение элементов минерального скелета с одновременным увеличением объемной массы смеси и снижением ее пористости, что в результате завершает формирование макроструктуры асфальтобетона.

Таким образом, основные физико-механические характеристики изучаемого материала, такие как модуль деформации, предел прочности, сцепление и угол внутреннего трения, определяются межкомпонентным взаимодействием его составляющих. Нахождение закономерностей изменения прочностных и деформативных показателей в процессе уплотнения позволит установить рациональные режимы укатки смеси и обеспечить получение структуры асфальтобетона с необходимыми эксплуатационными качествами.

Асфальтобетон относится к упруго-вязко-пластичным материалам [27, 50, 110]. Вследствие этого в асфальтобетонных смесях в процессе их укатки могут развиваться пластическая, условно-упругая и упругая деформации. Характер их проявления и соотношение между собой зависят как от свойств самого материала, так и от параметров процесса уплотнения. На начальном этапе преобладают полезные пластические деформации, которые по мере проведения укатки смеси постепенно сменяются упругими.

Накопление необратимых пластических деформаций ведется до достижения требуемых показателей плотности смеси, однако может продолжаться и после этого в случае превышения контактными давлениями несущей способности слоя. Такой вид деформаций развивается без изменения объема смеси только за счет

перераспределения ее компонентов, что является причиной нарушения сплошности материала и возникновения дефектов дорожного покрытия.

Упругая и условно-упругая деформации смеси являются обратимыми, то есть восстанавливаются после снятия нагрузки на материал. Упругая составляющая проявляется вследствие деформации минерального скелета смеси и поэтому не зависит от продолжительности уплотняющего воздействия. Развитие условно-упругой деформации происходит в результате перемещения вяжущего и заземленного в порах воздуха, ввиду чего находится под влиянием таких факторов, как температура и плотность смеси, а также время действия нагрузки, оказываемой на слой.

Комплексным показателем, отражающим проявление всех составляющих деформации асфальтобетонной смеси, является ее модуль деформации. Данный параметр также позволяет характеризовать уплотняемость материала, поэтому его изучение представляет большой научный интерес.

Исследование деформативных свойств песчаной асфальтобетонной смеси проводилось Зубковым А.Ф. [38]. Полученная зависимость модуля деформации материала от температуры, представленная на рисунке 1, носит экспоненциальный характер. Рост измеряемой величины в 6 раз в рассматриваемом температурном диапазоне удовлетворительно соотносится с известными результатами исследований других авторов.

Установление закономерности изменения модуля деформации при увеличении коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси в широком температурном диапазоне было выполнено Сергеевой Т.Н. [113]. Деформирование образцов производилось в металлической форме, что исключало их боковое расширение. На основании результатов испытаний, показанных на рисунке 2, был сделан вывод о существовании линейной зависимости между плотностью материала и модулем деформации при величине коэффициента уплотнения, превосходящей 0,9. При более низких значениях плотности смеси влияние данного параметра на деформативные свойства смеси является менее выраженным.

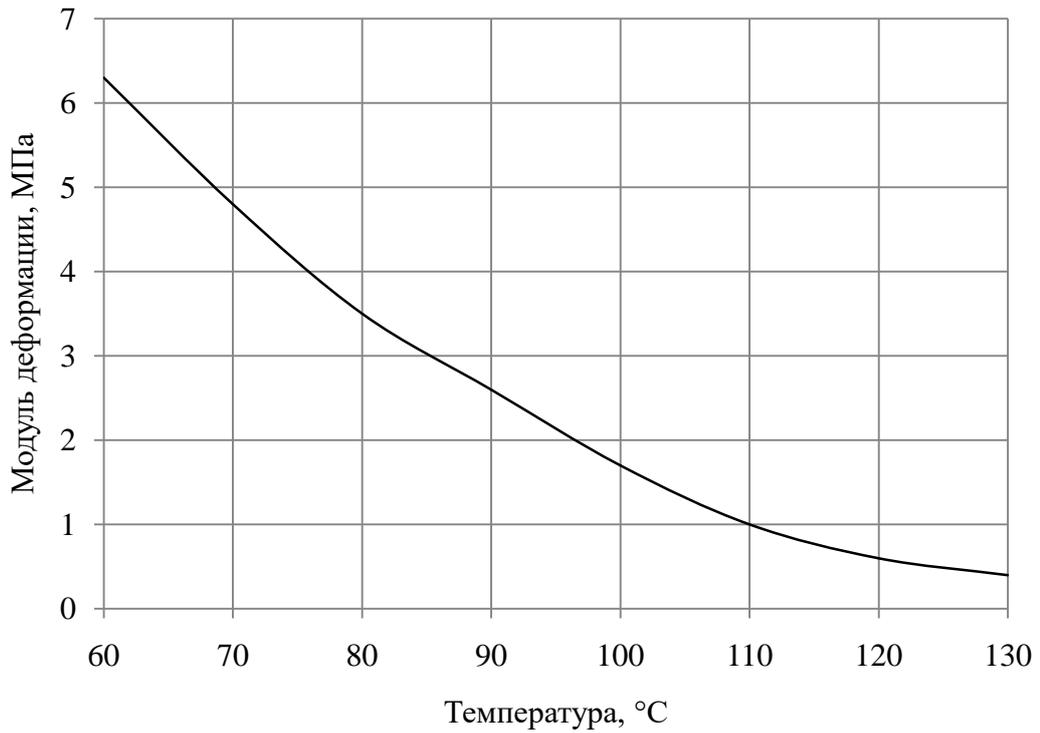


Рисунок 1 – Зависимость модуля деформации асфальтобетонной смеси от температуры.

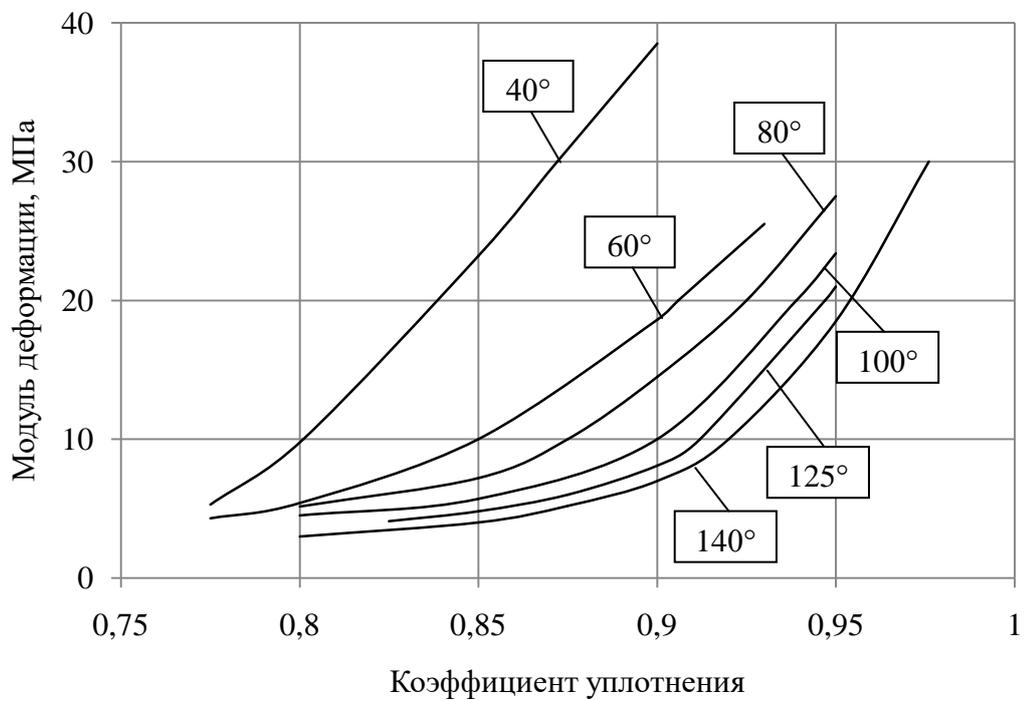


Рисунок 2 – Зависимость модуля деформации асфальтобетонной смеси от коэффициента уплотнения.

В работе Костельова М.П. [62] отмечается влияние на модуль деформации и предел прочности смеси как температуры, так и ее плотности. Основываясь на экспериментальных данных, полученных Хархутой М.П. и Пермяковым В.Б., автор утверждает, что на протяжении всего процесса уплотнения вследствие совокупного действия обоих факторов модуль деформации увеличивается в 13-15 раз, а предел прочности возрастает в 3,5-4,0 раза, что обуславливает необходимость определения плотности смеси при назначении режимов укатки.

Согласно исследованиям Процуто С.С. [101], интенсивность роста модуля деформации асфальтобетонной смеси при уменьшении температуры значительно превышает степень увеличения ее предела прочности. В ходе проведенных штамповых испытаний Хархутой Н.Я. и Стефанюк Е.Л. [125] было установлено, что снижение температуры со 110 °С до 60 °С приводит к увеличению модуля деформации смеси в 4 раза, а предела прочности только в 2 раза. В последующей работе [123] отмечается увеличение комплексного показателя деформации материала в 8,5 раз при тех же условиях.

Изучение зависимости предела прочности и максимальных давлений под вальцами катков от температуры в процессе уплотнения малощебенистых смесей проводилось Ложечко В.П. [78]. Полученные результаты, представленные на рисунке 3, носят ориентировочный характер, но подтверждают существующий риск превышения допустимых контактных давлений, оказываемых на слой асфальтобетонной смеси рабочими органами катка, особенно в начале процесса уплотнения. Автором было установлено увеличение эквивалентного модуля деформации в 20 раз и предела прочности смеси в 16 раз вследствие повышения плотности и снижения температуры малощебенистых смесей. На основании представленных данных можно сделать предположение, что увеличение содержания щебня в составе смеси приводит к снижению темпов роста ее предела прочности в процессе уплотнения.

Пермяковым В.Б. проведен широкий круг исследований, посвященных изучению влияния скорости деформирования, плотности и температуры смеси на сопротивление уплотнению [92, 96]. На рисунке 4 представлены закономерности

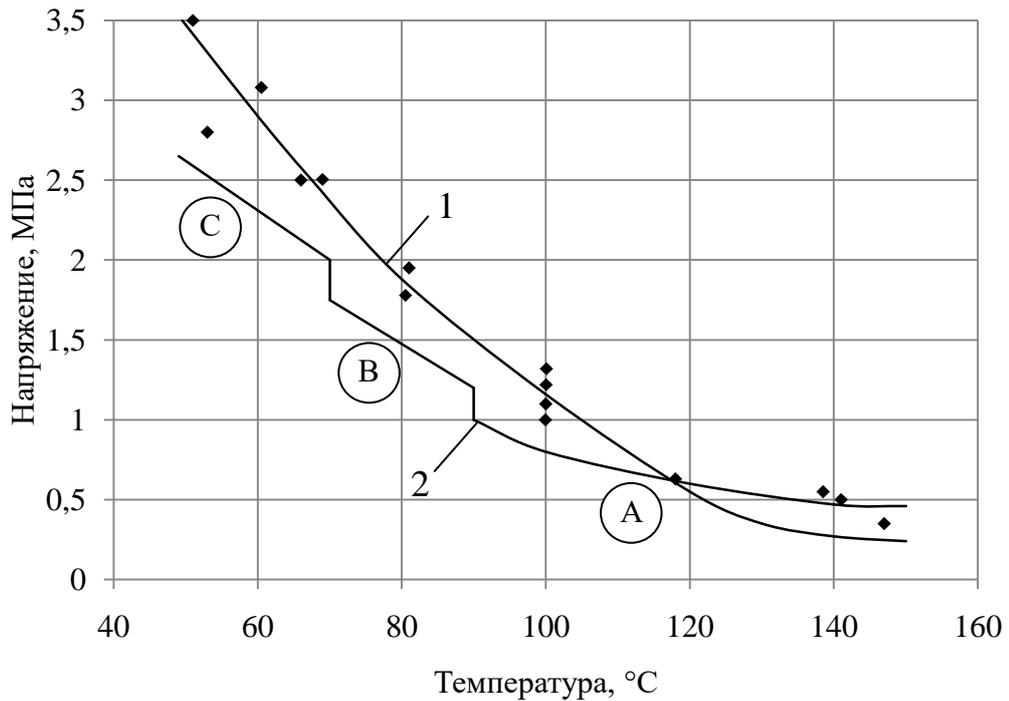


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности асфальтобетонной смеси и максимальных контактных давлений от температуры: 1 – предел прочности материала; 2 – максимальные напряжения под вальцами катков; А – ДУ-47; В – ДУ-48; С – ДУ-49А.

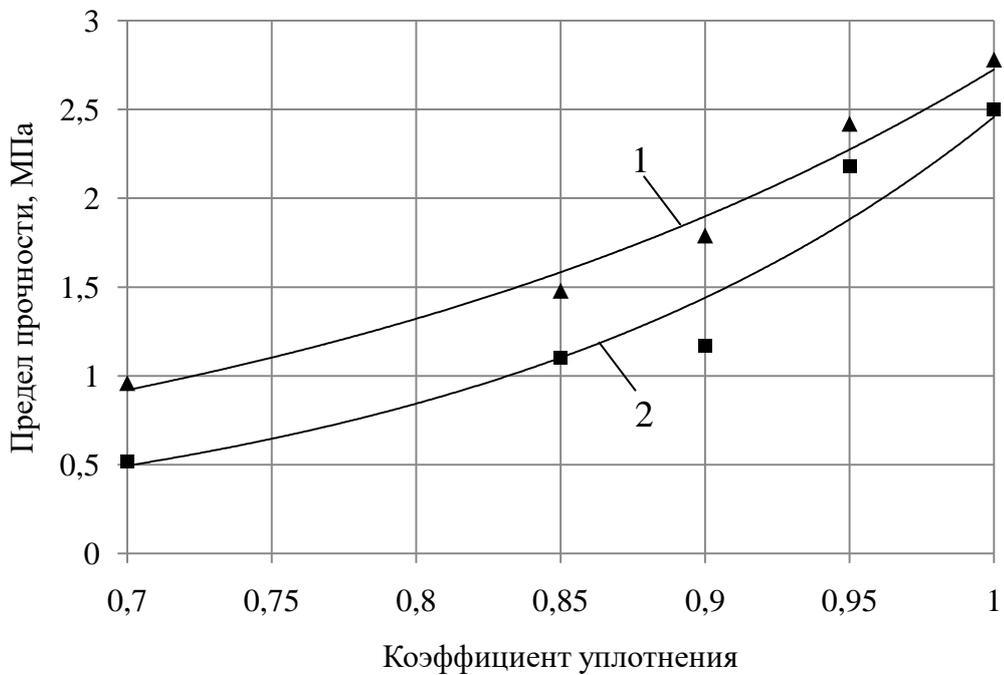


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности смеси от коэффициента уплотнения: 1 – смесь типа А; 2 – смесь типа Б.

изменения коэффициента уплотнения и предела прочности асфальтобетонных смесей типа А и Б, полученные путем аппроксимации определенных автором значений. Прочностные характеристики обеих смесей зависят от коэффициента уплотнения схожим образом, синхронно увеличиваясь в 2-3 раза в диапазоне значений плотности, соответствующем использованию дорожных катков. Следует также отметить заметно менее выраженный характер влияния данного фактора на предел прочности по сравнению с модулем деформации, что показывает необходимость плотной компоновки составляющих смеси для формирования пространственной структуры асфальтобетона.

В связи с этим также представляют интерес данные, приведенные в работе Лобзовой К.Я. [76], связывающие температуру, состав смеси и работу уплотнения. Зависимости, показанные на рисунке 5, свидетельствуют о влиянии содержания щебня в смеси на ее уплотняемость и наличии оптимальной температуры укатки, при которой работа уплотнения минимальна.

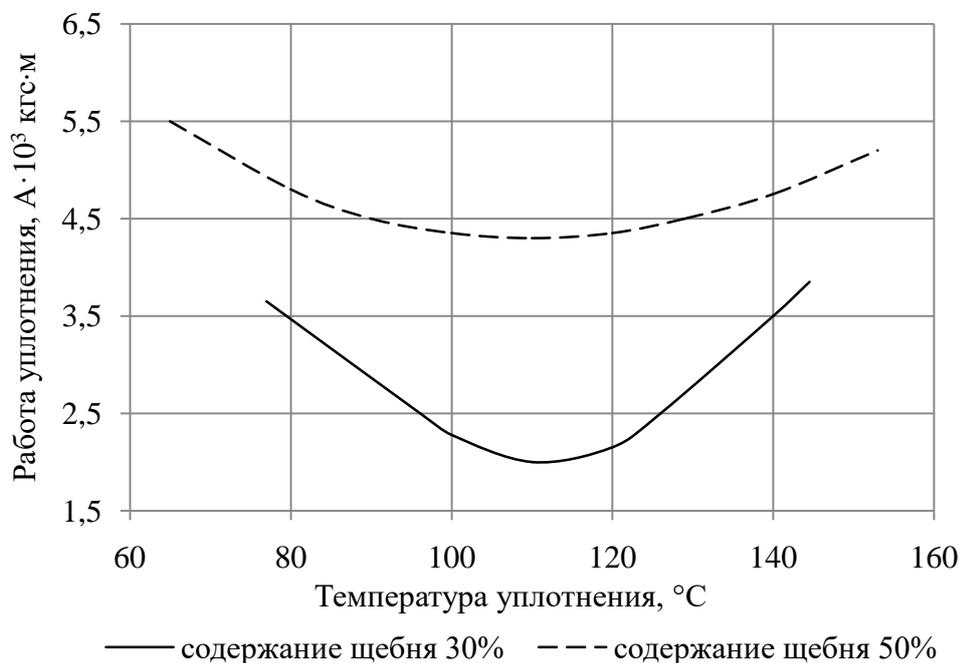


Рисунок 5 – Зависимость работы уплотнения от температуры смеси.

На начальной стадии укатки наблюдается разуплотнение смеси, вызванное слишком низкой вязкостью материала вследствие действия высоких температур, что приводит к росту работы по укатке покрытия. В свою очередь, при

температурах ниже 80 °С необходимо также приложить повышенные усилия для достижения требуемой плотности ввиду роста модуля деформации смеси.

В последние годы в нашей стране наблюдается стремительный рост использования новых разновидностей асфальтобетонных смесей и различных добавок, существенным образом изменяющих свойства материала. Наибольшее распространение среди них получили щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси [56, 57] и асфальтобетоны на основе полимерно-битумных вяжущих [31, 33, 75] ввиду превосходства всех основных эксплуатационных характеристик данных материалов над традиционными. В настоящий момент существует ограниченное число отечественных и зарубежных публикаций [72, 183, 184], посвященных изучению прочностных и деформативных свойств данных смесей в процессе уплотнения, что обуславливает потребность в их дальнейшем изучении.

По результатам анализа изменения свойств рабочей среды дорожных катков в процессе укатки, можно сделать вывод об определяющем влиянии модуля деформации и предела прочности на уплотняемость материала и необходимости установления закономерностей процесса взаимодействия рабочих органов машин со смесью с целью получения структуры асфальтобетона с требуемыми эксплуатационными качествами и интенсификации процесса уплотнения.

### **1.3 Существующая технология уплотнения асфальтобетонных смесей**

Зависимость физико-механических свойств асфальтобетонных смесей от температуры обуславливает необходимость проведения укатки в строго определенном температурном диапазоне, соответствующем наилучшей уплотняемости материала. Согласно проведенным исследованиям [6, 52, 63], укатку смеси следует осуществлять при температурах от 140 до 70 °С, что, ввиду быстрого охлаждения материала, создает значительные временные ограничения для выполнения данной операции, вследствие чего к дорожным каткам выдвигаются жесткие требования по уплотняющей способности и технологической пригодности.

При назначении параметров катков и режимов нагружения следует постоянно контролировать величину силового воздействия, оказываемого рабочим органом на уплотняемый материал. В случае необоснованно высоких значений может иметь место нарушение сплошности асфальтобетона, волнообразование и возникновение трещин, а при недостаточных контактных давлениях увеличивается вероятность недоуплотнения слоя смеси. Таким образом, отклонение величины силовых воздействий от своих оптимальных значений приводит к значительному ухудшению показателей ровности и долговечности дорожного покрытия, а также снижает производительность работ.

Вследствие невозможности получения требуемой плотности смеси путем неограниченного увеличения нагрузок, прикладываемых к уплотняемому слою, для достижения поставленной цели необходимо использовать технологические схемы укатки, включающие в себя многократное прохождение катка по одному следу. Зависимость необходимого количества циклов нагружения от соотношения контактных давлений рабочего органа дорожной машины и предела прочности материала показана на рисунке 6 [65]:

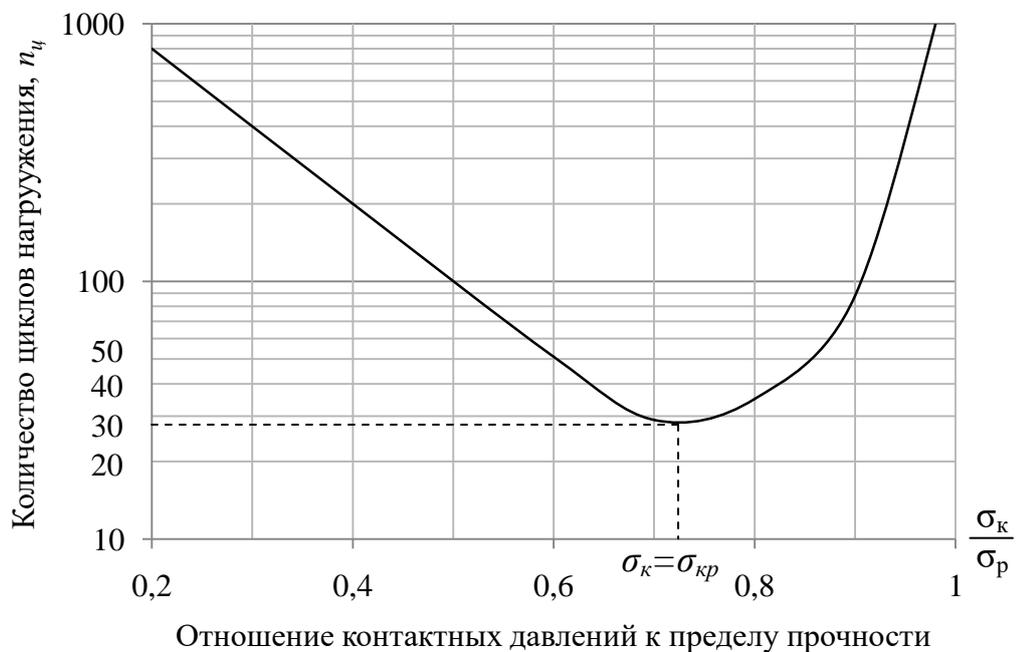


Рисунок 6 – Зависимость необходимого количества циклов нагружения от соотношения контактных давлений и предела прочности асфальтобетонной смеси.

Согласно представленной закономерности, наименьшее количество проходов дорожного катка и, как следствие, наибольшая эффективность рабочего процесса соответствуют уплотнению с контактными давлениями, близкими к критическим для данного типа и состояния асфальтобетонной смеси. Под критическим силовым воздействием понимаются нагрузки, превышение которых может вызвать брак уплотняемой поверхности.

В результате многолетних исследований Хархутой Н.Я. и Пермяковым В.Б. была рекомендована следующая величина критических силовых воздействий на слой [95, 123]:

$$\sigma_{кр} = (0,9 - 1,0) \cdot \sigma_p, \quad (1)$$

где  $\sigma_{кр}$  – критическое напряжение, Па;  $\sigma_p$  – предел прочности асфальтобетонной смеси, Па.

Однако в ряде случаев при уплотнении верхних слоев асфальтобетонных покрытий силовые воздействия, оказываемые на материал дорожным катком, назначенные согласно данному условию, превышают предел прочности смеси, что приводит к образованию поверхностных дефектов. Исходя из многолетнего практического опыта, Костельовым М.П. предложено понизить величину силовых воздействий на 25% ввиду частого перенагружения слоя [68]:

$$\sigma_{кр} = (0,65 - 0,75) \cdot \sigma_p; \quad (2)$$

Вследствие изменения прочностных характеристик дорожной поверхности в процессе укатки для определения критических напряжений, необходимых для наиболее эффективного уплотнения соответствующей асфальтобетонной смеси, требуется установить зависимость ее предела прочности от плотности и температуры.

Полученные значения критических напряжений следует сопоставить с контактными давлениями под рабочим органом дорожного катка. Основываясь на теории Герца-Беляева, рассматривающей напряжения, возникающие при перекачивании цилиндра по ровной поверхности, профессором Хархутой Н.Я. [26] была предложена зависимость для вычисления величины максимальных давлений под движущимся вальцом асфальтобетонного катка:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{qE_0}{R}} \approx 1,4 \sqrt{\frac{Q_B E_0}{BD}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальные контактные давления, Па;  $q$  – удельное линейное давление, Н/м;  $E_0$  – модуль деформации материала, Па;  $Q_B$  – статическая сила воздействия рабочего органа катка на уплотняемый слой, Н;  $B$  – ширина вальца, м;  $R, D$  – радиус и диаметр вальца соответственно, м.

Результаты расчетов контактных давлений по формуле (3) показали хорошую сходимость с практикой, при этом наилучшим образом данная зависимость описывает уплотнение различных грунтовых материалов дорожными катками.

Рассматриваемая закономерность обладает также существенным недостатком. В данной формуле не учитывается толщина уплотняемого материала, что приводит к равенству контактных давлений, возникающих на слоях разной толщины. С учетом влияния различной осадки слоев смеси Костельовым М.П. [65] была разработана следующая формула для расчета контактных давлений под рабочим органом дорожного катка:

$$\sigma_{\kappa} = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 E_0}{B^2 D h}}, \quad (4)$$

где  $h$  – толщина слоя, м.

В случае вибрационного способа уплотнения асфальтобетонной смеси в выражении (4) вместо  $Q_B$  необходимо использовать динамическую силу  $R_B$ , величина которой в течение одного рабочего цикла может изменяться в диапазоне от 60% до 140% от возмущающей силы  $P_0$ , поэтому для расчетов обычно используется ее усредненное значение, соответствующее середине процесса уплотнения, т.е.  $R_B = P_0$ .

Назначение катка в соответствии с оптимальными значениями контактных давлений весьма затруднено вследствие криволинейности поверхности рабочего органа уплотняющей машины и постоянно изменяющейся площади ее контакта с материалом, зависящей как от диаметра и ширины вальца, так и от величины его осадки в асфальтобетонную смесь. Поэтому для оценки уплотняющей

способности дорожных катков и сравнения их между собой Костельовым М.П. [62] было предложено использование контактных давлений на единичном слое с единичным модулем деформации  $p_k$ :

$$p_k = \sqrt[3]{\frac{Q_B^2 \Delta_E}{B^2 D \Delta_h}}, \quad (5)$$

где  $\Delta_E=1$  – единичный модуль деформации, Па;  $\Delta_h=1$  – единичная толщина слоя, м.

Для определения динамических контактных давлений  $p_{kq}$  на единичном слое необходимо вместо статической силы воздействия рабочего органа катка использовать ее динамический аналог. Преимущество показателей  $p_k$  и  $p_{kq}$  заключается в том, что для их расчета используются только паспортные данные уплотняющей машины, и с их помощью возможно оценить функциональность катков различного размера и массы.

Ввиду непрерывного изменения прочностных и деформативных свойств асфальтобетонной смеси во время укатки необходимо производить пропорциональное увеличение силового воздействия, оказываемого на дорожную поверхность со стороны рабочего органа машины. Поэтому для установления рациональных режимов уплотнения дорожного покрытия требуется произвести моделирование процесса взаимодействия вальцов катков со слоем смеси.

Для достижения максимальной эффективности уплотнения катки должны иметь возможность плавного изменения контактных давлений под рабочими органами на протяжении всего процесса укатки, что объясняет наличие на рынке многообразия дорожных машин, постепенно увеличивающихся по своей массе и габаритам. Широкие требования к средствам уплотнения и варьированию их контактных давлений, вызванные применением различных составов, типов и марок смесей, изменением толщины уплотняемых слоев, а также погодных условий и температуры, обуславливают потребность в применении комплекта асфальтобетонных катков, оказывающих различные силовые воздействия на слой.

Вследствие низкой универсальности существующих катков традиционная технология уплотнения асфальтобетонных смесей предусматривает в процессе укатки последовательное введение в работу дорожных машин различного типа.

По мере выполнения соответствующего количества проходов, после которых воздействие на материал уже неэффективно, производится смена средства уплотнения другим катком с более высокими силовыми параметрами. Для каждого типа асфальтобетонных катков согласно создаваемым уплотняющим воздействиям определены рациональные температурные диапазоны их применения. Процесс укатки горячей асфальтобетонной смеси можно схематически представить с помощью графика, представленного на рисунке 7, где по оси ординат расположена температура уплотняемой смеси, а по оси абсцисс – силовой параметр дорожного катка  $q/R$ , эквивалентный контактному давлению под вальцом катка. Основными линиями показан диапазон применения согласно традиционной технологии уплотнения, а пунктиром – наиболее рациональный режим укатки покрытия.

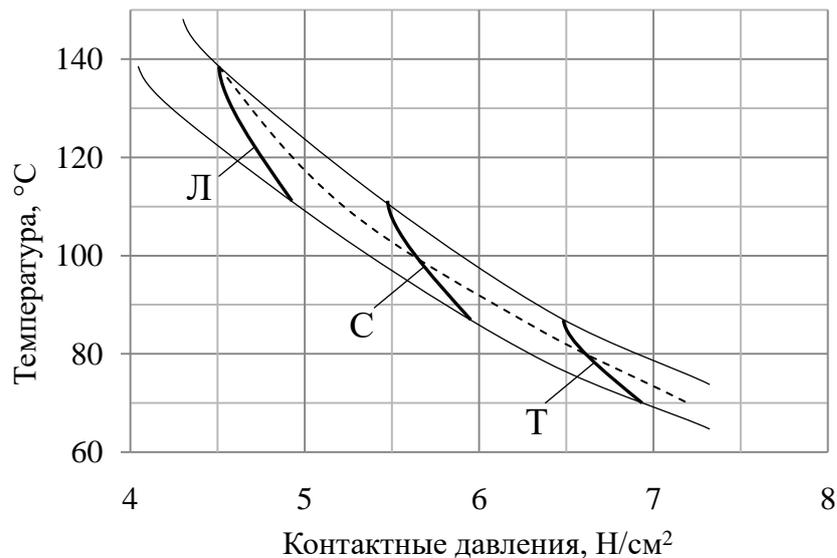


Рисунок 7 – Технологическая схема укатки смеси звеном дорожных катков.

На первом этапе укатка производится с помощью легкого катка с начальным контактным давлением менее предела прочности смеси. В процессе уплотнения данный показатель материала существенно возрастает по сравнению с его первоначальным значением ввиду роста плотности и снижения температуры, в то время как контактные давления под вальцом дорожной машины лишь незначительно увеличиваются вследствие уменьшения площади контакта

рабочего органа с покрытием. Так как легким катком больше не может создаваться силовое воздействие, требуемое для уплотнения материала, возникает необходимость в его замене на более тяжелую дорожную машину, оказывающую соответствующие контактные давления. Аналогичным образом происходит смена катков среднего типа на тяжелый.

Сложность применения данной технологической схемы укатки состоит в невозможности точного определения времени задействования катка, начальных параметров его работы, так же как необходимого количества проходов по следу и момента его смены на уплотняющую машину с более высоким силовым воздействием. При этом важно обеспечить непрерывность движения отряда катков в направлении асфальтоукладчика, что затрудняется челночной схемой работы средств уплотнения, а также одновременным использованием нескольких типоразмеров машин. Высокая подверженность влиянию человеческого фактора и необходимость четкой организации последовательности применения катков различных типов в стесненных условиях являются существенным недостатком данной технологии уплотнения и источником некачественной работы с низкой производительностью.

Появление дорожных катков, имеющих возможность регулирования таких параметров силового воздействия, как амплитуда и частота колебаний, привело к некоторому расширению диапазона применения вибрационных средств уплотнения. Тем не менее, ввиду ограниченности способов изменения оказываемой нагрузки и неуниверсальности данных машин в настоящее время по-прежнему сохраняется необходимость использования звенного принципа работы для проведения укатки покрытия. В свою очередь, наибольшая эффективность выполнения данной операции может быть достигнута только при использовании дорожного катка, позволяющего производить уплотнение на всех стадиях укатки, и назначении рационального режима его работы.

Другой особенностью асфальтобетонной смеси, уложенной в покрытие, выдвигающей дополнительные требования к проведению укатки, является неравномерное остывание материала по ширине дорожного полотна. Для

достижения однородности распределения плотности по ширине покрытия необходимо производить уплотнение, начиная с края слоя асфальтобетонной смеси и постепенно смещаясь с заданным перекрытием предыдущего следа в сторону середины, как показано на рисунке 8 [118]:

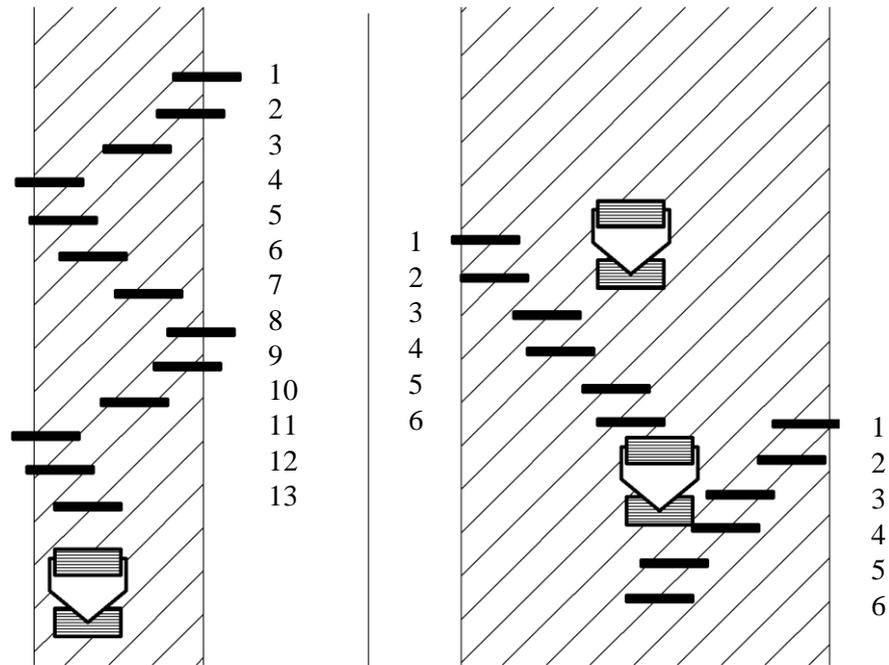


Рисунок 8 – Схема перекрытия следов катка в процессе укатки смеси.

Ввиду того, что определение величины перекрытий производится машинистами катков вручную, синхронизация работы дорожных машин внутри звена еще более усложняется. В настоящее время происходит активное внедрение спутниковых систем, отслеживающих с помощью GPS количество проходов катка по следу и выводящих на экран машиниста информацию о положении других средств уплотнения. Тем не менее, на данном этапе применение таких систем способно лишь облегчить управление дорожным катком в процессе уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, но не позволяет полностью автоматизировать процесс укатки.

Значительное повышение производительности достигается при использовании дорожных катков, в конструкции которых реализован механизм поворота вальца. Шарнирное сочленение рабочих органов позволяет существенно улучшить маневренность машины и добиться бокового смещения вальцов на

величину до 1,3 м относительно друг друга, что практически в 2 раза увеличивает ширину захвата [142].

При разработке технологической карты укатки асфальтобетонной смеси также важно принимать во внимание необходимость технологических отлучек отдельных средств уплотнения, а также возможность возникновения заторов и различных помех в процессе работы, вызванных большим количеством задействованной дорожной техники.

Таким образом, вследствие низкой универсальности существующих средств уплотнения, сложности организации их совместной работы в составе звена машин и высокой степени влияния человеческого фактора на процесс укатки применяемые в настоящее время дорожные катки являются неэффективными и не позволяют обеспечить получение дорожного покрытия с высоким качеством. В результате возникает необходимость и целесообразность разработки нового многофункционального катка, увеличивающего производительность и снижающего себестоимость укатки.

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

Для достижения цели диссертации необходимо решить следующие задачи:

- 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.

## Выводы по первой главе

Проведенный анализ исследований, посвященных изучению средств и технологии уплотнения горячих асфальтобетонных смесей, а также закономерностей изменения свойств дорожных материалов в процессе укатки, позволяет сделать следующие выводы:

1. Применяемые в настоящее время средства уплотнения обладают низкой универсальностью и узким диапазоном изменения силовых воздействий на слой асфальтобетонной смеси, вследствие чего являются неэффективными с точки зрения производительности и себестоимости укатки, а также не позволяют гарантировать получение качественного дорожного покрытия.

2. Для интенсификации существующей технологии уплотнения требуется разработка многофункционального катка, позволяющего нивелировать недостатки применяемых дорожных машин, заменив их во всем температурном диапазоне укатки.

3. Разработку методики расчета параметров многофункционального катка необходимо осуществлять на основе моделирования процессов взаимодействия рабочих органов машины с асфальтобетонной смесью вследствие постоянного изменения ее прочностных и деформативных свойств во время укатки.

4. Рациональный режим работы машины достигается в случае равенства контактных давлений под вальцами катка критическим напряжениям уплотняемого слоя, напрямую зависящим от его прочностных характеристик. Для наиболее эффективного уплотнения определенной асфальтобетонной смеси требуется установить зависимости ее предела прочности от плотности и температуры в диапазоне значений, соответствующем укатке дорожных покрытий.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КАТКА С АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСЬЮ

### 2.1 Конструкция многофункционального катка

На основании выявленных недостатков существующих средств уплотнения асфальтобетонных смесей и анализа актуальных направлений развития дорожной техники предлагается конструкция нового многофункционального катка, сочетающего преимущества вибрационных и пневмошинных машин и имеющего возможность регулирования контактных давлений в широком диапазоне. Использование данного асфальтобетонного катка позволяет сократить издержки выполнения дорожных работ и повысить их качество путем повышения степени автоматизации процесса укатки. На рисунке 9 представлено схематическое изображение многофункционального средства уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий.

Особенностью данной машины является закрепление на раме 1 двух рабочих модулей 2, каждый из которых состоит из пары разнородных вальцов: пневмошинного 3 и гладковальцового вибрационного 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 [90].

Повышенная маневренность и значительное увеличение ширины захвата реализуется за счет использования поворотной платформы 6, закрепленной в подшипнике 9 при помощи вертикальной оси 10. Вращение платформы осуществляется гидроцилиндром 11, связанным с осью речной передачи 12.

Двигатель 13 машины расположен между рабочими модулями, равномерно распределяя вес на каждый из них.

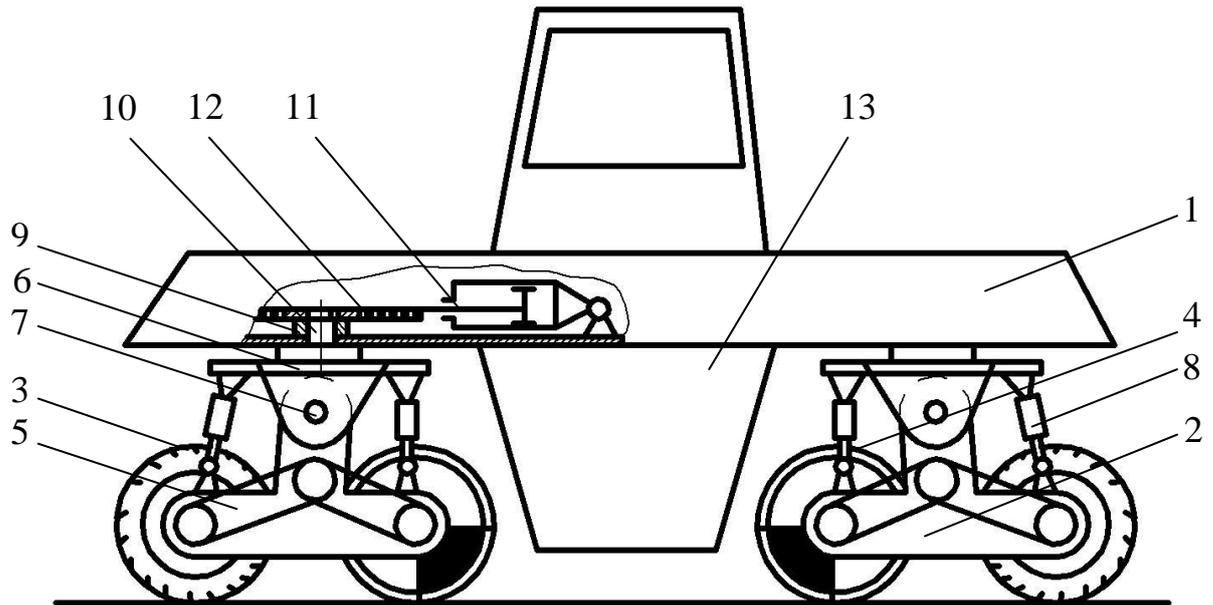


Рисунок 9 – Схематическое изображение многофункционального катка.

Пример расположения вальцов многофункционального дорожного катка при уплотнении двух сопряженных полос представлен на рисунке 10. Многофункциональный каток может также производить укатку одновременно с обеих сторон дорожного покрытия, обеспечивая получение поверхности с равномерной плотностью по ширине.

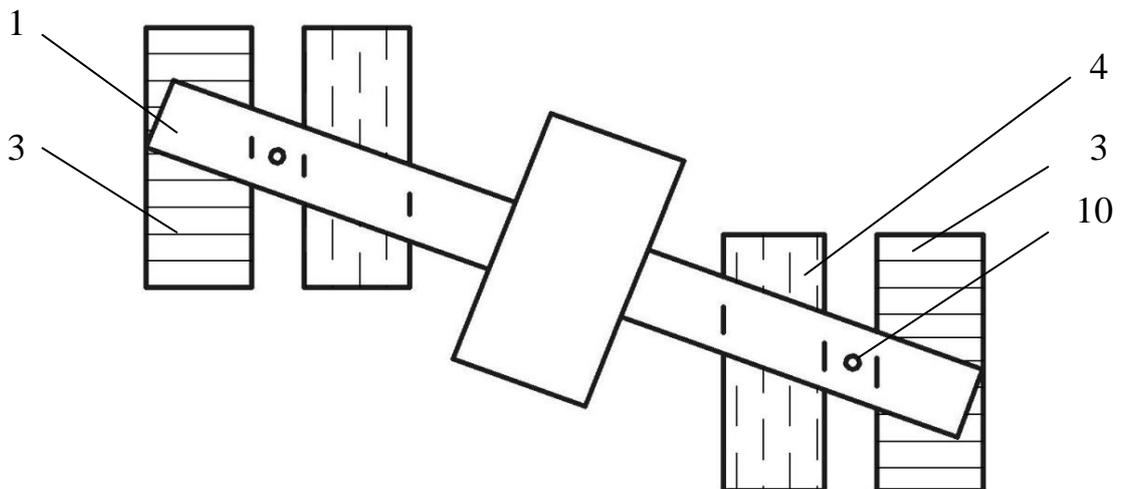


Рисунок 10 – Положение вальцов катка при одновременной укатке двух полос.

Способность данного многофункционального катка изменять оказываемое на материал силовое воздействие значительно расширяет диапазон его применения. На рисунке 11 показаны варианты передачи нагрузки на уплотняемую поверхность:

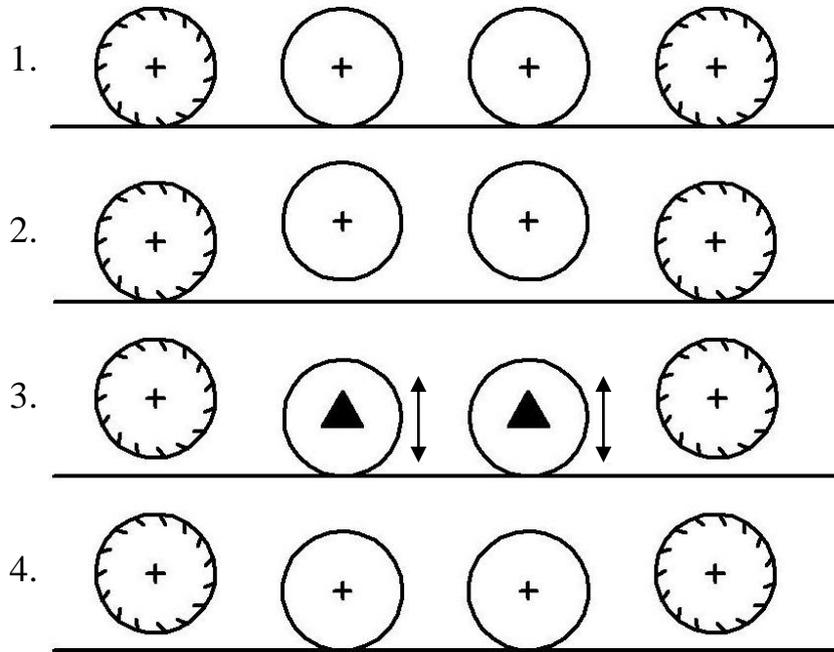


Рисунок 11 – Варианты передачи силового воздействия на уплотняемый слой.

Благодаря примененным техническим решениям рассмотренная машина имеет большое количество вариантов изменения контактных давлений, что позволяет ей рациональным образом производить уплотнение асфальтобетонной смеси во всем температурном диапазоне, исключив при этом звенность работы катков, являющуюся одним из главных недостатков существующей технологии, и повысив тем самым эффективность укатки. Использование многофункционального средства уплотнения дает возможность автоматизировать работу машины с помощью специального программного обеспечения, разработанного на основе технологии уплотнения смесей данным катком, и минимизировать влияние человеческого фактора на процесс укатки дорожного покрытия.

## 2.2 Анализ расчетных моделей процесса взаимодействия вальцов дорожных катков с уплотняемым покрытием

Расчет параметров средств уплотнения и установление рациональных режимов укатки горячих асфальтобетонных смесей требуют детального изучения закономерностей процессов взаимодействия вальцов катков с дорожным покрытием. Напряженно-деформированное состояние, возникающее в результате силового воздействия рабочих органов на слой смеси, зависит как от характера оказываемой нагрузки, так и от физико-механических свойств материала. Изменение силового воздействия на слой, вызванное уменьшением величины контактной площадки и увеличением реальной амплитуды колебаний, многокомпонентность асфальтобетонной смеси, непрерывный рост прочностных и деформативных показателей материала во время укатки значительно затрудняют математическое описание процесса уплотнения.

Широкое распространение для решения подобных задач получил подход, заключающийся в замене исследуемых физических процессов определенными расчетными моделями, имеющими схожие с реальными характеристики и описываемые известными математическими законами. Детальное рассмотрение всех взаимодействий позволяет повысить точность получаемой модели, но также приводит к усложнению применяемого математического аппарата. Поэтому в большинстве случаев требуется прибегать к идеализации свойств асфальтобетонной смеси и некоторому упрощению постановки задачи, что увеличивает отклонение результатов расчета от реальных значений физических величин.

Одним из первых модельный подход к анализу напряженно-деформируемого состояния, развивающегося в слое смеси под вальцом катка, был применен Калужским Я.А. [52]. Автор представлял процесс уплотнения дорожных покрытий как качение жесткого цилиндра по деформируемому слою, имеющему вариативные физико-механические характеристики. Расчетная схема взаимодействия рабочего органа дорожной машины со слоем асфальтобетонной

смеси показана на рисунке 12. Калужский Я.А. рассматривает три зоны деформации с различными условиями уплотнения материала. В первой зоне  $ab$  преобладают нежелательные пластические деформации, развивающиеся в направлении движения дорожной машины, в то время как во второй  $bc$  имеют место в основном вертикальные перемещения частиц материала, и происходит интенсивное уплотнение смеси. Третья зона  $cd$  соответствует периоду последствия нагрузки, характеризующемуся снижением величины напряжений в слое и развитием упругих деформаций. В принятой расчетной схеме вязкие свойства асфальтобетонной смеси во внимание не принимаются, и, как следствие, влияние вязкоупругой части деформации также не учитывается.

Калужский Я.А. выделяет элементарный столбик слоя, представленный на рисунке 13, и рассматривает оказываемое на него влияние со стороны различных сил в процессе уплотнения. На столбик действуют силы со стороны рабочего органа катка  $q_x = qdx/\cos\varphi$  и  $\mu qdx/\cos\varphi$ , реактивные силы  $\sigma_{cp}$  и  $\sigma_{cp} + d\sigma$ , а также силы реакции основания  $\alpha q$  и  $\mu_1 \alpha q$ . Отдельные элементарные отрезки взаимодействуют друг с другом только посредством бокового давления, при этом возникающие касательные напряжения не учитываются. Тогда вертикальные перемещения в зонах, находящихся рядом с границей контакта вальца катка и поверхностного слоя, отсутствуют, что противоречит результатам практических исследований.

На основании проведенного анализа принятой расчетной схемы взаимодействия вальца катка с уплотняемым материалом Калужским Я.А. было получено уравнение для определения линейного давления в каждой из зон деформации:

$$q_x = q_{\max} \left( \frac{H_K}{H} \right)^{1 - \frac{2}{\mu + \alpha \mu_1}} e^{\pm \frac{2\sqrt{2R}}{\sqrt{H_0}} \left[ \arctg \frac{\sqrt{H_K - H_0}}{\sqrt{H_0}} - \arctg \frac{\sqrt{H - H_0}}{\sqrt{H_0}} \right]}, \quad (6)$$

где  $q_x$  – линейные давления на расстоянии  $x$  от вертикальной оси вальца, Н/м;  $q_{\max}$  – максимальные линейные давления, Н/м;  $H_K$ ,  $H_0$ ,  $H$  – деформация слоя, в начале 2-й зоны, под вертикальной осью вальца и на расстоянии  $x$  от оси соответственно, м;  $\mu$ ,  $\mu_1$  – коэффициенты трения частиц смеси о валец катка и дорожное основание;  $\alpha$  – безразмерный коэффициент.

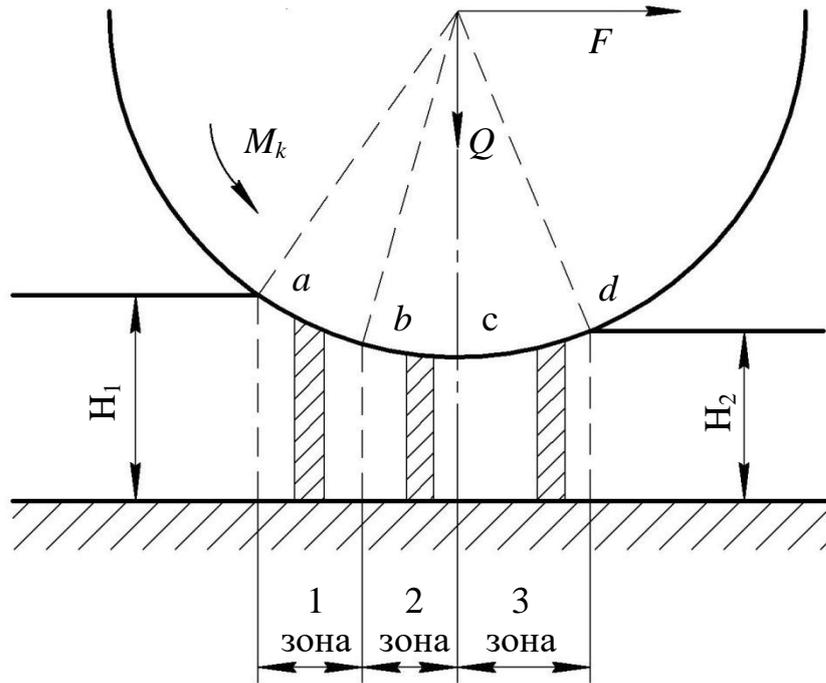


Рисунок 12 – Расчетная схема взаимодействия гладкого вальца катка со слоем асфальтобетонной смеси.

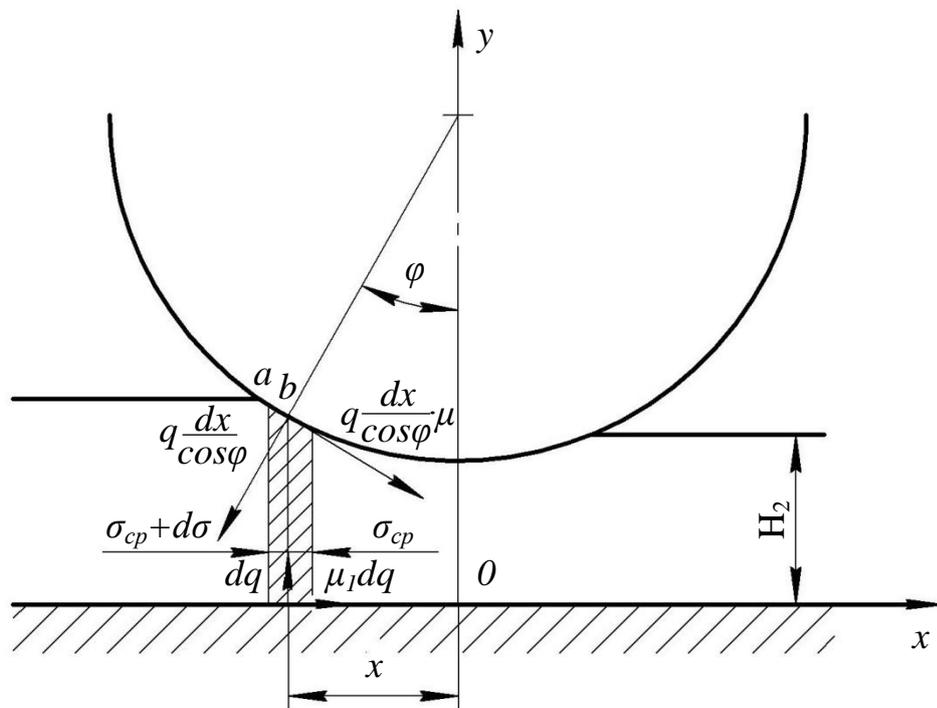


Рисунок 13 – Схема действия сил на элементарный столбик уплотняемого материала.

Помимо принятых в расчетной схеме допущений, в выражении (6) не учитывается ряд важных параметров, таких как режим работы дорожного катка, физико-механические свойства материала, условия окружающей среды и др. Кроме того, ввиду отсутствия в работе [52] методики определения максимальных линейных напряжений, а также сложности установления ряда коэффициентов практическое применение данной зависимости является затруднительным.

Зависимость развития напряжений и деформаций в слое асфальтобетонной смеси от ее температуры и времени приложения нагрузки определило широкое распространение реологических моделей для описания взаимодействия рабочих органов катков с уплотняемым покрытием. Большой вклад в изучение реологических процессов в дорожно-строительных материалах внесли работы Богуславского А.М. [11, 12], Вялова С.С. [17], Леонович И.И. [74], Руденского А.В. [110], Пермякова В.Б. [96], Золотарева В.А. [32], Li Y.Y. [161], Beainy F. [190] и др. [10, 136, 158].

Реологические свойства асфальтобетонной смеси характеризуются ползучестью и способностью к релаксации напряжений. В качестве основных механических характеристик уплотняемого материала выступают упругость, вязкость и пластичность, которые описываются с помощью фундаментальных реологических моделей, а рассмотренные выше свойства являются производными от базовых и моделируются путем их различной комбинации между собой.

К фундаментальным относятся реологические модели идеально упругого тела (Гука), идеально вязкого тела (Ньютона) и модель Сен-Венана, показанные на рисунке 14:

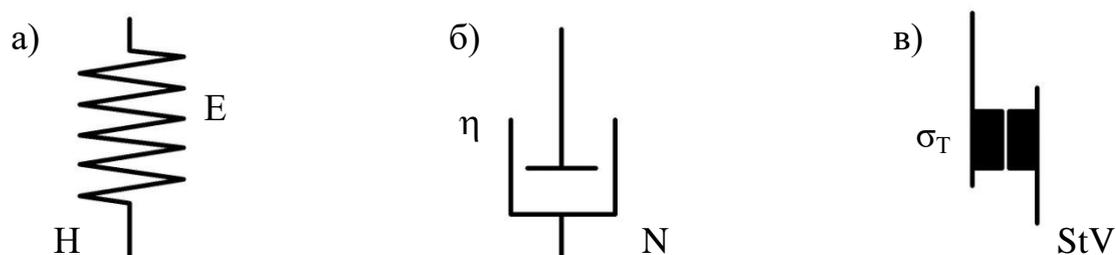


Рисунок 14 – Фундаментальные реологические модели: а) модель Гука (H);  
 б) модель Ньютона (N); в) модель Сен-Венана (StV).

Модель Гука отражает поведение идеально упругого тела под нагрузкой, деформации которого полностью исчезают после ее снятия. Зависимость напряжения от деформации описывается следующим выражением, известным как закон Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжение, Па;  $E$  – модуль упругости, Па;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

Механической интерпретацией модели Ньютона служит поршень, перемещающийся в цилиндре с идеально вязкой жидкостью. При этом скорость приложения нагрузки пропорциональна создаваемому напряжению:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – вязкость жидкости, П.

Принцип действия модели Сен-Венана заключается в том, что при напряжениях, меньших предела текучести смеси  $\sigma_T$ , деформация элемента отсутствует, а при достижении данного уровня наступает необратимое пластическое течение материала.

Для описания более сложных свойств смеси используются многоэлементные системы, такие как модель Бингама, Бюргерса, Шведова, Богуславского и др. Тем не менее, данные модели имеют некоторые недостатки, среди которых неучитывание релаксации напряжений, отсутствие пластического течения материала, невозможность замедленного развития деформаций и их обратимость при напряжениях меньших предела текучести.

В связи с этим следует отметить модель лестничного типа, предложенную Иванченко С.Н. [44]. Ее особенностью является использование элемента затвердевания Прагера, отражающего уплотнение материала под действием нагрузки. Данный элемент активируется при деформациях, соответствующих некоторой критической величине  $\varepsilon_0$ , в результате чего их дальнейшее развитие при увеличении напряжений прекращается, и наступает мгновенное уплотнение материала.

Неотъемлемой частью лестничной модели, показанной на рисунке 15, служат параллельно соединенные тела Гука  $K_i^*$  и Сен-Венана  $\tau_i^*$ , задействуемые при нагружении последовательно друг за другом. Они создают отдельные микромоделей, максимальные пластические деформации в которых соответствуют величине  $\varepsilon_i$ . При достижении данных значений происходит замыкание соответствующего элемента Прагера и введение в работу последующей микромодели.

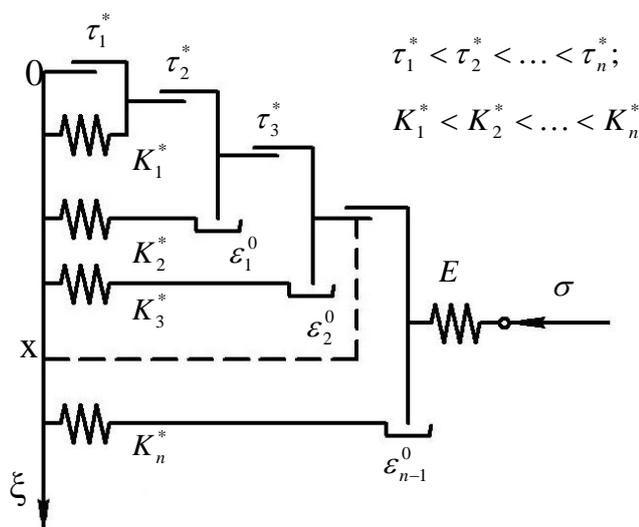


Рисунок 15 – Модель лестничного типа Иванченко С.Н.

Для повышения точности расчетов необходимо использование большого количества микромоделей. В таком случае более целесообразным является введение функции распределения параметров элементов внутри лестничной модели  $\xi$  и рассмотрение ее в непрерывном виде. Тогда при прямом нагружении уравнения, характеризующие поведение данной модели, будут иметь вид:

$$\begin{cases} \varepsilon^* = \varepsilon^e + \varepsilon^{p*}; \\ \varepsilon^e = \sigma / E; \\ \varepsilon^{p*} = \int_0^x \frac{\partial \tau^*}{\partial \xi} \cdot \frac{1}{K^*(\xi)} d\xi; \\ \sigma = \tau^*(\xi); \end{cases} \quad (9)$$

где  $\tau^*(\xi)$ ,  $K^*(\xi)$  – плотность распределения элементов Сен-Венана и Гука;  $\varepsilon^e$  – деформация упругих тел,  $\varepsilon^{p*}$  – пластическая деформация.

В случае обратного нагружения автор рассматривает работу лестничной модели без учета элемента уплотнения. При этом происходит последовательное замыкание незадействованных микромоделей уже вступившими в работу, что описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \sigma = \tau(\xi) + \varepsilon^p \cdot \int_x^{x_0} K(\xi) d\xi; \\ \frac{\partial \tau}{\partial \xi} = \varepsilon^p \cdot K(\xi); \\ \varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p; \\ \varepsilon^e = \sigma/E; \end{cases} \quad (10)$$

где  $0 \leq x \leq x_0$  и  $0 \leq \xi \leq \xi_0$ .

Переход к непрерывной лестничной модели позволил Иванченко С.Н. выдвинуть статистическую теорию уплотнения асфальтобетонных смесей. За основу автором была принята теория пластичности Новожилова В.В. и Кадашевича Ю.И. [83, 84], рассматривающая остаточные микронапряжения и изменение объема в материале. Согласно данной теории, уравнение поверхности текучести, характеризующее деформирование тела, имеет вид:

$$f = \bar{T}_i + \beta \cdot \bar{T}_0 = \sqrt{2} \cdot \sigma_T, \quad (11)$$

где  $T_i = \sqrt{T'_{ij} \cdot T'_{ij}}$  – интенсивность активных напряжений;  $T'_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho'_{ij}$  – девиатор тензора активных напряжений;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности;  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_{ii}$  – девиатор тензора напряжений;  $T_0 = \frac{1}{3} T_{ii}^0 \cdot \delta_{ij}$  – шаровая часть тензора активных напряжений;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $T_{ii}^0 = T_{ii} - \rho_0$  – объемная часть тензора активных напряжений;  $\rho'_{ij}, \rho_0$  – девиаторная и шаровая части тензора остаточных напряжений  $\rho_{ij}$ , определяющего положение центра поверхности текучести [44].

Статистическая теория Иванченко С.Н. рассматривает уплотнение материалов в изотермических условиях без учета предыстории их нагружения. Автором вводится понятие локального предела уплотнения  $u_0$ , выступающего в качестве главного случайного параметра задачи. Приняв интегральную функцию

распределения за  $\Phi(u_0)=\xi$ , можно получить выражения для осредненных напряжений и деформаций:

$$\langle \varepsilon_{ij}^p \rangle = \int_0^1 \varepsilon_{ij}^p(\xi) d\xi; \quad \langle u \rangle = \int_0^1 u(\xi) d\xi; \quad (12)$$

Тогда модули девиаторного упрочнения  $K_1$  и объемного упрочнения  $K_2$  будут рассчитываться следующим образом:

$$K_1(\xi) \cdot \varepsilon_{ij}'^p = \frac{\partial T_{ij}'}{\partial \xi}; \quad (13)$$

$$K_2(\xi) \cdot \varepsilon_{ij}'^p = \frac{\partial T_0'}{\partial \xi}; \quad (14)$$

Зависимость между напряжением и деформационной анизотропией, развивающимися в материале вследствие простого нагружения, определяется следующим уравнением:

$$\sigma_i + \frac{\beta(x)}{3} \sigma_0 = \int_0^x \varepsilon_{ii}^p(\xi) \cdot \left[ \frac{3 \cdot K_1(\xi) + \beta(\xi) \cdot \beta(x) \cdot K_2(\xi)}{3 \cdot \beta(\xi)} \right] d\xi; \quad (15)$$

В правой части выражения (15) расположены параметры, описывающие сопротивление тела деформированию, в то время как слева находятся слагаемые, определяющие нагружение материала.

Из этого следует, что применение статистической теории позволяет установить требуемые характеристики напряженно-деформированного состояния, возникающего в процессе взаимодействия вальцов катка с уплотняемым слоем, и тем самым обеспечивает возможность назначения оптимальных режимов укатки горячих асфальтобетонных смесей. Учет различных режимов нагружения посредством использования элемента затвердевания способствует более точному отображению процесса уплотнения, что также является достоинством структурной модели лестничного типа. К ее недостаткам следует отнести неучитывание толщины слоя смеси, трудоемкость математического моделирования постоянно изменяющихся условий прикладных задач, а также необходимость экспериментального определения коэффициентов, входящих в правую часть уравнения (15), для описания свойств материала.

Наиболее прогрессивной на данный момент является модель взаимодействия рабочих органов вибрационного катка с асфальтобетонной смесью, разработанная Пермяковым В.Б. и Серебренниковым В.С. [91, 94, 115]. В предложенной модели, показанной на рисунке 16, учитывается как динамика элементов уплотняющей машины в момент укатки слоя, так и реологические процессы, протекающие при этом в материале.

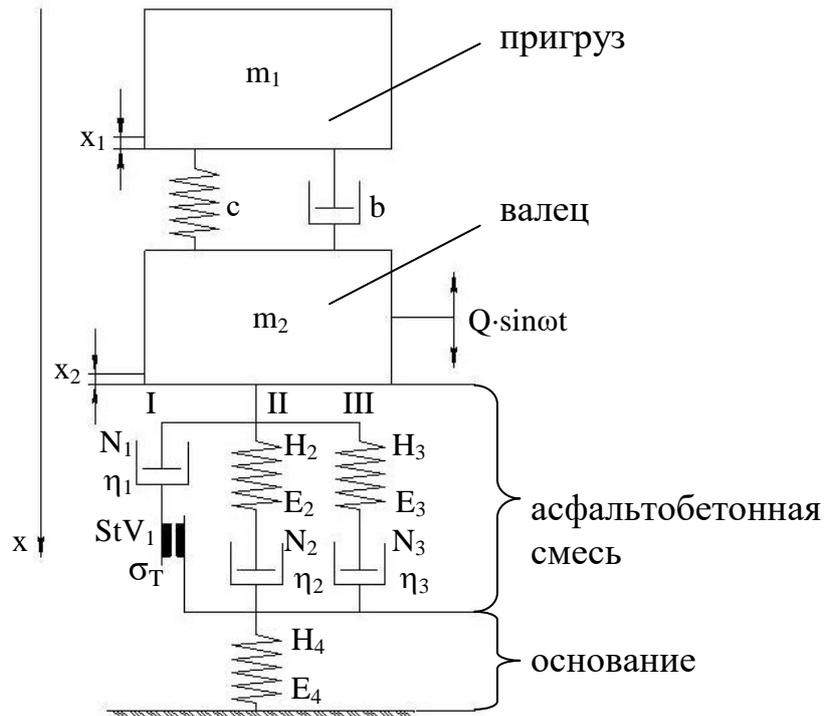


Рисунок 16 – Модель взаимодействия валцов вибрационного катка с асфальтобетонной смесью Пермякова-Серебренникова.

Представленная выше обобщенная модель может быть разделена на две составляющих: колебательную систему «пригруз – вибровалец» и реологическую модель асфальтобетонной смеси, что позволяет значительно упростить математическое описание поведения каждой из них в процессе уплотнения. Тогда колебательное движение первой подмодели будет характеризоваться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c \cdot (x_1 - x_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c \cdot (x_1 - x_2) = Q \cdot \sin \omega t + m_2 \cdot g - P(t) \end{cases}, \quad (16)$$

где  $m_1$  – масса пригруза катка, кг;  $m_2$  – масса рабочего органа, кг;  $b$  – коэффициент вязкостного трения амортизаторов, Па·с;  $x_1, x_2$  – перемещение в вертикальной плоскости пригруза и вальца соответственно, м;  $c$  – жесткость амортизаторов, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $Q$  – возмущающая сила, Н;  $t$  – время колебания, с;  $\omega$  – угловая частота вала вибровозбудителя, рад/с;  $P(t)$  – реакция, оказываемая со стороны уплотняемого материала, Н.

Сложив между собой уравнения в системе (16), а также используя выражения для площади пятна контакта  $F_k(t)=L_{AB}(t) \cdot B$  и напряжений под вальцом катка  $\sigma_k(t)=P(t)/F_k(t)$ , можно получить соотношение между деформацией слоя и контактным давлением под рабочим органом для первой подмодели:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot \sin \omega t - \frac{(0,02 \cdot m_1 + m_2)}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}, \quad (17)$$

где  $\sigma_k$  – контактные давления под вальцом, Па;  $\varepsilon$  – относительная деформация, равная частному от деления абсолютной деформации  $x(t)=e(t)$  на толщину слоя  $h(t)$ ;  $L_{AB}(t)$  – длина дуги контакта вальца с уплотняемым слоем, рассчитываемая по формуле [115]:

$$L_{AB}(t) = \frac{\pi \cdot R}{180} \cdot \arccos \frac{R - \Delta e}{R}, \quad (18)$$

где  $\Delta e$  – прирост абсолютной деформации слоя после одного прохода, м.

В свою очередь, реологическая модель уплотнения состоит из трех параллельно соединенных блоков, отражающих упруговязкопластичные свойства слоя асфальтобетонной смеси и релаксационные процессы, протекающие в нем. Работа четвертого блока, представляющего собой тело Гука и имитирующего основание дорожного покрытия, ввиду высокой жесткости последнего в исследованиях авторов не рассматривается.

Пластические деформации материала учитываются с помощью элемента Сен-Венана  $StV_1$ , деформирующегося при напряжениях, превышающих предел текучести смеси, при этом вязкий элемент  $N_1$  первого блока остается незадействованным в работе.

Модели Максвелла в блоках II и III отражают соответственно «быструю» и «медленную» релаксацию напряжений. Быстротечная часть спектра релаксаций проявляется вследствие взаимного перемещения крупных элементов минерального скелета смеси, разделенных малопрочными битумными пленками, в то время как продолжительная составляющая спектра протекает в растворной части асфальтобетонной смеси. «Быстрая» релаксация наиболее ярко выражена на начальной стадии укатки, а «медленная» – в большей степени на основной и заключительной, что свидетельствует о постоянном перераспределении частей спектров в процессе уплотнения.

Используя метод передаточных функций и рассматривая деформацию как входную величину, можно определить передаточные функции для каждого из блоков реологической модели. Ввиду того, что деформация всех блоков подмодели является равновеликой, а сумма развивающихся в них напряжений равна контактному давлению, оказываемому со стороны рабочего органа на слой смеси, будут справедливы следующие выражения:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) = \varepsilon_2(t) = \varepsilon_3(t), \quad (19)$$

$$\sigma_k(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t) + \sigma_3(t) = \sigma_1(t) + n \cdot \sigma_k(t) + m \cdot \sigma_k(t), \quad (20)$$

где  $n$ ,  $m$  – коэффициенты, характеризующие распределение напряжений между блоками II и III соответственно.

Тогда общая передаточная функция реологической подмодели будет иметь следующий вид:

$$(\eta_2\theta_3 + \eta_3\theta_2) \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + (\eta_2 + \eta_3) \frac{d\varepsilon}{dt} = (\sigma_k - \sigma_T) + \theta_2\theta_3 \frac{d^2\sigma_{2-3}}{dt^2} + \theta_2 \frac{d\sigma_2}{dt} + \theta_3 \frac{d\sigma_3}{dt}, \quad (21)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести асфальтобетонной смеси, Па;  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  – вязкость смеси в блоке II и III соответственно, П;  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  – время «быстрой» и «медленной» релаксации в блоке II и III соответственно, с.

Совместное решение выражений (17) и (21) позволяет получить основную систему дифференциальных уравнений, характеризующую взаимодействие вальца вибрационного катка с уплотняемым слоем при укатке дорожного покрытия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot \sin \omega t - \frac{(0,02 \cdot m_1 + m_2)}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} \\ (\eta_2 \theta_3 + \eta_3 \theta_2) \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + (\eta_2 + \eta_3) \frac{d \varepsilon}{dt} = (\sigma_k - \sigma_T) + nm \theta_2 \theta_3 \frac{d^2 \sigma_k}{dt^2} + n \theta_2 \frac{d \sigma_k}{dt} + m \theta_3 \frac{d \sigma_k}{dt} \end{array} \right. ; \quad (22)$$

Отличительной чертой представленной модели является детальное рассмотрение реологических процессов, протекающих в материале, выделение быстротечной и продолжительной частей спектра релаксации, а также установление зависимости между толщиной слоя и величиной развивающихся в нем напряжений.

Неучитывание влияния основания дорожного покрытия в процессе уплотнения слоя асфальтобетонной смеси, имитируемой блоком 4, снижает точность данной модели. Необходимость вычисления вязкости материала в заданный момент времени, а также зависимость данной характеристики от частоты колебаний вальца, температуры и многих других показателей делает определение свойств смеси с использованием данной модели на практике затруднительным.

На основе проведенного анализа расчетных схем взаимодействия вальцов катка с уплотняемым материалом можно сделать вывод о невозможности использования известных математических моделей для установления закономерностей процессов нагружения асфальтобетонной смеси рабочими органами дорожных машин. В результате этого возникает потребность в разработке новой математической модели, учитывающей изменение физико-механических характеристик асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения и позволяющей на основе полученных данных определять рациональные параметры дорожных катков, а также назначать наиболее эффективные режимы укатки.

### **2.3 Обоснование использования динамического модуля деформации в модели нагружения асфальтобетонной смеси**

В процессе нагружения асфальтобетонной смеси рабочими органами дорожных катков в ней возникает реактивное сопротивление уплотнению

вследствие оказываемых со стороны вальца силовых воздействий. Среди составляющих данного явления можно выделить сопротивление изменению положения крупных минеральных зерен относительно друг друга, а также сопротивление сжатию материала с последующим вытеснением воздуха из межзернового пространства. Наиболее полно охарактеризовать способность асфальтобетонной смеси противостоять уплотняющему воздействию позволяет динамический модуль деформации. Главным его преимуществом по сравнению с модулем упругости является возможность в большей степени отражать вязкоупругие свойства смеси [113].

Различие в природе материалов обуславливает их разнохарактерное поведение под нагрузкой. Как показано на рисунке 17, оно проявляется в величине сдвига фаз между прикладываемым напряжением и развивающимися в слое деформациями. Фазовый угол  $\varphi$ , равный нулю, свидетельствует о чисто упругом материале, в то время как его значение равно  $90^\circ$  соответствует чисто вязкому. В свою очередь, величина фазового угла в диапазоне между  $0^\circ$  и  $90^\circ$  свойственна вязкоупругой деформации.

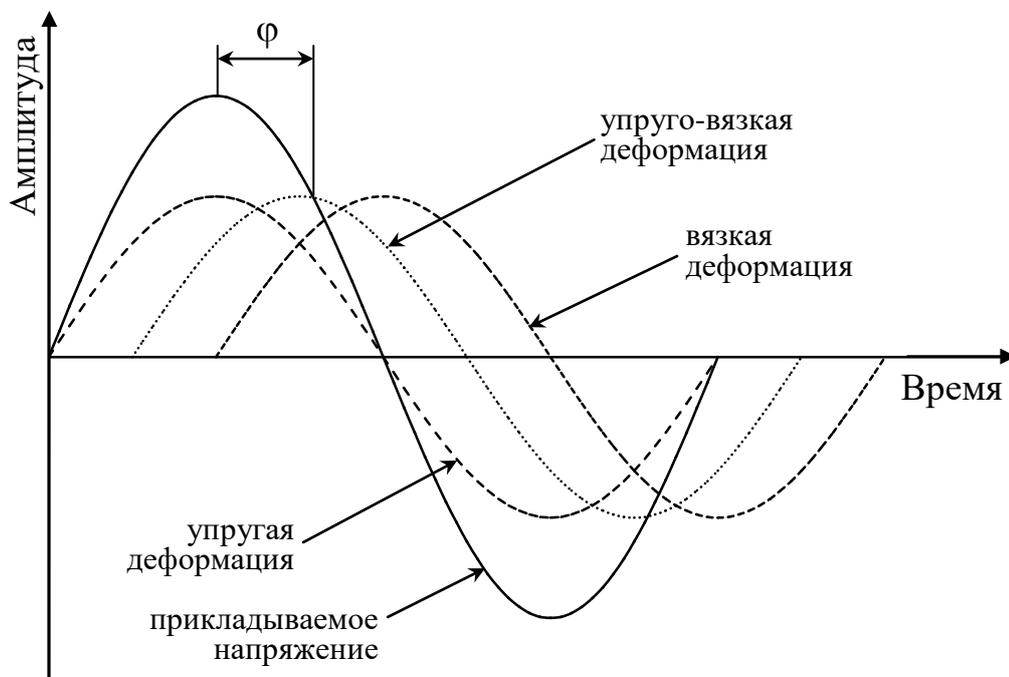


Рисунок 17 – Изменение напряжения и деформации для различных материалов.

Динамический модуль деформации определяет зависимость напряжения от деформации для вязкоупругих материалов под действием нагрузки. В случае приложения силы, изменяющейся по синусоидальному закону, для данных показателей справедливы следующие закономерности:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t, \quad (23)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (24)$$

где  $\sigma_0$  – максимальное действующее напряжение, Па;  $\varphi$  – фазовый угол между напряжением и деформацией, рад;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $\varepsilon_0$  – максимальная относительная деформация материала.

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 как  $E_0$ . В таком случае данный показатель находится из следующего выражения:

$$E_0 = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}}; \quad (25)$$

Вязкоупругие свойства асфальтобетонной смеси в большой степени зависят от температуры и времени нагружения, но в выражении (25) это не учитывается. Влияние данных факторов в широком диапазоне значений на поведение уплотняемого материала возможно предсказать при помощи принципа температурно-временной суперпозиции.

Согласно данному принципу изменение температуры и времени нагружения действует на асфальтобетонную смесь 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  $t_0$  [121]:

$$t_0 = t / a_{T_0}, \quad (26)$$

$$\log_{10} t_0 = \log_{10} t - \log_{10} a_{T_0}, \quad (27)$$

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

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

$$a_{T_0} = \frac{\eta}{\eta_0} \cdot \frac{T_0 \rho_0}{T \rho}, \quad (28)$$

где  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – вязкость смеси, П.

Свойства асфальтобетона без нижнего индекса 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 (28) исчисляется в Кельвинах, а также не оказывает существенного влияния на плотность смеси, данное выражение может быть приведено к виду:

$$a_{T_0} \approx \frac{\eta}{\eta_0}; \quad (29)$$

Графическая интерпретация принципа температурно-временной суперпозиции была впервые представлена в работе Тобольского и Эндрюса [186]. Так как кривые различных характеристик асфальтобетонной смеси подобны при любых значениях температуры, 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. На основе результатов испытаний, проведенных в некотором временном диапазоне, называемым экспериментальным окном, может быть получено семейство функциональных зависимостей. Кривые модуля сдвига  $G(t)$ , полученные для температур ниже  $T_0$ , переносят в сторону увеличения времени действия нагрузки, в то время как значения при температурах выше  $T_0$  необходимо сместить в сторону, противоположную направлению оси абсцисс. Совокупность данных переносов позволяет построить обобщенную кривую, представленную на рисунке 18.

Зная время действия нагрузки  $t_0$  при температуре  $T_0$  и значение функции температурно-временного смещения  $a_{T_0}$ , можно с помощью выражения (26) рассчитать эквивалентное время нагружения  $t$  при температуре смеси  $T$ .

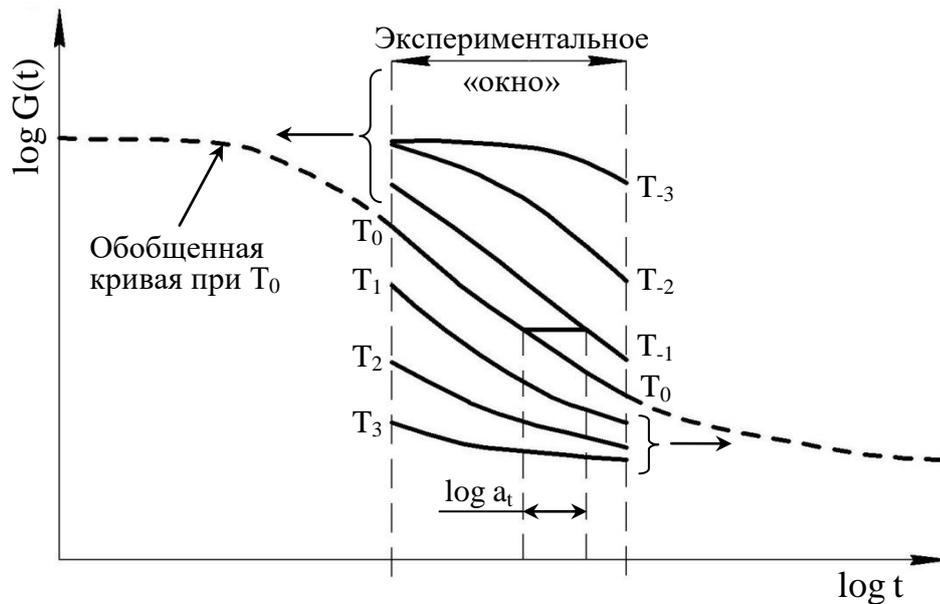


Рисунок 18 – Реализация принципа температурно-временной суперпозиции [169].

Вследствие значительного сокращения трудозатрат по построению обобщенных кривых, отражающих различные свойства асфальтобетонных смесей и их компонентов, большое распространение получили реологические модели, описывающие генерализованные линии с помощью математических законов [143, 147, 157, 163, 174, 181]. В целом данные модели характеризуются удовлетворительной точностью, однако в ряде случаев имеют достаточно большие погрешности при расчете областей повышенных температур и высоких частот, либо содержат большое количество эмпирических коэффициентов.

Для отражения изменения характеристик дорожного покрытия Витчаком [172, 192] было предложено использовать обобщенную кривую, представленную в виде сигмоидальной зависимости. Изменение модуля деформации асфальтобетонной смеси в таком случае описывается следующей функцией:

$$\log_{10} E_0 = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log_{10} t_0}}, \quad (30)$$

где  $\delta$  – минимальное значение модуля деформации, Па;  $\delta + \alpha$  – максимальная величина модуля деформации, Па;  $\beta$ ,  $\gamma$  – параметры, характеризующие форму сигмоидальной кривой.

В своей работе Пеллинен и Витчак [172] показывают взаимосвязь температуры и вязкости асфальтобетонной смеси:

$$\log_{10} t_0 = \log_{10} t - c(\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0), \quad (31)$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности.

Результатом совместного анализа выражений (27) и (31) является следующая зависимость:

$$\log_{10} a_{T_0} = c(\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0); \quad (32)$$

Подстановка формул (27) и (32) в уравнение (30) приводит к получению основного выражения для построения генерализованной линии модуля деформации асфальтобетонной смеси:

$$\log_{10} E_0 = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log_{10} t - c(\log_{10} \eta - \log_{10} \eta_0))}}; \quad (33)$$

Использование сигмоидальной функции позволяет с высокой степенью точности описать обобщенную кривую в широком температурном и частотном диапазонах, что делает возможным применение данного метода для разработки модели прогнозирования динамического модуля деформации асфальтобетонных смесей в процессе их укатки дорожными катками.

В настоящее время существует большое количество различных подходов к определению модуля деформации, в основу которых положены такие решения, как регрессионная модель, учитывающая форму и размер составляющих минерального остова смеси [180], искусственная нейронная сеть [141, 164], микромеханическая модель [150, 179] и др. [137, 151, 160]. Несмотря на перспективность вышеназванных методов, узость выборки зарубежных материалов, задействованных в исследованиях, свидетельствует о низкой универсальности разработанных зависимостей и невозможности их применения для российских асфальтобетонных смесей.

Одной из самых известных и широко используемых закономерностей для определения модуля деформации является модель Хирша, усовершенствованная Кристенсеном [145]. Согласно Хиршу [152], при высоких температурах реакцию асфальтобетона на внешнюю нагрузку можно сравнить с поведением композитного материала с последовательным соединением элементов, а при низких температурах – с параллельным. Вследствие этого предложенная автором

модель представляет собой комбинацию из последовательно и параллельно расположенных звеньев, моделирующих различные фазы смеси. Соотношение между ними не зависело от времени и температуры, и впервые было учтено в альтернативной формулировке Кристенсена:

$$|E_0| = P_c \left[ 4200000 \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G^*|_b \left( \frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[ \frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3VFA \cdot |G^*|_b} \right]^{-1}, \quad (34)$$

где  $VMA$  – пористость минерального остова, %;  $VFA$  – заполнение асфальтобетонной смеси, %;  $|G^*|_b$  – динамический модуль сдвига вяжущего, Па;  $P_c$  – доля контактного объема минерального остова.

Достоинством усовершенствованной модели Хирша является широкий диапазон рассматриваемых значений динамического модуля деформации асфальтобетонных смесей при достаточно высокой точности расчетов ( $R^2=0,982$ ) [145, 148]. К слабым сторонам модели относятся невосприимчивость к изменениям низких значений модуля сдвига, ограниченный и косвенный учет состава смеси, а также значительный рост погрешности вычислений при высоких температурах и низких частотах нагружений [135].

Последний и наиболее существенный недостаток усовершенствованной модели Хирша призвана устранить модель Аль-Хатиба [135], главной особенностью которой служит параллельное соединение компонентов трехфазной системы. Рассматривая вяжущее в качестве несжимаемой среды с коэффициентом Пуассона, равным 0,5, и принимая во внимание объемные соотношения между различными фазами смеси, можно получить общий вид модели Аль-Хатиба:

$$|E_0| = 3 \left( \frac{100 - VMA}{100} \right) \left( \frac{\left( 90 + 1,45 \frac{|G^*|_b}{VMA} \right)^{0,66}}{1100 + \left( 0,13 \frac{|G^*|_b}{VMA} \right)^{0,66}} \right) |G^*|_g, \quad (35)$$

где  $|G^*|_g$  – динамический модуль сдвига при температуре стеклования, Па.

Несмотря на несколько упрощенную постановку задачи, Аль-Хатибом было достигнуто увеличение точности прогнозирования динамического модуля деформации в области высоких температур и низких частот нагружения [162]. Тем не менее, превышение в ходе испытаний рекомендуемых значений амплитуды напряжений в материале, а также небольшая экспериментальная база составов асфальтобетонных смесей обуславливают необходимость дальнейшей верификации модели перед ее практическим использованием.

Наиболее универсальной можно считать переработанную модель Витчака [140], разработанную в ходе многолетнего эмпирического исследования характеристик асфальтобетона. В результате анализа более 2750 опытных значений, полученных в ходе изучения более двухсот различных смесей, на основе сигмоидальной функции было составлено обобщенное уравнение данной модели, названной 1-37А. В стандартном виде рассматриваемой модели зависимость, связывающая динамический модуль деформации асфальтобетона с его температурой, составом минеральной части и частотой прикладываемой нагрузки, записывается следующим образом:

$$\log_{10} E_0 = 7,588583 + 0,02923\rho_{200} - 0,00177(\rho_{200})^2 - 0,00284\rho_4 - 0,058V_a - \frac{0,8022V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021\rho_4 + 0,00396\rho_{38} - 0,000017(\rho_{38})^2 + 0,00547\rho_{34}}{1 + e^{(2,151411 - 0,31361\log_{10} f - 0,393531\log_{10} \eta)}}, \quad (36)$$

где  $\rho_{200}$  – отношение материала прошедшего сито 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.

В ходе проведенного статистического анализа пригодности использования формулы Витчака 1-37А для определения динамического модуля деформации указанных разновидностей смесей был получен коэффициент детерминации 0,886 для обычной шкалы и 0,941 для логарифмической [140], что является хорошим результатом с учетом многообразия влияющих на конечный результат факторов.

Несмотря на то, что анализ свойств асфальтобетона выполнялся при температурах от  $-17,7$  °С до  $54,4$  °С и частотах от  $0,1$  до  $25$  Гц, представление обобщенной кривой в виде сигмоидальной зависимости позволяет значительно расширить диапазоны использования данной модели.

Влияние температуры смеси на ее деформативные характеристики отражено в выражении (36) посредством изменения вязкости битума, рассчитываемой при помощи метода температурной чувствительности (A-VTS) по формуле:

$$\log_{10}(3 + \log_{10} \eta) = A + VTS \log_{10}(1,8T + 491,67), \quad (37)$$

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

Зависимость (37) является линейной, поэтому для установления неизвестных коэффициентов достаточно провести всего две серии опытов по определению вязкости в лабораторных условиях. В настоящее время данные значения уже являются табличными для большого числа битумов.

Альтернативным способом определения вязкости служит закономерность:

$$\eta = \frac{|G^*|_b}{10} \left( \frac{1}{\sin \varphi_b} \right)^{4,8628}, \quad (38)$$

где  $\varphi_b$  – фазовый угол битума, град.

В модели Витчака 1-37А наиболее полно учитываются гранулометрический состав смеси, соотношение между её жидкой фазой и воздушными порами, свойства битума в зависимости от температуры и частота нагружения. Таким образом, данная модель наилучшим образом подходит для прогнозирования динамического модуля деформации, вследствие чего ее применение было также рекомендовано в работах Шварца [177] и Трэна [187].

Помимо температуры одним из главных факторов, оказывающих наибольшее влияние на прочностные и деформативные свойства асфальтобетонной смеси, является ее плотность. В ходе проведенных Сергеевой Т.Н. исследований [113] по изучению взаимосвязи между коэффициентом уплотнения различных смесей и модулем деформации установлено более чем двадцатикратное изменение последнего даже в случае постоянства температуры,

поэтому при разработке технологии уплотнения принципиально важно учитывать изменения характеристик материала по мере роста плотности.

Формула Витчака, предназначенная для определения динамического модуля деформации уже готового дорожного покрытия, не дает возможность определять данный параметр для неуплотненной смеси. Так как в состав зависимости 1-37А входят такие изменяемые в процессе укатки показатели, как объемное содержание воздушных пор и эффективная объемная доля битума, корректировка этих величин с учетом коэффициента уплотнения позволяет получить зависимость для вычисления модуля деформации на всех стадиях процесса уплотнения:

$$\log_{10} E_0 = 7,588583 + 0,02923\rho_{200} - 0,00177(\rho_{200})^2 - 0,00284\rho_4 - \frac{0,058V_a}{K_y^8} - \frac{0,8022V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,87198 - 0,0021\rho_4 + 0,00396\rho_{38} - 0,000017(\rho_{38})^2 + 0,00547\rho_{34}}{1 + e^{(2,151411 - 0,3136\log_{10} f - 0,39353\log_{10} \eta)}}, \quad (39)$$

где  $K_y$  – коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси.

Сравнение экспериментальных данных, представленных в работе Сергеевой Т.Н. [113], со значениями модуля деформации смеси, рассчитанными по предложенной зависимости (39), в широком температурном диапазоне для двух коэффициентов уплотнения смеси показано на рисунке 19:

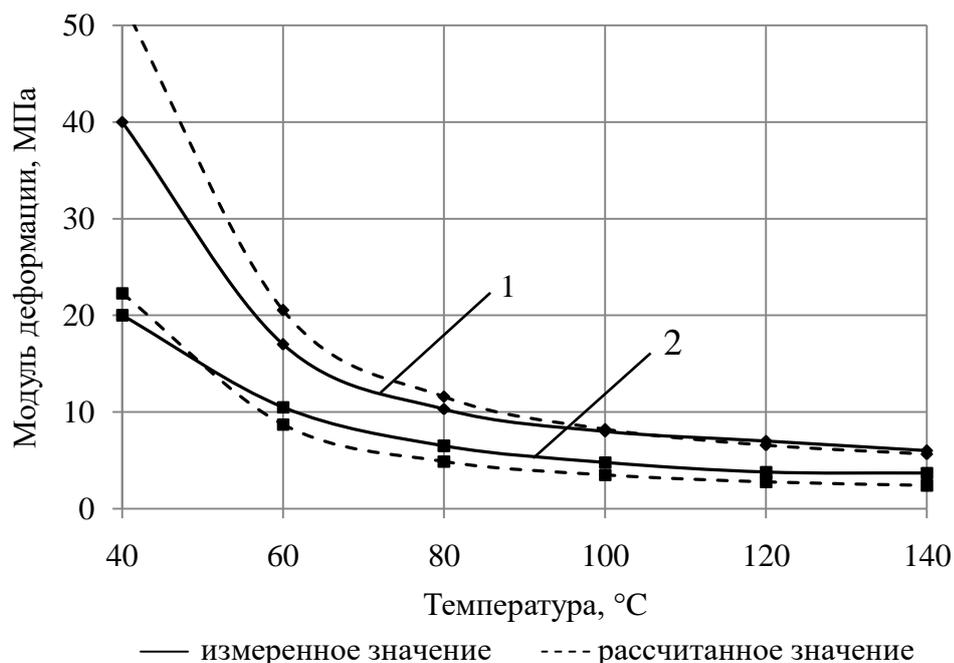


Рисунок 19 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений динамического модуля деформации: 1 –  $K_y = 0,9$ ; 2 –  $K_y = 0,85$ .

Результаты вычислений хорошо коррелируют с экспериментальными данными, при этом особенно точными являются расчеты в интервале температур 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 для расчета динамического модуля деформации смеси на всех стадиях укатки.

Таким образом, в результате уточнения модели Витчака 1-37А разработана методика определения динамического модуля деформации неуплотненной смеси в зависимости от ее состава, температуры и плотности, а также скорости приложения нагрузки. Акт о внедрении данной методики на предприятии представлен в приложении А. Использование динамического модуля деформации материала позволяет учитывать изменение свойств уплотняемого покрытия во время укатки в математической модели нагружения асфальтобетонной смеси рабочими органами дорожных машин, что дает возможность разработать на ее основе методику расчета параметров как многофункционального, так и других типов катков.

## **2.4 Математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов многофункционального катка с асфальтобетонной смесью**

Одной из отличительных особенностей работы рассматриваемого многофункционального катка для уплотнения дорожных покрытий является попеременное задействование в процессе укатки пневмошинного и гладковальцового рабочих органов, причем последнего как в статическом, так и в вибрационном режиме. Вследствие этого в математической модели взаимодействия рабочих органов многофункционального катка со слоем смеси необходимо учитывать все перечисленные виды нагружения материала, что также обусловит ее пригодность для описания процесса уплотнения асфальтобетонных покрытий гладковальцовыми статическими, вибрационными и пневмошинными дорожными машинами.

Рассмотренная ранее система «пригруз – вибровалец» математической модели Пермякова-Серебренникова может быть использована для описания гармонических колебаний вальца многофункционального катка в процессе виброуплотнения. Для исследования остальных режимов работы дорожной машины необходимо составить расчетные схемы взаимодействия соответствующих рабочих органов с асфальтобетонной смесью.

Уплотнение материала в статическом режиме происходит за счет оказываемой на слой весовой нагрузки со стороны дорожного катка. Модель процесса статического нагружения асфальтобетонной смеси может быть представлена в виде, показанном на рисунке 20:

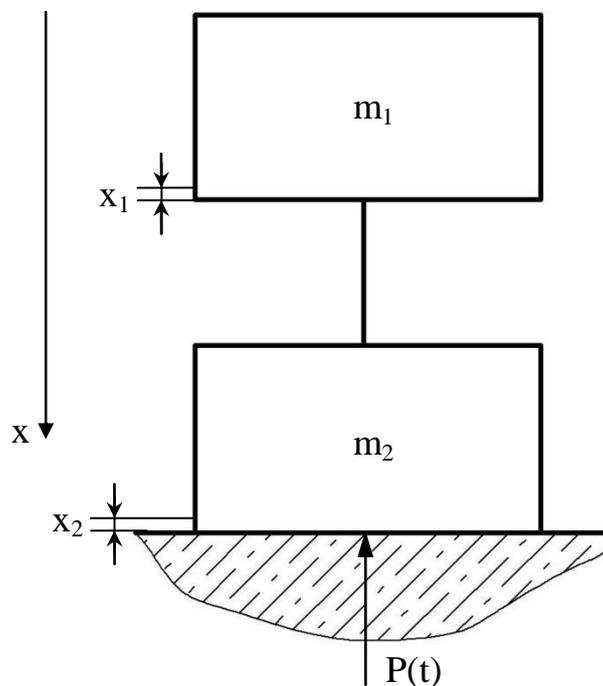


Рисунок 20 – Модель нагружения асфальтобетонной смеси статическим гладковальцовым катком.

Движение элементов данной расчетной модели описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = m_2 \cdot g - P(t) \end{cases}; \quad (40)$$

Выразив из зависимости (40) реакцию, оказываемую уплотняемым материалом, получим уравнение для  $P(t)$ :

$$P(t) = -m_1 \cdot \ddot{x}_1 - m_2 \cdot \ddot{x}_2 + (m_1 + m_2) \cdot g; \quad (41)$$

Примем связь между рабочим органом и рамой катка в статическом режиме уплотнения жесткой, тогда перемещение вальца и пригруза будет равновелико:

$$x = x_1 = x_2 = \varepsilon \cdot h; \quad (42)$$

Тогда напряжения под вальцом статического катка находятся по формуле:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B} - \frac{(m_1 + m_2)}{L_{AB}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}; \quad (43)$$

Особой спецификой обладает процесс взаимодействия пневмоколесных рабочих органов дорожных машин с асфальтобетонной смесью. При составлении математической модели нагружения уплотняемого слоя шинами катка необходимо принимать во внимание их деформацию в процессе укатки, а также работу независимой гидравлической подвески, позволяющей нивелировать неровности дорожного покрытия. Расчетная схема, показанная на рисунке 21а, учитывает названные особенности, но сложность определения коэффициентов  $b_k$  и  $c_k$  модели Кельвина-Фойгта значительно ограничивает ее применение.

В проведенных исследованиях взаимодействия колесных машин с грунтами [2, 3] Бабков В.Ф. отмечает, что в расчетах существует возможность замены пневматической шины жестким диском большего диаметра. Применяв данный подход к уплотнению горячих асфальтобетонных смесей, можно получить соотношение между диаметрами колесного рабочего органа  $D$  и эквивалентного ему гладкого вальца  $D_{экр}$ . Из расчетной схемы замены шины металлическим вальцом, показанной на рисунке 22, следует искомая закономерность:

$$D_{экр} = D \cdot \left( 1 + \frac{\delta}{\Delta e} \right), \quad (44)$$

где  $D_{экр}$  – эквивалентный диаметр жесткого вальца, м;  $D$  – диаметр пневматической шины, м;  $\delta$  – величина обжатия шины, м.

В теории колесобразования используется следующая зависимость между длиной дуги  $L_{AB}$  и величиной обжатия шины  $\delta$ :

$$\delta = \frac{L_{AB}^2}{4D}; \quad (45)$$

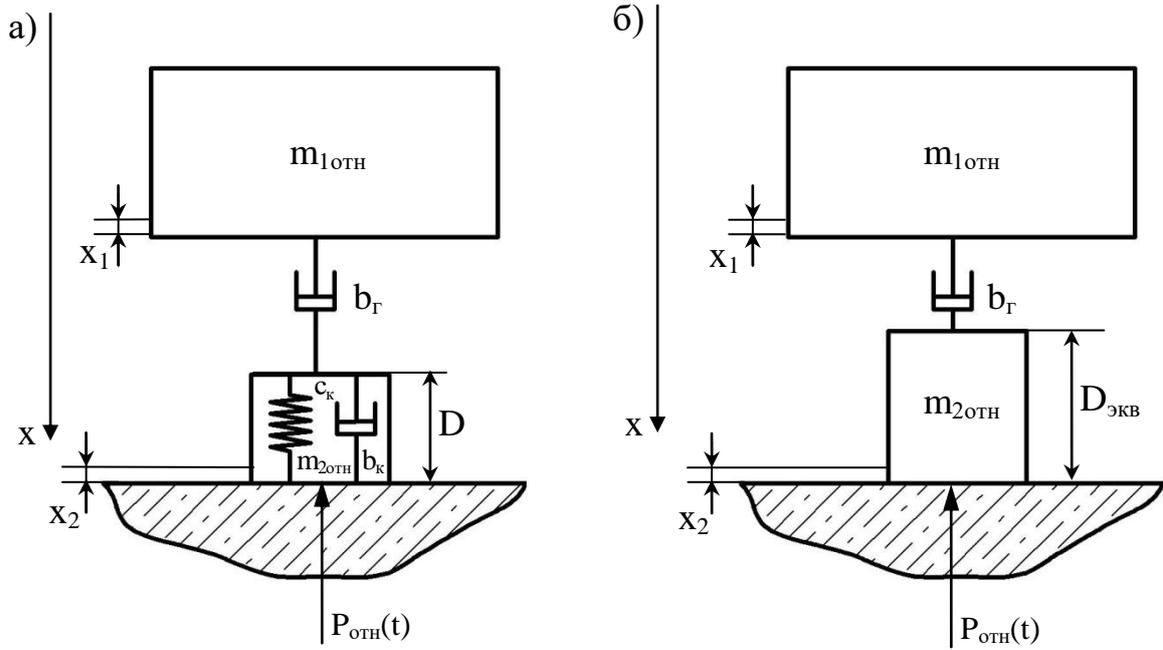


Рисунок 21 – Модель нагружения асфальтобетонной смеси пневмошинным катком: а) с деформирующимся колесом; б) с эквивалентным металлическим вальцом.

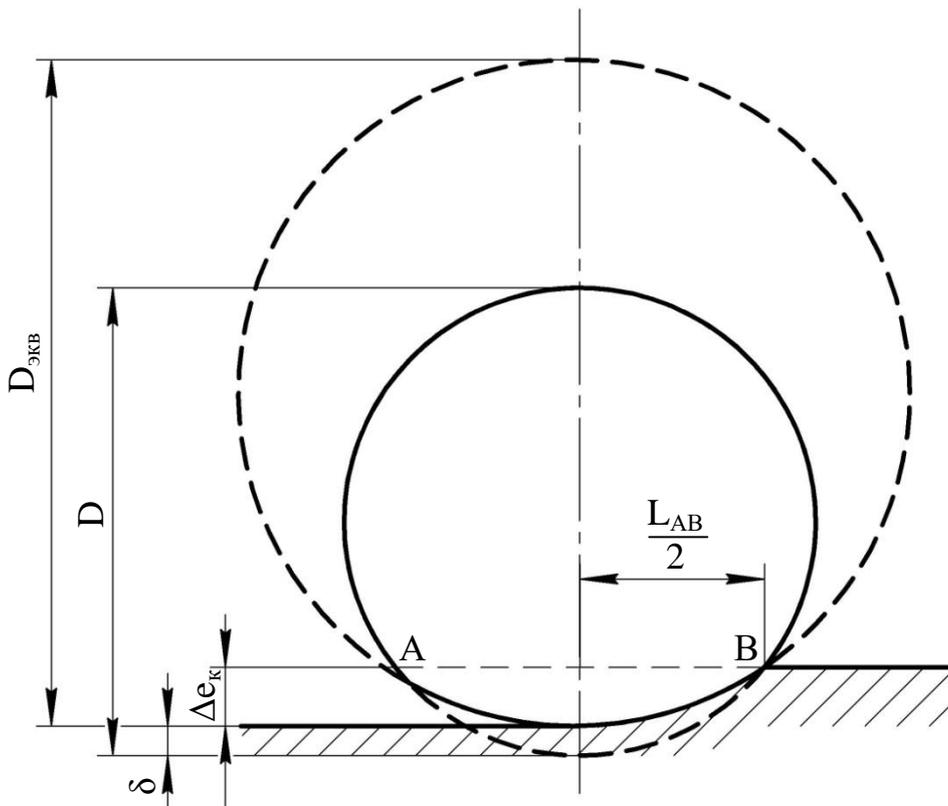


Рисунок 22 – Расчетная схема замены пневмошинного рабочего органа металлическим вальцом.

Согласно принятой расчетной схеме длина дуги контакта пневматической шины определяется исходя из допущения, что для вычислений используется величина деформации после прохода жесткого колеса [2]. Тогда получим окончательное выражение для эквивалентного диаметра гладковальцового катка:

$$D_{\text{эkv}} = D + \frac{L_{AB\kappa}^2}{4\Delta e_{\kappa}}, \quad (46)$$

где  $\Delta e_{\kappa}$  – деформация после прохода жесткого вальца, м;  $L_{AB\kappa}$  – длина дуги контакта жесткого колеса с уплотняемым слоем, м.

Определив с помощью выражения (46) значение диаметра гладкого вальца, можно соответствующим образом преобразовать расчетную схему взаимодействия пневмошинного дорожного катка с асфальтобетонной смесью. Произведя замену колеса металлическим рабочим органом, получим эквивалентную математическую модель уплотнения, показанную на рисунке 22б.

Система дифференциальных уравнений, характеризующая работу данной модели, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} m_{1\text{омн}} \cdot \ddot{x}_1 + b_{\Gamma} \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_{1\text{омн}} \cdot g \\ m_{2\text{омн}} \cdot \ddot{x}_2 - b_{\Gamma} \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_{2\text{омн}} \cdot g - P_{\text{омн}}(t) \end{cases}; \quad (47)$$

где  $m_{1\text{омн}}$  – часть массы пригруза, приходящаяся на рабочий орган, кг;  $m_{2\text{омн}}$  – масса рабочего органа, приходящаяся на жесткое колесо, кг;  $b_{\Gamma}$  – коэффициент сопротивления гидравлической подвески, Па·с;  $P_{\text{омн}}(t)$  – реакция, оказываемая на рабочий орган со стороны уплотняемого материала, Н.

Составив уравнения движения каждого из жестких колес и просуммировав их левые и правые части между собой, получим систему дифференциальных уравнений, описывающую работу дорожной машины в целом. В случае синхронного перемещения колес катка в вертикальной плоскости данная зависимость может быть значительно упрощена:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_{\Gamma} \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 - b_{\Gamma} \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_2 \cdot g - P(t) \end{cases}; \quad (48)$$

где  $m_1$  – общая масса пригруза, кг;  $m_2$  – общая масса рабочего органа катка, кг;  $P(t)$  – общая реакция со стороны дорожной поверхности, Н.

Реакция со стороны асфальтобетонной смеси  $P(t)$ , найденная из системы (48), вычисляется по формуле:

$$P(t) = -m_1 \cdot \ddot{x}_1 - m_2 \cdot \ddot{x}_2 + (m_1 + m_2) \cdot g; \quad (49)$$

Выражение для определения контактных давлений, создаваемых пневмошинным катком, полученное аналогично зависимости (17), имеет вид:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB_{\text{экв}}}(t) \cdot B} - \frac{(m_1 + m_2)}{L_{AB_{\text{экв}}}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}, \quad (50)$$

где  $L_{AB_{\text{экв}}}$  – длина дуги контакта жесткого вальца эквивалентного диаметра со слоем смеси, м;  $B$  – совокупная ширина рабочего органа, м.

Проанализировав закономерности (17), (43) и (50), описывающие процесс взаимодействия различных рабочих органов многофункционального катка с асфальтобетонной смесью, можно сделать вывод о подобии данных выражений. Приняв расчетную схему нагружения дорожного покрытия вибрационным катком в качестве базовой и введя поправочные коэффициенты  $\chi$  и  $\psi$ , учитывающие характер приложения нагрузки и передачи возмущений раме машины, получим обобщенную модель, характеризующую контактные давления под рабочими органами изучаемого средства уплотнения во всех режимах укатки:

$$\sigma_k(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB_{\text{экв}}}(t) \cdot B} + \frac{Q}{L_{AB_{\text{экв}}}(t) \cdot B} \cdot \chi \cdot \sin \omega t - \frac{(\psi \cdot m_1 + m_2)}{L_{AB_{\text{экв}}}(t) \cdot B} \cdot h(t) \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2}; \quad (51)$$

Для исследования вибрационного уплотнения асфальтобетонной смеси многофункциональным катком следует принимать коэффициенты равными  $\chi=1$  и  $\psi=0,02$ , а в статическом режиме работы при использовании гладкого и пневмоколесного рабочего органа –  $\chi=0$  и  $\psi=1$ . При этом для металлического вальца  $L_{AB_{\text{экв}}}$  не отличается от абсолютной величины длины контакта  $L_{AB}$ , а для пневмошинного рабочего органа рассчитывается исходя из эквивалентного диаметра жесткого колеса.

Для моделирования процессов, протекающих в уплотняемом слое, возьмем за основу реологическую модель асфальтобетонной смеси, предложенную Пермяковым В.Б. и Серебренниковым В.С. [115], без учета основания дорожного покрытия. Вследствие наличия в составе двух элементов данной расчетной схемы,

представленной на рисунке 23, тел Ньютона, обобщенное уравнение, описывающее поведение модели под нагрузкой, будет включать в себя показатели вязкости в блоках II и III, что обуславливает необходимость установления данных величин экспериментальным путем.

Для применения данной реологической модели на начальном этапе разработки технологии уплотнения необходимо, используя известную закономерность между модулем деформации и временем релаксации, исключить показатели вязкости из рассматриваемой расчетной схемы.

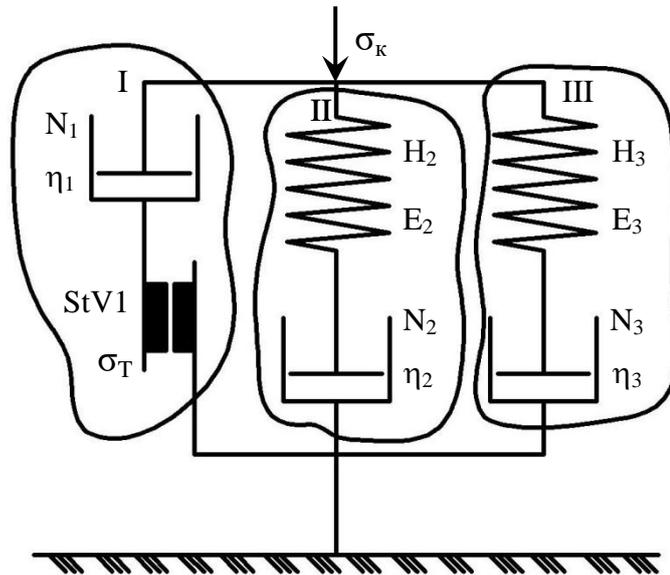


Рисунок 23 – Реологическая модель уплотнения асфальтобетонной смеси без учета основания.

Ввиду того, что блоки II и III отражают быстротечную и продолжительную части спектра релаксаций, протекающие соответственно в скелете и растворной части смеси, значения характеризующих их показателей вязкости и модуля деформации будут существенно различаться между собой. С учетом распределения контактных давлений между блоками в выражении (20) примем следующее соотношение для  $\eta$  и  $E$ :

$$\eta_0 = \frac{\eta_2}{n} = \frac{\eta_3}{m}, \quad (52)$$

$$E_m = E_2 + E_3 = \eta_0 \cdot \left( \frac{n}{\theta_2} + \frac{m}{\theta_3} \right), \quad (53)$$

где  $\eta_0$  – общая вязкость смеси, П;  $E_m$  – модуль деформации модели, Па.

Применив метод передаточных функций для описания динамических подсистем модели и задав деформацию в качестве входной величины, получим закономерности, отражающие поведение каждого из блоков под нагрузкой:

$$W(p)_1 = \frac{\sigma_T}{\varepsilon_1}; \quad (54)$$

$$W(p)_2 = \frac{p \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot \left(\frac{p}{E_2} + \frac{1}{\eta_2}\right)} = \frac{n \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_2 + 1)}; \quad (55)$$

$$W(p)_3 = \frac{p \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_3 \cdot \left(\frac{p}{E_3} + \frac{1}{\eta_3}\right)} = \frac{m \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_3 + 1)}; \quad (56)$$

Общую передаточную функцию реологической модели можно определить следующим образом:

$$\sum W(p) = \frac{\sigma_k}{\varepsilon} = \frac{\sigma_T}{\varepsilon} + \frac{n \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_2 + 1)} + \frac{m \cdot p \cdot \eta_0}{(p \cdot \theta_3 + 1)}; \quad (57)$$

Зависимость между напряжением и деформацией принимает вид:

$$\eta_0(n\theta_3 + m\theta_2)p^2\varepsilon + \eta_0(n+m)p\varepsilon = (\sigma_k - \sigma_T) + \theta_2\theta_3p^2\sigma_{2-3} + \theta_2p\sigma_2 + \theta_3p\sigma_3; \quad (58)$$

Преобразуя дифференциальный оператор, получим:

$$\eta_0(n\theta_3 + m\theta_2)\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \eta_0(n+m)\frac{d\varepsilon}{dt} = (\sigma_k - \sigma_T) + \theta_2\theta_3\frac{d^2\sigma_{2-3}}{dt^2} + \theta_2\frac{d\sigma_2}{dt} + \theta_3\frac{d\sigma_3}{dt}; \quad (59)$$

Выразив  $\eta_0$  из зависимости (53) и подставив в (59), получим следующее:

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

$$+ (\sigma_k - \sigma_T) + (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} \quad ; \quad (60)$$

Вследствие значительно меньшей жесткости слоя асфальтобетонной смеси по сравнению со щебеночным основанием, деформацией последнего в процессе укатки можно пренебречь. Однако при устройстве дорожных покрытий, ввиду повышенной жесткости основания, усилие со стороны рабочих органов уплотняющих машин передается на двухкомпонентную систему «слой смеси – основание». Наиболее ярко выражен данный процесс при укатке тонких слоев

асфальтобетонных смесей, когда жесткость системы принимает промежуточное значение между величинами, соответствующими слою и основанию.

Для учета влияния толщины материала на деформативные свойства уплотняемого покрытия Хархутой Н.Я. [123] была предложена зависимость изменения модуля деформации системы от относительной толщины уплотняемого слоя, показанная на рисунке 24:

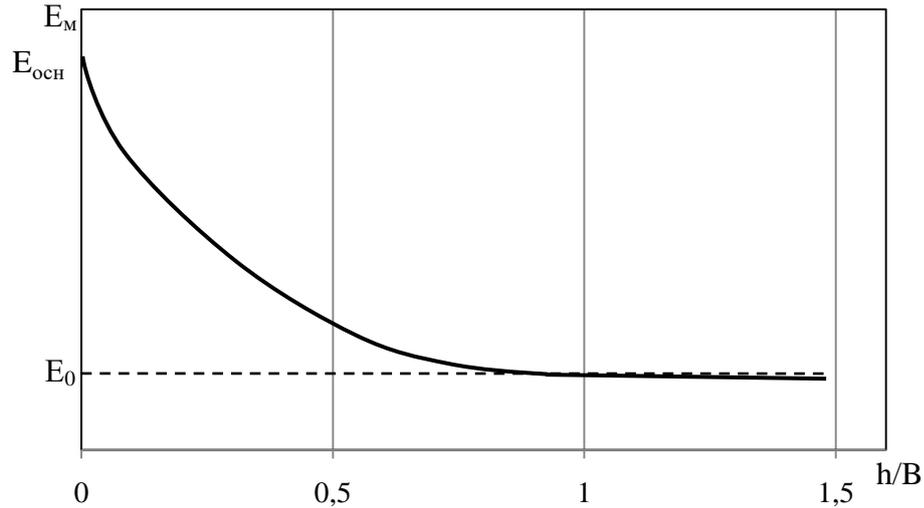


Рисунок 24 – Зависимость модуля деформации от толщины уплотняемого слоя.

Предложенная закономерность может быть описана с помощью формулы:

$$E_M = E_0 + E_{осн}^{(1-h/B)}, \quad (61)$$

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

Используя в закономерности (60) выражение (61) для общего модуля деформации системы, получим зависимость, характеризующую работу всех элементов реологической модели:

$$\begin{aligned} & (n+m)[E_0(t) + E_{осн}^{(1-h(t)/B)}] \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{(n+m)^2 [E_0(t) + E_{осн}^{(1-h(t)/B)}] \cdot \theta_2 \cdot \theta_3}{n\theta_3 + m\theta_2} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \\ & = \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m \cdot \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + (\sigma_k - \sigma_T) + (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} \end{aligned} \quad (62)$$

Таким образом, использование динамического модуля деформации в модели взаимодействия вибрационного катка с уплотняемым материалом позволяет с учетом коэффициентов, отражающих характер приложения нагрузки

и передачи возмущений раме машины, разработать уточненную математическую модель нагружения асфальтобетонной смеси рабочими органами многофункционального катка и традиционных средств укатки. Общий вид уточненной модели представлен на рисунке 25:

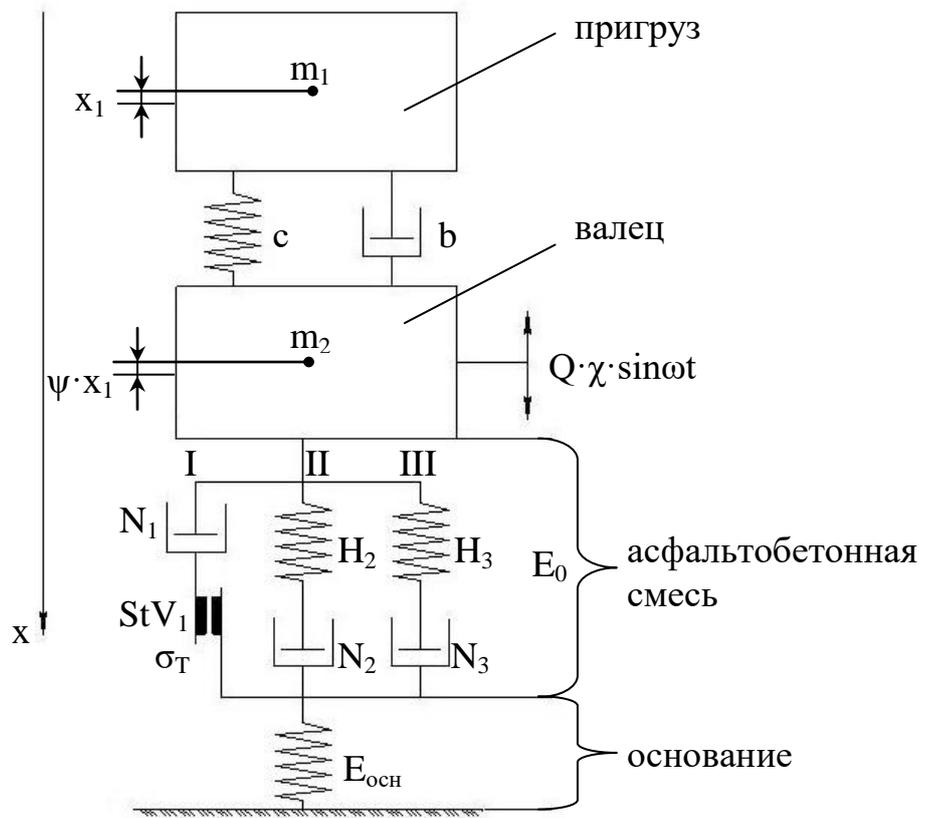


Рисунок 25 – Уточненная модель взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью.

Совместное решение выражений (51) и (62), а также преобразование их к виду, аналогичному работе [48], позволило составить систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс взаимодействия рабочих органов дорожных катков с асфальтобетонной смесью:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = a_0(t) + b_0(t) \cdot \chi \cdot \sin \omega t - c_0(t) \cdot \sigma_k(t), \\ \frac{d^2 \sigma}{dt^2} = c_1 [E_0(t) + E_{очн}^{(1-h(t)/B)}] \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{c_1 \cdot [E_0(t) + E_{очн}^{(1-h(t)/B)}] \cdot (n+m)}{(n\theta_3 + m\theta_2)} \frac{d\varepsilon}{dt} - \\ - c_2 \cdot (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} - c_2(\sigma_k - \sigma_T) \end{cases} \quad (63)$$

где

$$a_0(t) = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (64)$$

$$b_0(t) = \frac{Q}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (65)$$

$$c_0(t) = \frac{L_{AB_{экв}}(t) \cdot B}{(\psi \cdot m_1 + m_2) \cdot h(t)}; \quad (66)$$

$$c_1 = \frac{n + m}{n \cdot m}; \quad (67)$$

$$c_2 = \frac{1}{\theta_2 \cdot \theta_3 \cdot n \cdot m}; \quad (68)$$

При разработке уточненной модели процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с уплотняемым материалом были приняты следующие допущения: 1) равномерная скорость движения дорожной машины при проведении укатки; 2) отсутствие отрыва вальца от покрытия на заключительном этапе процесса уплотнения; 3) равномерное остывание слоя смеси со скоростью 1 °С/мин; 4) постоянное время релаксации в блоках на всех стадиях укатки.

Следует отметить, что развитие пластических деформаций в материале будет наблюдаться только при превышении контактными давлениями его предела текучести, при этом для обеспечения качества укатки напряжения в слое не должны превосходить критические значения для смеси. Укатка слоя эффективна, в случае если для контактных давлений выполняется условие:

$$\begin{cases} \sigma_T < \sigma_k < \sigma_{кр} \\ \sigma_{кр} = (0,65 - 0,75) \cdot \sigma_p \end{cases}; \quad (69)$$

Таким образом, разработанная уточненная математическая модель характеризует динамику рабочих органов дорожных катков при взаимодействии с асфальтобетонной смесью, а также отражает реологические процессы, протекающие в ней во время укатки. Однако вследствие непрерывного изменения прочностных свойств уплотняемого материала, для определения на основе данной модели рациональных параметров многофункционального катка необходимо установить зависимость предела прочности асфальтобетонной смеси от плотности и температуры.

## Выводы по второй главе

На основании проведенного теоретического исследования процесса взаимодействия многофункционального катка с асфальтобетонной смесью можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена конструкция многофункционального катка, увеличивающего эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей за счет применения механизма изменения контактных давлений, позволяющего использовать машину во всем температурном диапазоне и исключить тем самым применяемый в настоящее время звенный принцип укатки.

2. Существующие расчетные модели взаимодействия вальцов дорожных катков с асфальтобетонной смесью не учитывают закономерности изменения физико-механических свойств материала в процессе укатки и не дают возможности производить расчет параметров многофункционального средства уплотнения исходя из характеристик рабочей среды.

3. Разработана уточненная методика определения динамического модуля деформации асфальтобетонной смеси в зависимости от ее состава, температуры и плотности, а также скорости приложения нагрузки. Использование данной деформативной характеристики материала в расчетной модели взаимодействия вальцов катков с асфальтобетонной смесью позволяет наилучшим образом отразить поведение слоя под нагрузкой, создаваемой рабочими органами дорожных машин во время укатки.

4. Разработана уточненная математическая модель, характеризующая процесс взаимодействия рабочих органов катков с дорожным покрытием. Данная математическая модель позволяет определять рациональные параметры средства уплотнения и режима его работы при укатке соответствующей асфальтобетонной смеси, для чего требуется установление закономерности изменения ее предела прочности от плотности и температуры.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

### 3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Подбор параметров дорожных катков для уплотнения асфальтобетонных покрытий требует изучения поведения рабочей среды под действием внешних нагрузок, оказываемых вальцами машин. Рациональные режимы укатки достигаются при развитии в слое напряжений близких к пределу прочности, постоянно увеличивающемуся в процессе уплотнения вследствие повышения плотности и снижения температуры смеси. Поэтому нахождение прочностных характеристик материала под влиянием данных факторов является одним из ключевых аспектов при расчете параметров катков и режимов их работы.

Улучшенные эксплуатационные качества щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС) обуславливают значительный рост их применения в российском дорожном строительстве в последние годы. Анализ научных изысканий [24, 60, 132, 191, 196], посвященных определению свойств ЩМАС, указывает на недостаточную изученность их характеристик при повышенных температурах. Установление закономерностей изменения показателей прочности данных материалов в температурном диапазоне, соответствующем процессу уплотнения, служит целью настоящего экспериментального исследования.

Для достижения поставленной цели перед проводимым исследованием были поставлены следующие задачи:

- разработать уточненную методику определения прочностных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения;
- произвести сбор экспериментальных данных процесса деформирования асфальтобетонных смесей;
- изучить зависимость предела прочности от температуры и коэффициента уплотнения смеси;

– определить совокупное влияние температуры, коэффициента уплотнения смеси и скорости приложения нагрузки на предел прочности материала.

Изучение свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей проводилось на примере ЩМА15 на полимерно-битумном вяжущем ПБВ60 и ЩМА20 на битуме БНД60/90 со стабилизирующей добавкой СД-3 ГБЦ в составе 0,4% от минеральной части. В ходе настоящего исследования также выполнялось нагружение образцов горячей мелкозернистой смеси типа Б марки 1 на битуме БНД60/90 с целью установления референсных значений для первых двух материалов.

Составы асфальтобетонных смесей подбирались в соответствии с ГОСТ 31015-2002 для ЩМАС и ГОСТ 9128-2013 для Б1. Для приготовления ЩМАС использовался щебень габбро-диабаз карьера «Чевжавара» по ГОСТ 8267-93, песок из отсевов дробления габбро-диабазы карьера «Щелейки» по ГОСТ 31424-2010, а также минеральный порошок МП-1 Каменищенского карьера по ГОСТ Р 52129-2003. Отличием смеси Б1 было использование гранитного щебня карьера «Голодай гора» по ГОСТ 8267-93, песка из отсевов дробления осадочных горных пород Каменищенского карьера по ГОСТ 31424-2010, а также природного песка реки Волга по ГОСТ 8736-93.

Свойства полимерно-битумного вяжущего ПБВ60 ульяновского завода «ТехноНИКОЛЬ» выполняли требования ГОСТ Р 52056-2003, в то время как физико-механические показатели нефтяного дорожного битума БНД60/90 производства «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» удовлетворяли ГОСТ 22245-90, а стабилизирующая добавка СД-3 ГБЦ находилась в соответствии с СТО 77142802-003-2011. Рецепты исследованных асфальтобетонных смесей приведены в таблице 1, а график их зерновых составов показан на рисунке 26.

Формование образцов асфальтобетонных смесей выполнялось в металлических стаканах на гидравлическом прессе МС-500. Диаметр и высота полученных цилиндров соответствовала ГОСТ 12801-98 и составляла 71,4 мм. Контроль размеров осуществлялся штангенциркулем Зубр 34463-150.

Таблица 1 – Рецепт асфальтобетонной смеси

Наименование материалов	Содержание в смеси, %	Зерновой состав, полные проходы в % через сито, мм										
		40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
<b>1. ЩМА15</b>												
Щебень фр. 5-15	42	42,0	42,0	40,1	20,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Щебень фр. 10-15	33	33,0	33,0	30,3	3,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Песок из отс. др. фр. 0-5	12	12,0	12,0	12,0	12,0	10,8	8,4	6,1	4,1	2,8	2,1	1,4
Минеральный порошок	13	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	12,2	11,8	11,2	10,0
Зерновой состав смеси фактический	100	100	100	95,4	48,2	26,3	21,4	18,9	16,3	14,6	13,3	11,4
Требования ГОСТ 31015-2002				90	40	25	18	15	12	10	9	9
				100	60	35	28	25	22	20	16	14
<b>2. ЩМА20</b>												
Щебень фр. 5-15	22	22,0	22,0	20,8	9,2	0,7	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Щебень фр. 10-15	12	12,0	12,0	11,0	1,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Щебень фр. 15-20	42	42,0	38,8	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Песок из отс. др. фр. 0-5	11	11,0	11,0	11,0	11,0	10,5	7,9	6,5	5,0	3,6	2,1	1,2
Минеральный порошок	13	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	12,6	11,9	10,2
Зерновой состав смеси фактический	100	100	96,8	59,4	34,4	24,4	21,1	19,5	17,8	16,2	13,9	11,5
Требования ГОСТ 31015-2002			90	50	25	20	15	13	11	9	8	8
			100	70	42	30	25	24	21	19	15	13
<b>3. Б1</b>												
Щебень фр. 5-20	40	40,0	37,2	29,0	14,2	2,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Песок из отс. др. ос. г/п	20	20,0	20,0	20,0	19,9	15,4	11,6	7,7	5,1	3,9	3,0	2,2
Песок из отс. др. фр. 0-5	24	24,0	24,0	24,0	24,0	21,8	15,6	10,5	6,8	5,1	3,9	3,1
Песок природный	10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,9	9,6	8,3	4,7	0,4	0,1
Минеральный порошок	6	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	5,7	5,6	5,3	4,6
Зерновой состав смеси фактический	100	100	97,2	89,0	74,1	55,4	43,6	33,7	25,9	19,4	12,7	10,0
Требования ГОСТ 9128-2013 (тип Б непрер.з.с.)			90	80	70	50	38	28	20	14	10	6
			100	100	100	60	48	37	28	22	16	12

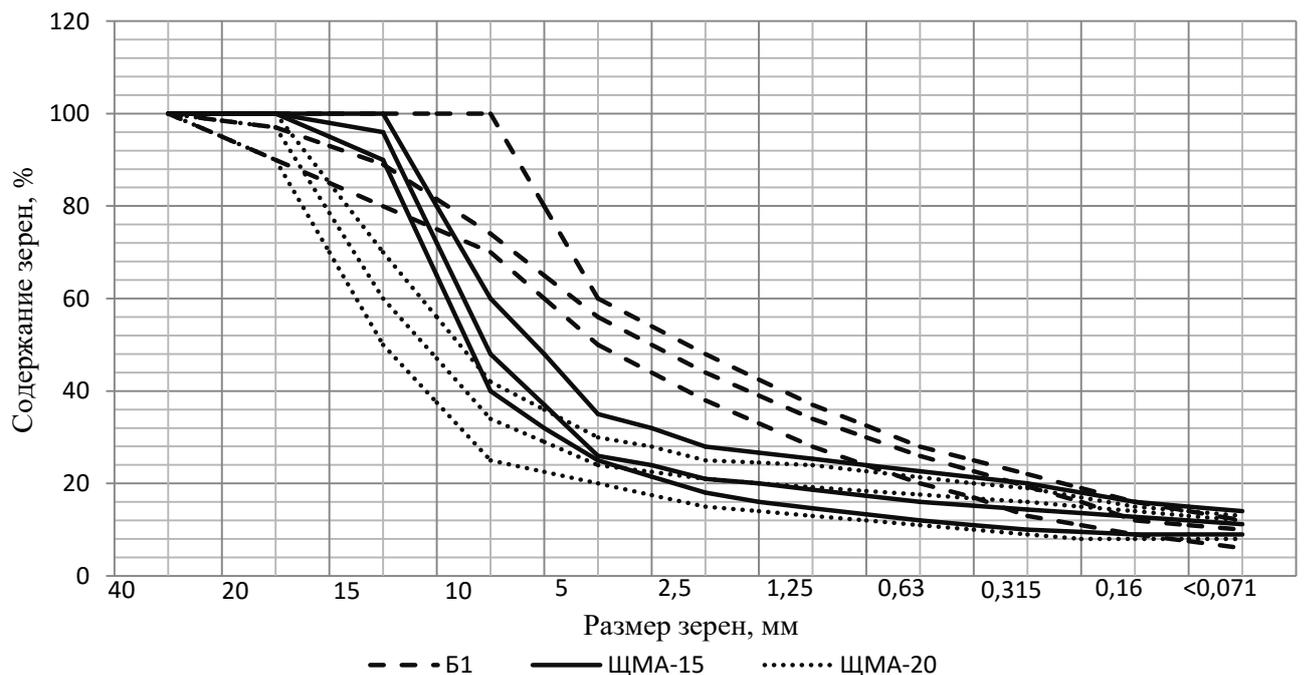


Рисунок 26 – График зернового состава асфальтобетонных смесей.

Средняя плотность сформованной смеси устанавливалась путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 12801-98 и рассчитывалась по следующей зависимости:

$$\rho = \frac{g \cdot \rho_B}{g_2 - g_1}, \quad (70)$$

где  $\rho$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – масса образца, взвешенного на воздухе, кг;  $\rho_B$  – плотность воды, равная 1000 кг/м<sup>3</sup>;  $g_1$  – масса образца, взвешенного в воде, кг;  $g_2$  – масса образца, выдержанного в течение 30 минут в воде и вторично взвешенного на воздухе, кг.

Нагрузка, необходимая для получения образцов заданной плотности, представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Давление формования цилиндрических образцов

Коэффициент уплотнения	Требуемая нагрузка, МПа		
	ЩМА15	ЩМА20	Б1
0,95	5,1	5,3	6,2
0,97	9,8	10	12,5
0,99	25	25,4	26,3
1,0	40	40	40

В рамках настоящего исследования требуется провести полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа  $2^k$ , результатом которого будет получение функции  $\sigma_p = f(T, K_y, V_{def})$ . Вследствие того, что характер данной зависимости неизвестен, примем линейную закономерность изменения предела прочности, описываемую полиномом первого порядка в общем виде:

$$Y = \sum_{i=1}^k b_i X_i, \quad (71)$$

где  $Y$  – функция отклика;  $X_i, X_j \dots X_k$  – факторы исследуемого процесса;  $k$  – количество факторов;  $b_i$  – коэффициент регрессии, показывающий влияние соответствующего фактора.

Для более детального изучения зависимости предела прочности материала от ключевых параметров асфальтобетонной смеси на начальном этапе

исследования был проведен ряд однофакторных экспериментов с варьированием температуры в диапазоне от 70 °С до 130 °С и коэффициента уплотнения в интервале 0,95–1,0. Испытания проводились по методике ГОСТ 12801-98 при скорости деформирования 3 мм/мин, а для ряда точек трехфакторного эксперимента также при 50 мм/мин.

Деформирование образцов выполнялось на машине ДТС-06-50/100, позволяющей в автоматическом режиме строить диаграмму «нагрузка – деформация», на основании которой определялся предел прочности асфальтобетонной смеси. Более подробно устройство экспериментальной установки описано в следующем разделе данной главы.

Уменьшение влияния случайных погрешностей на точность результатов обеспечивалось проведением для каждого измеряемого показателя серии однотипных испытаний. Требуемое количество повторных экспериментов определялось на основании допущения о нормальном законе распределения случайных величин по следующей зависимости [81]:

$$n \geq \frac{Z^2 V^2}{\varepsilon^2}, \quad (72)$$

где  $n$  – число повторных экспериментов;  $Z$  – квантиль нормального распределения;  $V$  – коэффициент вариации;  $\varepsilon$  – допустимая погрешность.

Для установления степени изменчивости измеряемых величин был проведен ряд предварительных экспериментов, по результатам которых коэффициент вариации составил 0,052. Тогда при допустимой погрешности  $\varepsilon=0,05$  и соответствующем ей квантиле нормального распределения  $Z=1,64$  требуемое число повторных наблюдений будет:

$$n = \frac{1,64^2 \cdot 0,052^2}{0,05^2} = 2,91;$$

Следовательно, минимальное количество испытаний для обеспечения точности результатов эксперимента в 95% равно 3. В настоящем исследовании данное число повторных наблюдений легло в основу для определения среднего арифметического значения искомых показателей, вычисляемого по формуле:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (73)$$

где  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение величины;  $i$  – номер опыта;  $y_i$  – значение показателя в опыте  $i$ .

Статистическая проверка ошибок измерений осуществлялась на основе критерия Стьюдента ( $t$ -критерия) [25]:

$$\frac{\hat{y} - \bar{y}}{\sigma_{кв}} \geq t_{\alpha(f)}^T, \quad (74)$$

где  $\hat{y}$  – значение, поставленное под сомнение;  $t_{\alpha(f)}^T$  – табличная величина критерия Стьюдента;  $\sigma_{кв}$  – среднеквадратическое отклонение, рассчитываемое следующим образом:

$$\sigma_{кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (75)$$

При проведении экспериментального исследования рациональный уровень напряжений определялся исходя из предела прочности материала, вследствие чего задача поиска оптимума не ставилась, а требовалось только установить уравнение регрессии в диапазоне, соответствующем процессу уплотнения.

В качестве функции отклика  $Y$  был выбран предел прочности асфальтобетонной смеси, а факторами исследуемого процесса  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  – температура, плотность смеси и скорость нагружения соответственно. Каждый из перечисленных факторов поочередно принимал свое максимальное и минимальное значение, характеризующее верхний (+) и нижний (-) уровни варьирования, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Интервалы варьирования факторов

Факторы	Единицы измерения	Уровни	
		Min. (-1)	Max. (+)
Температура ( $X_1$ )	°С	70	100
Плотность ( $X_2$ )	кг/м <sup>3</sup>	0,95	1,0
Скорость нагружения ( $X_3$ )	мм/мин	3	50

Одним из ключевых инструментов для оптимизации проведения опытных исследований является составление матрицы планирования эксперимента, которая для проводимого ПФЭ представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Матрица планирования трехфакторного эксперимента

Номер опыта	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y
1	-	-	-	Y <sub>1</sub>
2	-	-	+	Y <sub>2</sub>
3	-	+	-	Y <sub>3</sub>
4	-	+	+	Y <sub>4</sub>
5	+	-	-	Y <sub>5</sub>
6	+	-	+	Y <sub>6</sub>
7	+	+	-	Y <sub>7</sub>
8	+	+	+	Y <sub>8</sub>

Таким образом, произведено планирование полного трехфакторного эксперимента, требующего проведения 8 серий опытов при всех возможных сочетаниях уровней факторов и позволяющего установить их совокупное влияние на функцию отклика.

### 3.2 Описание экспериментального оборудования

Для проведения исследования, направленного на изучение прочностных характеристик асфальтобетонных смесей, применялась экспериментальная машина, моделирующая уплотняющее воздействие со стороны вальцов катков на дорожное покрытие. Принцип работы установки заключается в принудительном продольном сжатии цилиндрических образцов с одновременным отслеживанием их деформации и прикладываемой нагрузки.

Общий вид машины ДТС-06-50/100 производства ООО «Тестсистемы», использовавшейся в ходе проводимых экспериментальных исследований, представлен на рисунке 27.



Рисунок 27 – Общий вид машины для испытаний асфальтобетонных образцов.

Схематическое изображение машины ДТС-06-50/100 показано на рисунке 28. Испытательная установка включает в себя основание 1, на котором установлена пара колонн 2, свободно перемещающихся в вертикальной плоскости. Нижняя траверса 3 и верхняя траверса 4, связанные между собой колоннами, приводятся в движение ходовым винтом 5, соединенным с мотором-редуктором 6. Нагружение опытного образца, установленного на стол 7, производится верхней опорной плитой 8, при этом величина действующей нагрузки определяется датчиком силы 9, а деформация фиксируется датчиком перемещения 10. Выбор режимов деформирования осуществляется на пульте оператора 11, на который впоследствии выводится информация, полученная в ходе испытаний.

Наибольшее усилие при испытаниях на машине составляет 100 кН, а погрешность определения нагрузки не превышает  $\pm 1\%$  от измеренной величины (ИВ). Ввиду конструктивных особенностей установки после достижения предела прочности материала наблюдается длительный плавный спад действующей нагрузки, поэтому в качестве момента окончания испытания было принято фиксированное время деформирования образца.

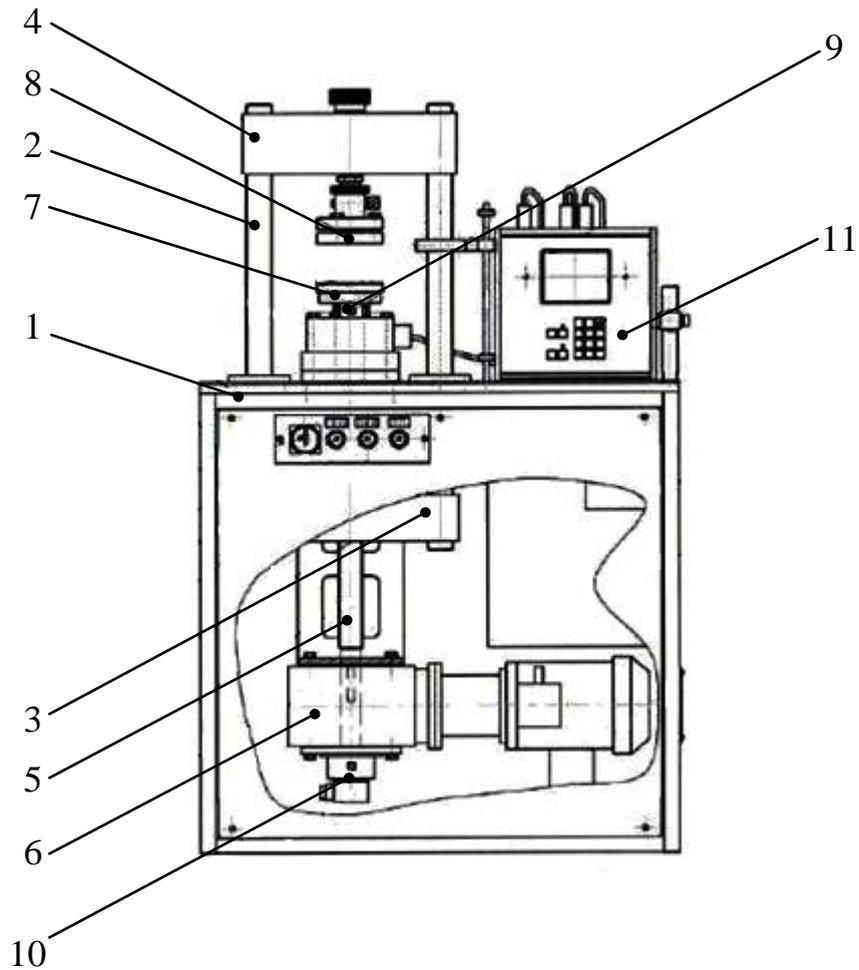


Рисунок 28 – Схема экспериментальной установки.

Скорость нагружения образца варьируется в диапазоне от  $3 \pm 0,3$  мм/мин до  $50 \pm 1$  мм/мин, а точность измерения перемещения верхней опорной плиты и, как следствие, деформации составляет 0,1 мм. Дополнительные характеристики испытательной машины приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики испытательной машины

Параметр	Значение
Габаритные размеры, мм×мм×мм	800×500×2000
Масса, кг	250
Максимальный рабочий ход, мм	200
Скорость при обратном ходе, мм/мин	80
Ширина рабочей зоны, мм	250
Потребляемая мощность, кВт	0,75

Для достижения требуемой для испытания температуры цилиндрические образцы в течение часа выдерживались в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ. Вследствие наличия в шкафу внутренних температурных колебаний в диапазоне  $\pm 3,5$  °С производился дополнительный контроль степени нагрева смеси с помощью пирометра Raytek Raynger МТ6, имеющего погрешность  $\pm 1,5\%$  от измеренной величины. Общий перечень оборудования, применяемого в рамках проводимого экспериментального исследования, представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень используемого оборудования

Наименование	Нормативный документ	Погрешность измерения	Область применения
Машина для испытания ДТС-06-50/100	ТУ 4271-002-18209700-06	нагрузка: $\pm 1\%$ ИВ деформация: 0,1 мм	Испытание на сжатие
Гидравлический пресс МС-500	ГОСТ 28840-90	$\pm 1\%$ ИВ	Формование опытных образцов
Шкаф сушильный ШС-80-01 СПУ	ТУ 9452-010-00141798-2005	$\pm 0,5$ °С	Нагрев образцов
Пирометр Raytek Raynger МТ6	ГОСТ 28243-96	$\pm 1,5\%$ ИВ	Измерение температуры
Весы электронные ПВМ-3/15	ГОСТ Р 53228-2008	$\pm 1$ г	Определение зернового состава
Штангенциркуль Зубр 34463-150	ГОСТ 166-89	0,01 мм	Измерение размеров образцов

Таким образом, используемое оборудование позволяет в полной мере провести исследование прочностных характеристик асфальтобетонных смесей согласно разработанной матрице планирования эксперимента.

### 3.3 Результаты экспериментальных исследований

#### 3.3.1 Влияние температуры на предел прочности асфальтобетонной смеси

В условиях быстрого охлаждения асфальтобетонной смеси, накладывающего значительные ограничения на время укатки дорожного

покрытия, требуется интенсификация процесса уплотнения и использование катков с максимально допустимыми контактными давлениями. Установление влияния температуры смеси на прочностные показатели уплотняемого слоя является одним из важнейших этапов в определении момента смены контактных давлений, оказываемых рабочими органами многофункционального катка на асфальтобетонное покрытие.

В ходе проведенной серии испытаний по одноосному сжатию опытных образцов в температурном диапазоне от 70 °С до 130 °С были получены зависимости действующих напряжений от относительной деформации цилиндров, представленные на рисунке 29. Деформирование изучаемых асфальтобетонных смесей, имеющих единичный коэффициент уплотнения, производилось с постоянной скоростью 3 мм/мин.

Точка перегиба кривой «напряжение – деформация» соответствует пределу прочности асфальтобетонной смеси при заданных условиях испытания. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при температурах, не превышающих 115 °С, наилучшими прочностными показателями обладает мелкозернистая смесь Б1. В то же время при более высоких температурах наибольший предел прочности имеет ЩМА20, что обуславливается наличием в его составе стабилизирующей добавки СД-3 ГБЦ, предотвращающей стекание битума при максимальном нагреве смеси. Следует отметить высокие результаты, показанные образцами ЩМА15 на ПБВ60, что достаточно нетипично для смесей на полимерно-битумном вяжущем, увеличивающем предел прочности на растяжение, а не на сжатие.

Прочностные показатели всех рассмотренных материалов снижаются с повышением температуры, при этом для ЩМА15 и Б1 падение составляет 82,1% и 90% соответственно, что указывает на значительное влияние на них данного фактора. Наименьшую температурную чувствительность демонстрирует асфальтобетонная смесь ЩМА20 со стабилизирующей добавкой, позволяющей уменьшить изменение предела прочности до 50%.

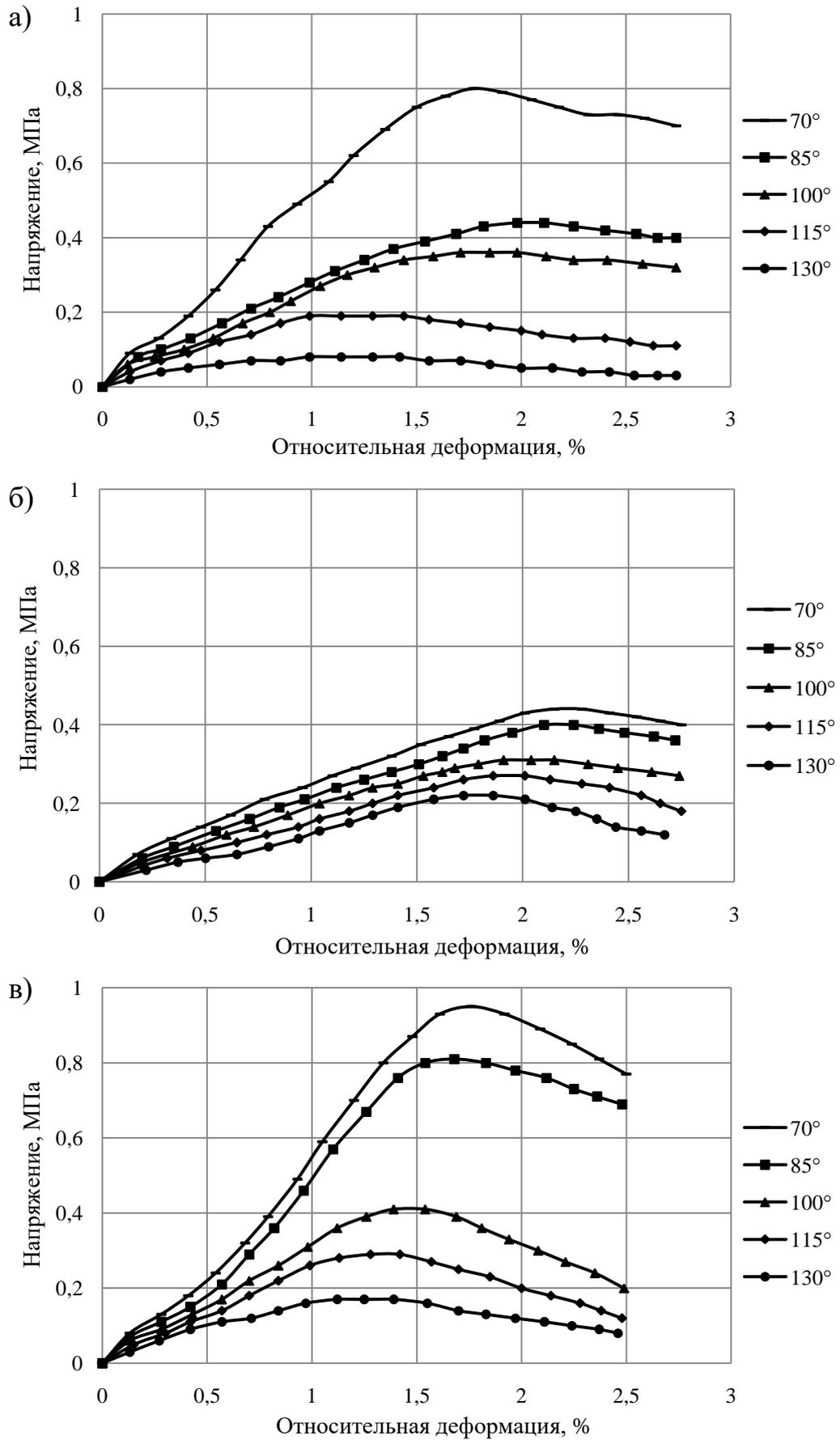


Рисунок 29 – Зависимость напряжения от относительной деформации при различных температурах смеси: а – ЩМА15; б – ЩМА20; в – Б1.

Общий характер изменения предела прочности при сжатии асфальтобетонных смесей под действием температуры можно проследить на рисунке 30.

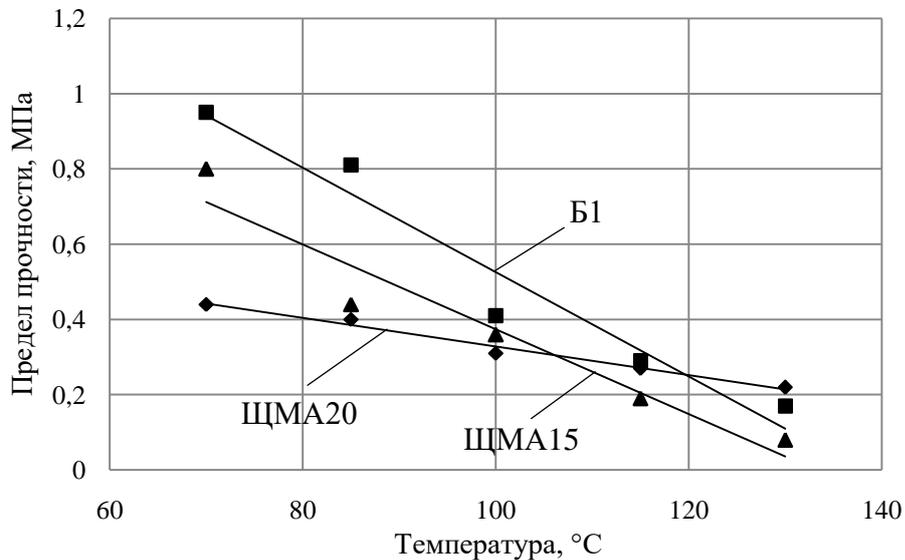


Рисунок 30 – Зависимость предела прочности при сжатии от температуры.

В области высоких температур, при которых происходит укатка смесей, показанные закономерности могут быть наилучшим образом описаны с помощью логарифмического закона распределения [60]. Тем не менее, линейные зависимости, представленные в таблице 7, также характеризуются высокими значениями коэффициентов достоверности аппроксимации  $R^2$ , что свидетельствует о статистической правомерности их применения

Таблица 7 – Зависимость предела прочности при сжатии от температуры

Материал	Математическая зависимость	$R^2$
Б1	$y = -0,0139x + 1,9127$	0,9481
ЦМА15	$y = -0,0113x + 1,5007$	0,9324
ЦМА20	$y = -0,0038x + 0,708$	0,9822

Таким образом, полученные результаты аппроксимации зависимости предела прочности от температуры подтверждают целесообразность использования полинома первого порядка для составления уравнения регрессии полного факторного эксперимента.

### **3.3.2 Влияние коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси на предел прочности**

Увеличение плотности асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения оказывает, наряду с понижением температуры, значительное влияние на рост прочностных характеристик материала. Установление закономерности между пределом прочности и коэффициентом уплотнения смеси позволит повысить точность определения требуемых контактных давлений под вальцом катка на различных стадиях укатки.

В рамках данного однофакторного эксперимента осуществлялось деформирование цилиндрических образцов при изменении коэффициента уплотнения от 0,95 до 1,0. Нагружение выполнялось со скоростью 3 мм/мин при температурах смесей 85 °С и 100 °С, характерных для основного и заключительного этапа укатки дорожного полотна. Результаты проведенных испытаний показаны на рисунках 31 и 32 соответственно.

Согласно представленным зависимостям напряжения от относительной деформации материала, уменьшение коэффициента уплотнения влияет на предел прочности схожим образом для всех асфальтобетонных смесей, приводя к его равномерному снижению вследствие сокращения количества межзерновых контактов.

При этом при температуре 100 °С данный процесс является более выраженным, что объясняется уменьшением вязкости битумных пленок. Использование вяжущего с полимерными и стабилизирующими добавками не оказывает значимого воздействия на характер изменения прочностного показателя, так как ключевое значение имеет зерновой состав минерального скелета, воспринимающего основную нагрузку.

Уменьшение коэффициента уплотнения с 1 до 0,95 при температуре 85 °С вызывает падение прочностных характеристик в 3-4 раза одинаково для всех составов смесей, тогда как при 100 °С происходит снижение в 4,55, 6,2 и 9 раз для Б1, ЩМА20 и ЩМА15 соответственно.

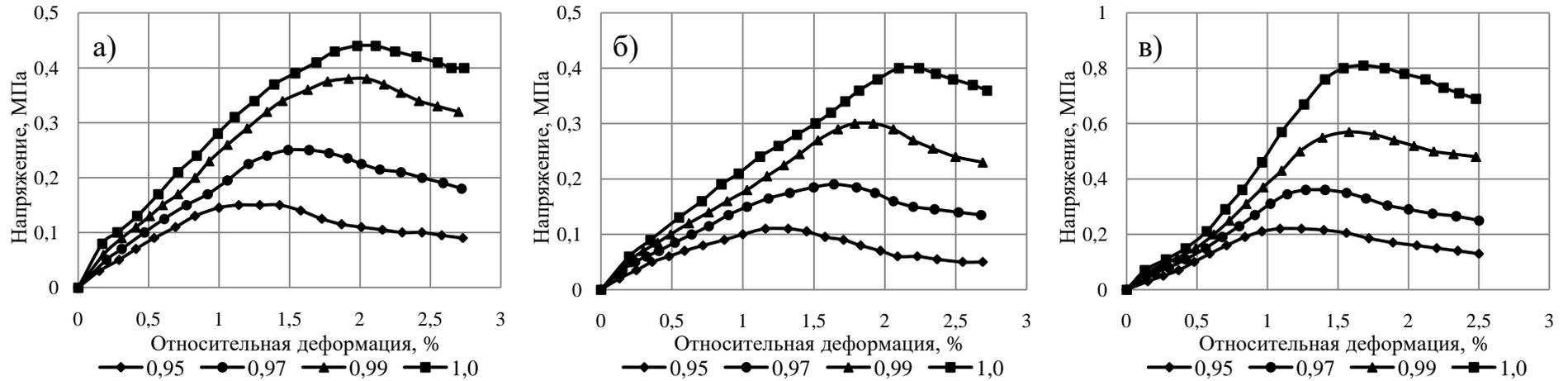


Рисунок 31 – Зависимость напряжения от относительной деформации при различных коэффициентах уплотнения при 85 °С: а – ЩМА15; б – ЩМА20; в – Б1.

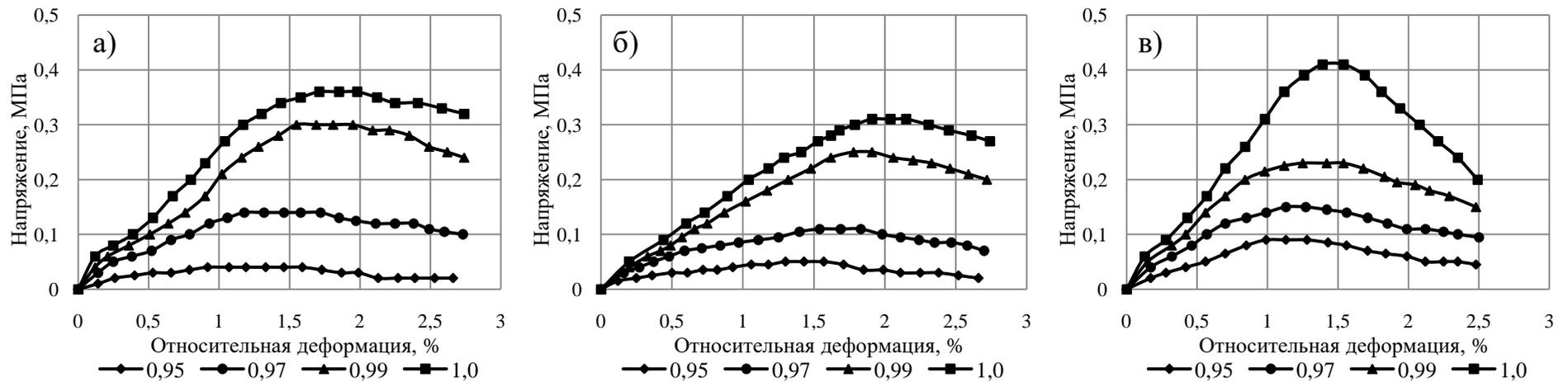


Рисунок 32 – Зависимость напряжения от относительной деформации при различных коэффициентах уплотнения при 100 °С: а – ЩМА15; б – ЩМА20; в – Б1.

Закономерности изменения предела прочности асфальтобетонных смесей вследствие снижения коэффициента уплотнения при температурах 85 °С и 100 °С, полученные после обработки предыдущих графических зависимостей, представлены на рисунке 33.

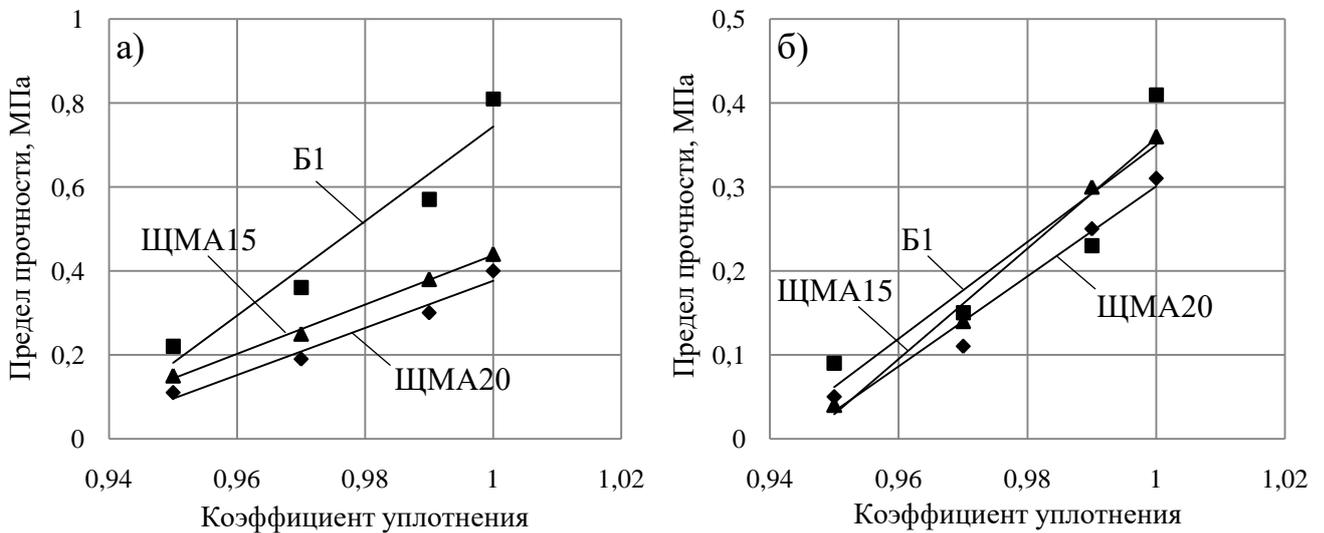


Рисунок 33 – Зависимость предела прочности при сжатии от коэффициента уплотнения смеси: а – при 85 °С; б – при 100 °С.

При изменении плотности материала в диапазоне, характерном для основной и заключительной стадий укатки, приведенные зависимости предела прочности смеси от коэффициента уплотнения могут быть с высокой степенью точности описаны с помощью линейных функций. Математические выражения, полученные для каждой из температур, а также соответствующие им коэффициенты детерминации представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Зависимость предела прочности от коэффициента уплотнения

Материал	Температура 85 °С		Температура 100 °С	
	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>
Б1	$y=11,254x-10,511$	0,9407	$y=5,7627x-5,4131$	0,8445
ЩМА15	$y=5,8644x-5,4275$	0,9966	$y=6,5763x-6,2183$	0,9905
ЩМА20	$y=5,6271x-5,2505$	0,9690	$y=5,3559x-5,0554$	0,9705

Таким образом, на основании проведенного анализа свойств асфальтобетонных смесей можно сделать вывод о линейной взаимосвязи между пределом прочности и коэффициентом уплотнения материала.

### 3.3.3 Определение влияния совокупности факторов на предел прочности асфальтобетонной смеси

В процессе уплотнения предел прочности асфальтобетонной смеси изменяется под действием множества различных факторов, учесть одновременное влияние которых не представляется возможным. Вследствие этого требуется выявление ключевых характеристик, приводящих к наибольшему увеличению показателя прочности смеси, и установление степени их воздействия на него.

Результаты выполненных испытаний свидетельствуют о том, что предел прочности в значительной мере зависит от температуры и коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси. Определение влияния совокупности данных характеристик, а также скорости приложения нагрузки на прочностные показатели изучаемых материалов осуществлялось посредством проведения трехфакторного эксперимента согласно методике и матрице ПФЭ, представленным в разделе 3.1. Результаты трехфакторного эксперимента приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты трехфакторного эксперимента

Б1				ЩМА15				ЩМА20			
Т, °С	K <sub>y</sub>	V <sub>def</sub> , мм/мин	σ <sub>p</sub> , МПа	Т, °С	K <sub>y</sub>	V <sub>def</sub> , мм/мин	σ <sub>p</sub> , МПа	Т, °С	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

Использование метода наименьших квадратов для выполнения регрессионного анализа данных, полученных в ходе проведенного экспериментального исследования, позволило определить зависимости между пределом прочности смеси и температурой, коэффициентом уплотнения, а также скоростью нагружения в диапазоне значений, соответствующем укатке покрытий дорожными катками. Установленные закономерности изменения прочностных характеристик рассмотренных асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Математическая зависимость предела прочности

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

Вследствие того, что изучаемые факторы имеют различный порядок величин, сравнение между собой влияния каждого из них на предел прочности асфальтобетонной смеси является нецелесообразным. Тем не менее, анализ представленных уравнений регрессии позволяет сопоставить степень оказываемого воздействия отдельного показателя для различных составов смесей. Так, наименьшим образом температурный фактор влияет на прочностные характеристики смеси ЩМА20, что подтверждается результатами однофакторного эксперимента (рисунок 30). Действие коэффициента уплотнения на предел прочности наиболее ярко выражено у асфальтобетонной смеси Б1, что наглядно продемонстрировано на рисунке 33а, а скорость нагружения, в свою очередь, схожим образом влияет на изучаемый показатель для всех рассмотренных материалов.

Таким образом, установленные зависимости дают возможность в любой момент времени определить предел прочности асфальтобетонной смеси, изменяющийся в процессе укатки под влиянием вышеперечисленных ключевых факторов.

### Выводы по третьей главе

На основании проведенного экспериментального исследования прочностных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения можно сделать следующие выводы:

1. Разработана уточненная методика определения прочностных характеристик асфальтобетонных смесей в диапазоне значений температуры, плотности и скорости нагружения материала, соответствующем укатке покрытий дорожными катками.

2. Изменение прочностных свойств смеси вследствие повышения температуры с высокой степенью точности описывается линейной функциональной зависимостью. Наибольшее влияние на характер данной закономерности оказывают свойства битума, а также наличие в составе материала дополнительных стабилизирующих добавок.

3. Между показателем прочности асфальтобетонной смеси и коэффициентом уплотнения существует линейная взаимосвязь, наиболее ярко выраженная при более низких температурах вследствие уменьшения влияния вязкости битума.

4. Определены зависимости предела прочности асфальтобетонных смесей от совокупного действия температуры, коэффициента уплотнения и скорости нагружения материала. Использование данных закономерностей совместно с моделью взаимодействия вальцов многофункционального катка с уплотняемым слоем позволяет разработать методику расчета рациональных параметров машины с целью повышения эффективности укатки дорожных покрытий.

## ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОРОЖНОГО КАТКА

### 4.1 Методика расчета параметров многофункционального катка

Определение рациональных параметров многофункционального катка осуществляется на основе вычисления характеристик напряженно-деформированного состояния, развивающегося в слое асфальтобетонной смеси, с использованием представленной во второй главе математической модели процесса взаимодействия рабочих органов дорожных машин с уплотняемым материалом. Для решения системы дифференциальных уравнений (63), описывающей исходную модель, с целью повышения точности и скорости выполнения расчетов был применен метод конечных разностей.

Вследствие того, что уплотнение асфальтобетонных смесей представляет собой нестационарный процесс, нахождение решения с помощью данного численного метода производится последовательно для каждого момента времени. Наибольшей устойчивостью при этом обладают неявные схемы, не зависящие от шага разностной сетки, в которых производные первого и второго порядка могут быть аппроксимированы следующим образом:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=t_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}; \quad (76)$$

$$\left. \frac{d^2x}{dt^2} \right|_{t=t_i} = \frac{x_{i+1} - 2 \cdot x_i + x_{i-1}}{\Delta t^2}; \quad (77)$$

Тогда разностная схема системы уравнений (63) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon_{i+1} - 2 \cdot \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{\tau^2} = a_{0i} + b_{0i} \cdot \chi \cdot \sin \omega t_i - c_{0i} \cdot \sigma_i, \\ \frac{\sigma_{i+1} - 2 \cdot \sigma_i + \sigma_{i-1}}{\tau^2} = c_1 \cdot [E_0(t_i) + E_{очн}^{(1-h(t_i)/B)}] \cdot \frac{\varepsilon_{i+1} - 2 \cdot \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{\tau^2} - c_2 (\sigma_i - \sigma_T) + \\ + \frac{c_1 \cdot [E_0(t) + E_{очн}^{(1-h(t)/B)}] \cdot (n+m)}{(n\theta_3 + m\theta_2)} \cdot \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{\tau} - c_2 \cdot (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\tau} \end{cases} \quad (78)$$

где  $\tau = \Delta t$  – временной шаг разностной сетки.

Выразив значения напряжения и деформации для последующего временного шага, получим выражение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{i+1} = 2 \cdot \varepsilon_i + \varepsilon_{i-1} + a_{0i} \cdot \tau^2 + b_{0i} \cdot \tau^2 \cdot \chi \cdot \sin(2fi\pi\tau) - c_{0i} \cdot \tau^2 \cdot \sigma_i, \\ \sigma_{i+1} = \frac{1}{1 + \tau \cdot c_2(n\theta_2 + m\theta_3)} \cdot (2\sigma_i - \sigma_{i-1} + c_1 \cdot [E_0(t_i) + E_{оч}^{(1-h(t_i)/B)}]) \cdot (\varepsilon_{i+1} - 2\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}) + \\ + \frac{c_1 \cdot \tau \cdot [E_0(t) + E_{оч}^{(1-h(t)/B)}](n+m)}{(n\theta_3 + m\theta_2)} (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) + c_2 \cdot \tau \cdot (n\theta_2 + m\theta_3) \cdot \sigma_i - c_2 \cdot \tau^2 \cdot (\sigma_i - \sigma_T) \end{array} \right. \quad (79)$$

В качестве начальных условий на нулевом и первом шаге расчета выступают напряжения, развивающиеся в слое вследствие оказываемой на него весовой нагрузки, а также отсутствие деформаций материала:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0 = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B}, \\ \sigma_1 = \frac{(m_1 + m_2) \cdot g}{L_{AB}(t) \cdot B}, \\ \varepsilon_0 = 0, \\ \varepsilon_1 = 0. \end{array} \right. \quad (80)$$

Особенностью применяемой схемы вычислений является рекурсивный вызов функций напряжения и деформации, т.е. зависимость расчетных величин на последующем шаге от их значений в предыдущие моменты времени, что согласуется с наследственной теорией вязкоупругости Больцмана-Вольтерра.

С помощью представленных в третьей главе зависимостей предела прочности от скорости деформирования, температуры и коэффициента уплотнения смеси в каждый момент времени определяются прочностные характеристики материала, после чего производится их сравнение с действующими напряжениями, найденными по формуле (79). Если условие  $\sigma(t) < 0,75\sigma_p$  не выполняется, то, ввиду невозможности гарантировать качество дорожного покрытия, дальнейшее вычисление параметров нагружения прекращается. В этом случае необходимо уменьшить силовую нагрузку, оказываемую на слой, и выполнить расчет с новыми исходными данными.

С учетом взаимосвязи между абсолютной деформацией  $e$  и ее относительной величиной  $\varepsilon$  существует возможность установить значение коэффициента уплотнения смеси в каждый момент времени:

$$K_{y_i} = K_{y_{i-1}} \cdot \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} - e_i}; \quad (81)$$

Неотъемлемой составляющей производимых вычислений является последовательное увеличение количества циклов нагружения асфальтобетонной смеси рабочими органами многофункционального катка, что позволяет установить необходимое число проходов по следу для получения заданной плотности покрытия. Расчет напряжений в слое и его деформации реализуется до момента достижения требуемого коэффициента уплотнения материала  $K_{y_{TP}}$ , т.е. выполнения следующего условия:

$$K_{y_i} \geq K_{y_{TP}}; \quad (82)$$

Представление системы дифференциальных уравнений (63) в виде разностной схемы (79) позволяет автоматизировать процесс расчета параметров дорожных машин и режимов их работы с использованием ЭВМ. С данной целью был разработан программный продукт Unikat, алгоритм работы которого представлен на рисунке 34. Его отличительной чертой выступает наличие трех независимых ветвей вычислений, задействуемых в зависимости от выбранного средства уплотнения асфальтобетонных смесей – статического, вибрационного или многофункционального дорожного катка. Расчет для каждого из трех типов машин выполняется схожим образом, при этом для многофункционального катка также производится определение моментов смены контактных давлений в процессе укатки.

Критерием перехода от начального режима работы с опорой на все рабочие органы к статической укатке с вывешиванием на пневмошинных вальцах служит двадцатипроцентный прирост коэффициента уплотнения от требуемого диапазона его изменения. Последующее изменение оказываемой на слой силовой нагрузки осуществляется после дальнейшего равнозначного увеличения искомого показателя.

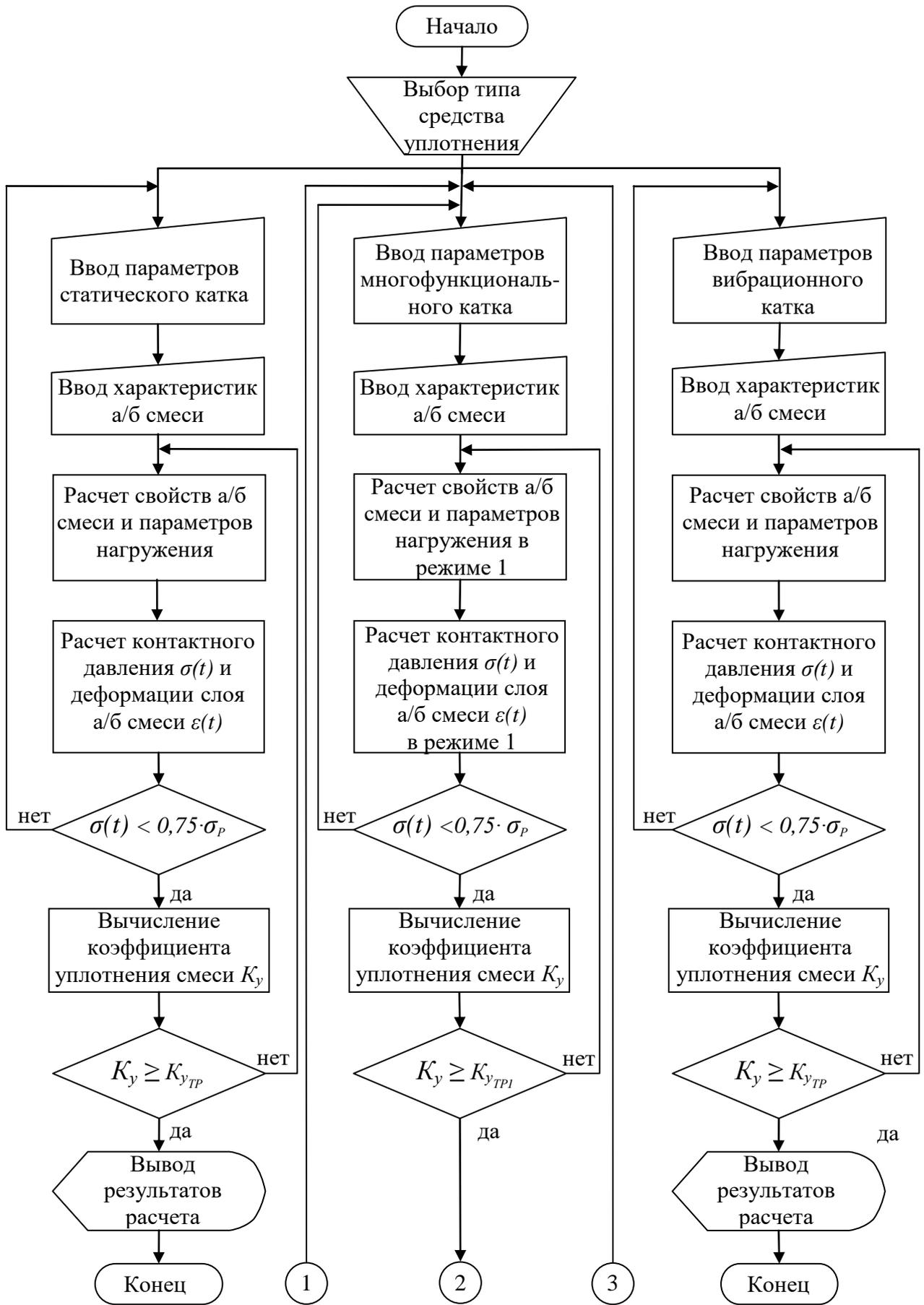


Рисунок 34 – Алгоритм расчета параметров дорожных катков в программе Unikat.

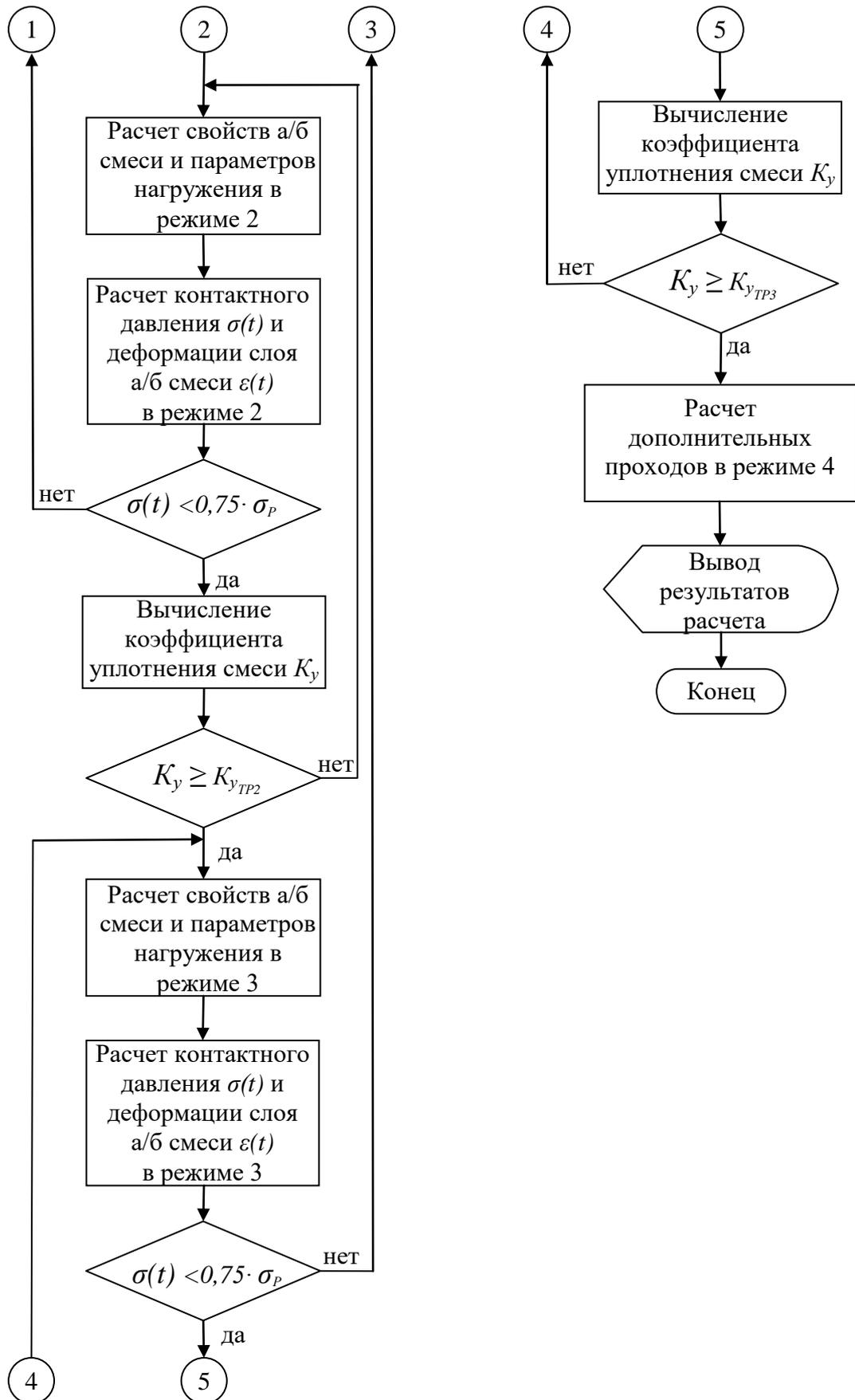


Рисунок 34 – Продолжение.

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 смены режимов работы данной дорожной машины, имеют следующий вид:

$$K_{утр1} = K_{унач} + 0,2 \cdot (K_{укон} - K_{унач}), \quad (83)$$

$$K_{утр2} = K_{унач} + 0,4 \cdot (K_{укон} - K_{унач}), \quad (84)$$

где  $K_{унач}$ ,  $K_{укон}$  – начальный и конечный коэффициент уплотнения соответственно.

В исследованиях [61, 62, 66] отмечается необходимость проведения 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. В качестве критерия перехода в данном случае выступает достижение конечного проектного коэффициента уплотнения:

$$K_{утр3} = K_{укон}; \quad (85)$$

Таким образом, разработанная методика расчета параметров многофункционального катка позволяет определить рациональные технические характеристики машины, а также установить моменты смены контактных давлений, оказываемых ее рабочими органами на уплотняемый слой смеси, обеспечивая тем самым высокое качество укатки асфальтобетонного покрытия.

## 4.2 Описание программного продукта

Сложность математических моделей, описывающих процесс взаимодействия вальца катка с дорожной поверхностью, разнообразие

используемых асфальтобетонных смесей, широкая номенклатура применяемых средств уплотнения и множество режимов их эксплуатации затрудняют нахождение рационального способа укатки покрытий и обуславливают необходимость создания автоматизированного программного комплекса для решения данной задачи.

Программный продукт Unikat, разработанный на кафедре «Транспортные и технологические системы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, адаптирован для расчета параметров и режимов работы как статических и вибрационных гладковальцовых катков, так и многофункционального средства уплотнения дорожных покрытий. Исходный код программы представлен в приложении Б. Выбор типа дорожного катка осуществляется в начальном окне программы, показанном на рисунке 35:

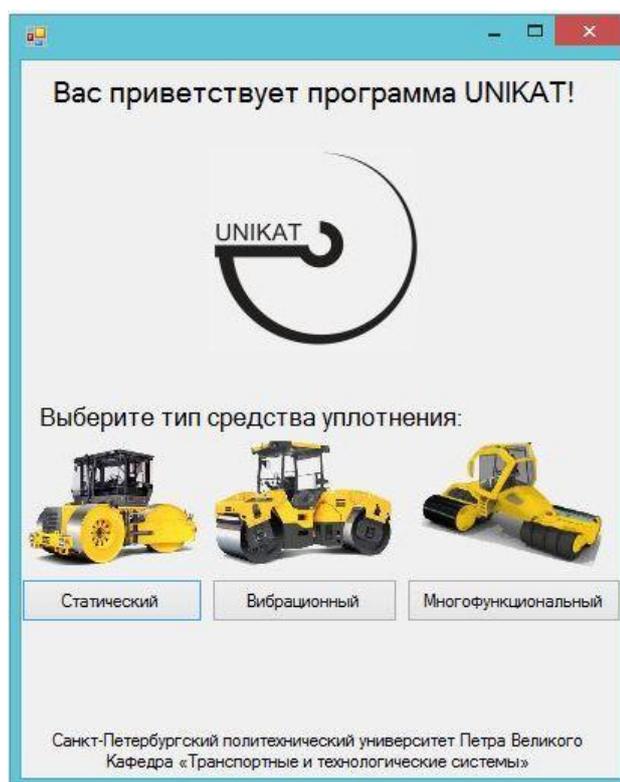


Рисунок 35 – Начальное окно программы Unikat.

После определения типа средства уплотнения необходимо задать параметры работы дорожной машины, а именно: весовые характеристики катка, его основные размеры, длину захватки и скорость укатки. Для расчета

многофункционального катка, как показано на рисунке 36а, дополнительно требуется ввести величину центробежной силы и частоты колебаний рабочего органа, а для вибрационного, кроме этого, – количество виброрывальцов.

В окне ввода данных, представленном на рисунке 36б, пользователю предоставляется возможность указать известные характеристики материала, такие как тип смеси, ее начальная температура, толщина слоя, а также начальный и конечный коэффициент уплотнения. Выбранному типу материала в автоматическом режиме присваиваются параметры зернового состава смеси, необходимые для расчета динамического модуля деформации, и значения времени быстрой и медленной релаксации.

На основании полученной информации программа в каждый момент времени рассчитывает длину дуги и время контакта вальца катка с дорожным покрытием, а также, исходя из допущения о равномерном охлаждении материала со скоростью  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , определяет вязкость битума и модуль деформации смеси.

Далее, согласно описанной ранее методике, производится вычисление требуемого количества проходов по следу для получения заданной плотности материала, времени, необходимого для выполнения данной технологической операции, и конечной температуры смеси. В ходе расчета проводится непрерывное сравнение контактных давлений с пределом прочности материала, и в случае превышения уровня критических напряжений подается сообщение об ошибке, предупреждая тем самым образование дефектов уплотняемого слоя.

Для многофункционального средства уплотнения, помимо общего количества циклов нагружения, также определяются моменты смены вариантов передачи нагрузки на уплотняемый слой. Расчетные данные выводятся в пользовательском окне, общий вид которого для многофункционального катка представлен на рисунке 37а.

В свою очередь, для статических и вибрационных гладковальцовых дорожных машин существует дополнительная опция, позволяющая отображать в отдельной вкладке, показанной на рисунке 37б, изменение контактных давлений и деформаций во времени для первого прохода катка.

**а) Параметры работы катка**

Масса катка, кг

Масса вальца, кг

Радиус вальца, м

Ширина вальца, м

Скорость катка, км/ч

Длина захватки, м

Частота вибрации, Гц

Центробежная сила, Н

Число вибрирующих вальцов

<<< Назад    Вперед >>>

**б) Параметры асфальтобетонной смеси**

Тип смеси

Начальная температура, °С

Толщина слоя, см

Начальный коэффициент уплотнения

Требуемый коэффициент уплотнения

<<< Назад    Вперед >>>

Рисунок 36 – Окно ввода данных: а – параметры работы катка; б – характеристики асфальтобетонной смеси.

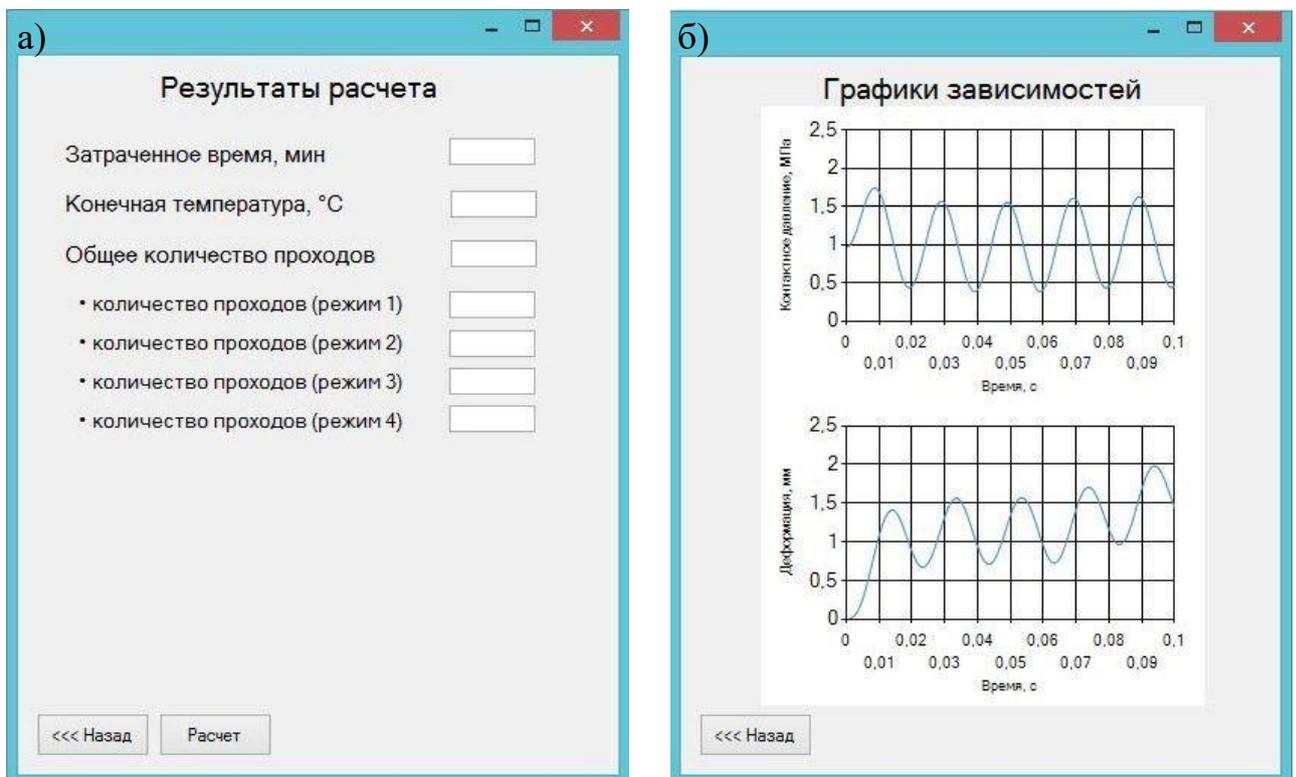


Рисунок 37 – Вывод результатов расчета: а – для многофункционального катка; б – дополнительное окно с параметрами нагружения для первого прохода.

Верификация программного продукта Unikat производилась путем соотнесения результатов расчета процесса уплотнения асфальтобетонной смеси типа А дорожным катком Hamm HD110 с соответствующими экспериментальными данными, представленными в работе Серебренникова В.С. [115]. Технические характеристики уплотняющей машины приведены в таблице 11. Укатка производилась в вибрационном режиме с частотой 50 Гц и вынуждающей силой 87 кН, скорость движения катка составляла 2 км/ч.

Таблица 11 – Паспортные данные дорожного катка Hamm HD110

Параметр	Значение
Масса катка, т	10,6
Масса вальца, т	2
Ширина вальца, м	1,68
Радиус вальца, м	0,6
Д×Ш×В, мм×мм×мм	4600×1810×3050

В качестве критерия для оценки точности вычислений выступало изменение коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси в зависимости от числа проходов дорожного катка. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений коэффициента уплотнения представлено на рисунке 38:

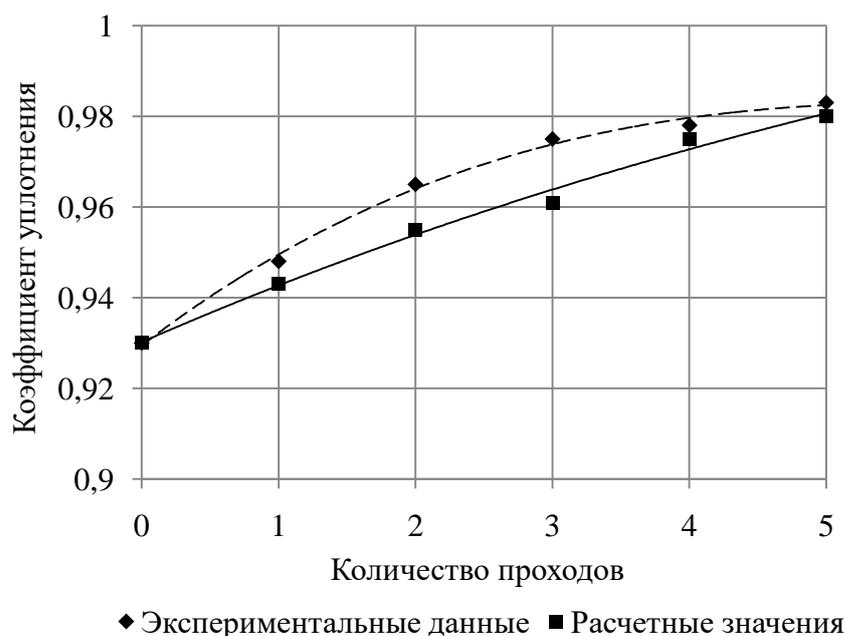


Рисунок 38 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента уплотнения смеси.

Анализ представленных закономерностей показывает наибольшее расхождение результатов после 2-го и 3-го проходов катка, т.е. на основной стадии укатки. Тем не менее, максимальная погрешность вычислений составляет не более 5%, на основании чего можно сделать вывод о правомерности применения предложенных математических моделей, методики и алгоритма расчета для описания процесса уплотнения асфальтобетонных смесей катками.

Таким образом, разработанный программный продукт Unikat позволяет с высокой степенью точности производить расчет рациональных параметров катков и их режимов работы, а для многофункционального катка также определять моменты смены вариантов передачи нагрузки на слой.

### 4.3 Определение основных характеристик многофункционального катка

#### 4.3.1 Установление весовых параметров

Установление рациональных характеристик многофункционального средства уплотнения проводилось по разработанной методике при помощи программы Unikat. В качестве критерия оптимизации было выбрано требуемое число проходов катка для достижения единичного коэффициента уплотнения.

Базовые параметры многофункционального катка и режима укатки, используемые в качестве начальных условий при определении рациональных характеристик машины, приведены в таблице 12:

Таблица 12 – Базовые параметры расчета

Параметр	Значение
Масса катка, т	12
Масса вальца, т	1,8
Ширина вальца, м	1,68
Радиус вальца, м	0,6
Скорость катка, км/ч	2
Частота колебаний, Гц	50
Центробежная сила, кН	48
Толщина слоя, м	0,06
Начальная температура смеси, °С	120
Начальный коэффициент уплотнения	0,94

Одним из наиболее важных показателей дорожного катка любого типа является его масса. Влияние данного параметра на суммарное количество проходов многофункционального средства уплотнения показано на рисунке 39. Для каждого из трех изучаемых материалов имеется максимальное значение общей массы катка  $M_{кр}$ , при превышении которой в слое развиваются напряжения, превосходящие предельно допустимые величины согласно условию (2). Наибольшей нагрузочной способностью 13,9 т обладает смесь ЦМА15, в то время как наименьший показатель 13 т наблюдается у Б1, т.е.  $M_{кр3} > M_{кр2} > M_{кр1}$ .

В то же время минимально требуемое для уплотнения смеси число проходов, равное 6 для Б1 и ЦМА20, а также 7 – для ЦМА15 достигается при массе катка 13 т. При укатке смеси ЦМА15 дорожной машиной большей массы наблюдается рост искомого показателя оптимизации вследствие разуплотнения материала, вызванного чрезмерной весовой нагрузкой, оказываемой на слой.

Другим значимым параметром дорожного катка выступает масса его рабочего органа. Варьирование данного показателя в широком диапазоне от 1,4 т до 2,6 т позволяет сделать вывод о том, что увеличение массы вальца приводит к снижению требуемого количества проходов.

Однако существует определенное значение весового показателя, превышение которого более не оказывает влияния на уменьшение работы, затрачиваемой на уплотнение дорожного покрытия. Из рисунка 40 следует, что рациональная величина для всех трех смесей соответствует массе вальца 2 т.

Таким образом, анализ весовых характеристик многофункционального средства уплотнения показывает, что рациональными значениями массы катка и его рабочего органа являются 13 т и 2 т соответственно, а дальнейшее увеличение веса машины может привести к образованию дефектов готового дорожного покрытия.

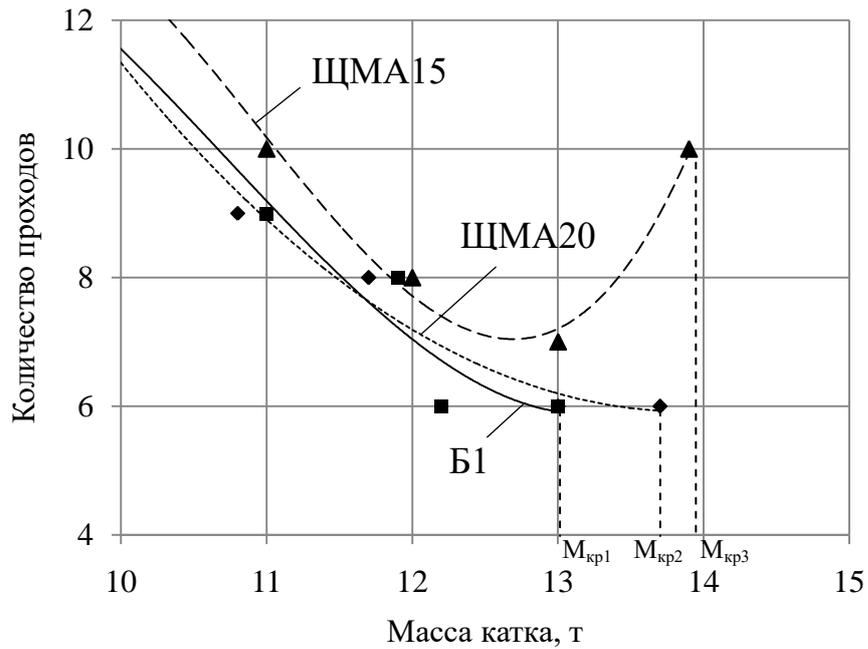


Рисунок 39 – Зависимость необходимого числа проходов от массы многофункционального катка.

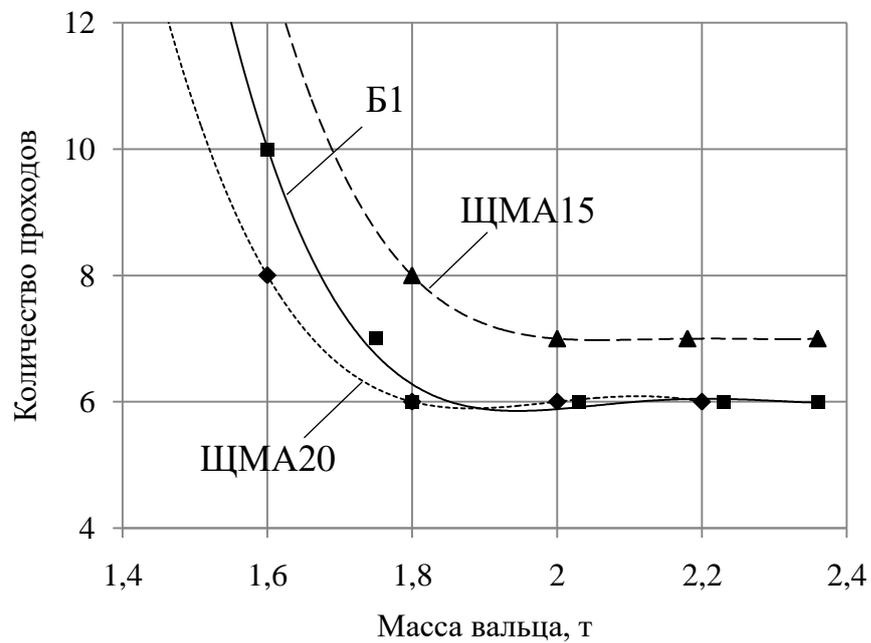


Рисунок 40 – Зависимость требуемого числа проходов от массы рабочего органа многофункционального катка.

### 4.3.2 Определение геометрических характеристик рабочего органа

Наравне с весовыми параметрами дорожной машины к показателям, оказывающим существенное влияние на процесс уплотнения, относятся геометрические характеристики рабочего органа катка. Первостепенное значение среди них имеет ширина вальца, напрямую влияющая на линейную нагрузку, оказываемую на уплотняемый слой. Закономерность изменения требуемого числа проходов от величины данной геометрической характеристики представлена на рисунке 41.

Вследствие того, что уменьшение ширины при прочих равных условиях влечет за собой увеличение контактных давлений, оказываемых со стороны рабочих органов на слой смеси, размер вальца должен превышать критическое значение  $B_{кр}$ . Укатка при ширине вальца катка 1,5 м обеспечивает получение заданной плотности после 6 проходов для смесей Б1 и ЩМА20, а также 7 – для ЩМА15

Согласно рекомендациям Хархуты Н.Я. [26], ширина рабочего органа дорожного катка должна в 1,1-1,5 раза превышать его диаметр. Тогда на основании данного соотношения и зависимостей, построенных для ширины вальца, можно получить закономерности изменения количества проходов от диаметра рабочего органа, показанные на рисунке 42.

Уменьшение радиуса вальца приводит к снижению размера контактной площадки и, как следствие, увеличению напряжений в уплотняемом слое. Для укатки изучаемых смесей Б1, ЩМА15 и ЩМА20 критическое значение диаметров рабочих органов  $D_{кр}$  составляет 1,2 м.

Наибольшую эффективность процесс уплотнения достигает при использовании вальца с диаметром 1,2 м и шириной 1,5 м, что обуславливает выбор данных значений при дальнейшем проектировании многофункционального катка. Увеличение поперечного размера рабочего органа машины приводит к возрастанию ширины захвата, но вследствие роста необходимого количества проходов по следу отрицательно сказывается на производительности катка.

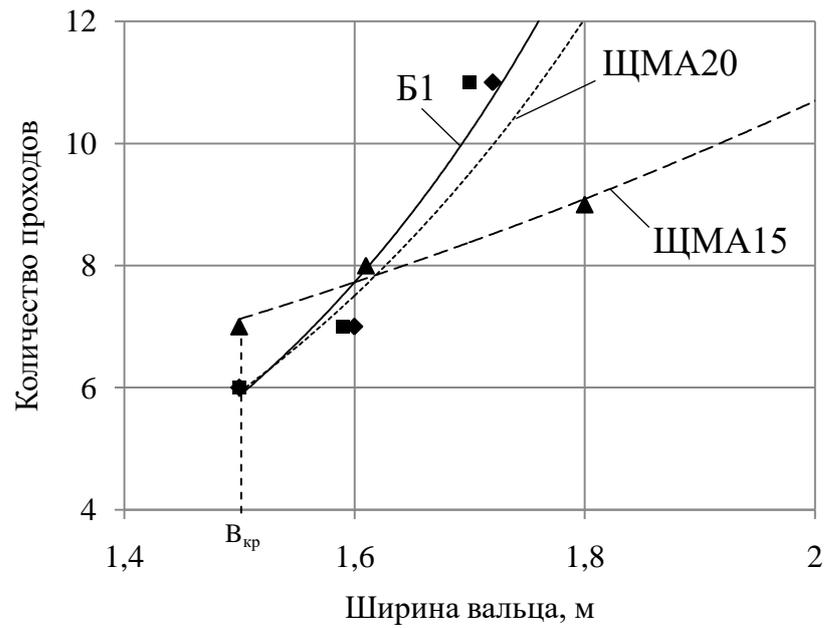


Рисунок 41 – Зависимость требуемого числа проходов от ширины рабочего органа многофункционального катка.

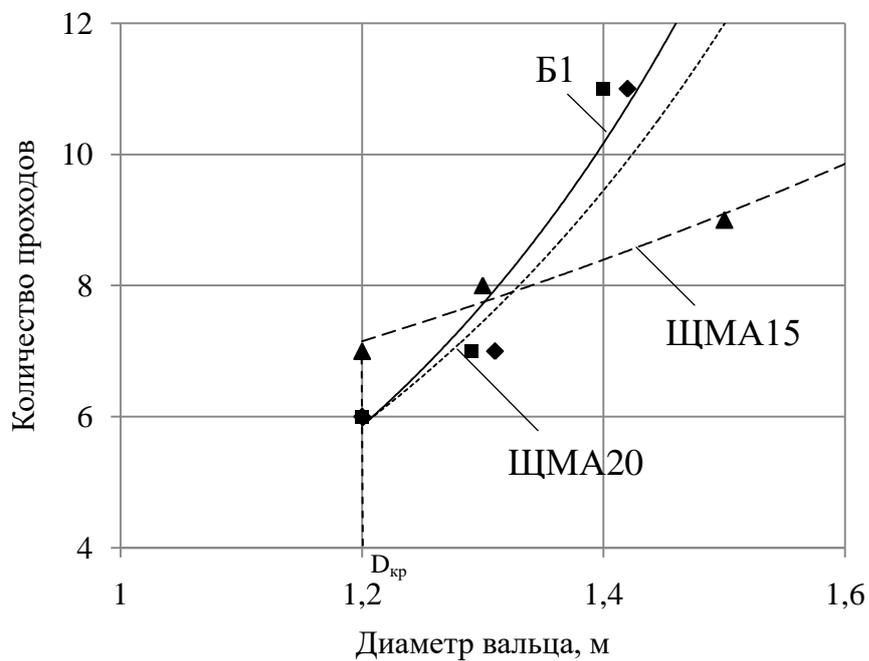


Рисунок 42 – Зависимость необходимого числа проходов от диаметра вальца многофункционального катка.

### 4.3.3 Установление рационального режима виброуплотнения

Основной объем работ по укатке дорожных покрытий выполняется многофункциональным катком в вибрационном режиме, в связи с чем целесообразным является нахождение рациональных параметров процесса уплотнения при данном варианте передачи силовой нагрузки слою смеси.

В ходе проведенного исследования влияния величины центробежной силы на требуемое количество проходов многофункционального катка были построены зависимости, представленные на рисунке 43. Увеличение возмущающей силы вызывает снижение необходимого числа проходов, при этом существует критическое значение данного параметра  $Q_{кр}$ , превышение которого может привести к образованию дефектов дорожной поверхности. Для укатки изучаемых смесей Б1, ЦМА15 и ЦМА20 справедливо следующее соотношение критических значений центробежных сил:  $Q_{кр1} < Q_{кр2} < Q_{кр3}$ . Уплотнение рассматриваемых асфальтобетонных смесей с вынуждающей силой 60 кН позволяет получить покрытие с заданными характеристиками при минимальном числе проходов многофункционального катка.

Важной характеристикой процесса вибрационного уплотнения является частота колебаний вальца. Закономерность изменения необходимого числа проходов от данного параметра вибрации показана на рисунке 44. Увеличение периода колебаний приводит к росту показателя оптимизации вследствие уменьшения количества циклов нагружения слоя смеси за один проход катка. Значение частоты вибрации 50 Гц является рациональным, так как обеспечивает минимально требуемое число проходов. Дальнейшее ее увеличение не оказывает влияния на показатель оптимизации ввиду того, что в слое не успевают полностью пройти релаксационные процессы.

Таким образом, рациональным режимом вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей многофункциональным катком выступает укатка дорожного покрытия с центробежной силой 60 кН и частотой колебаний вальца 50 Гц.

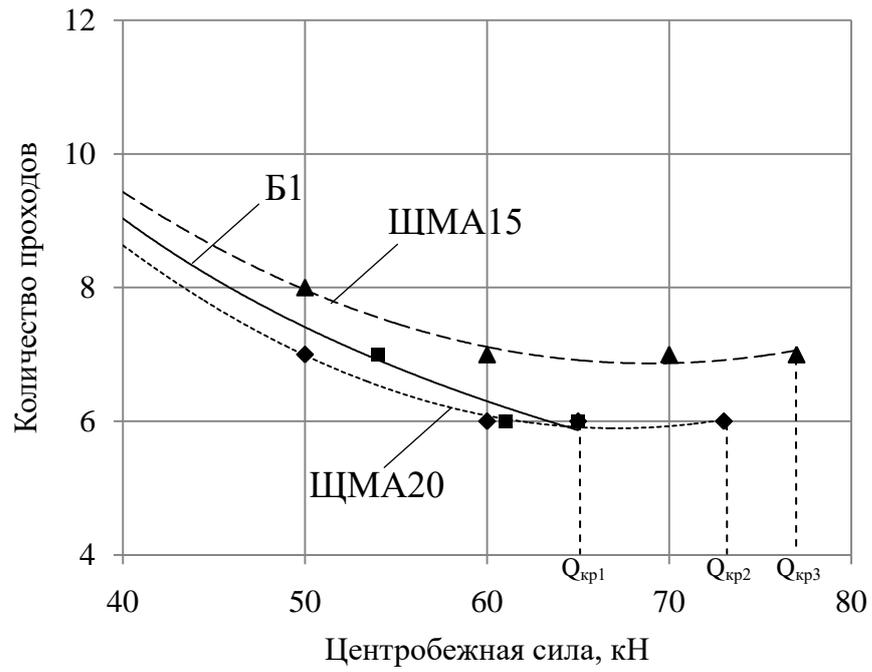


Рисунок 43 – Зависимость требуемого количества проходов от величины центробежной силы.

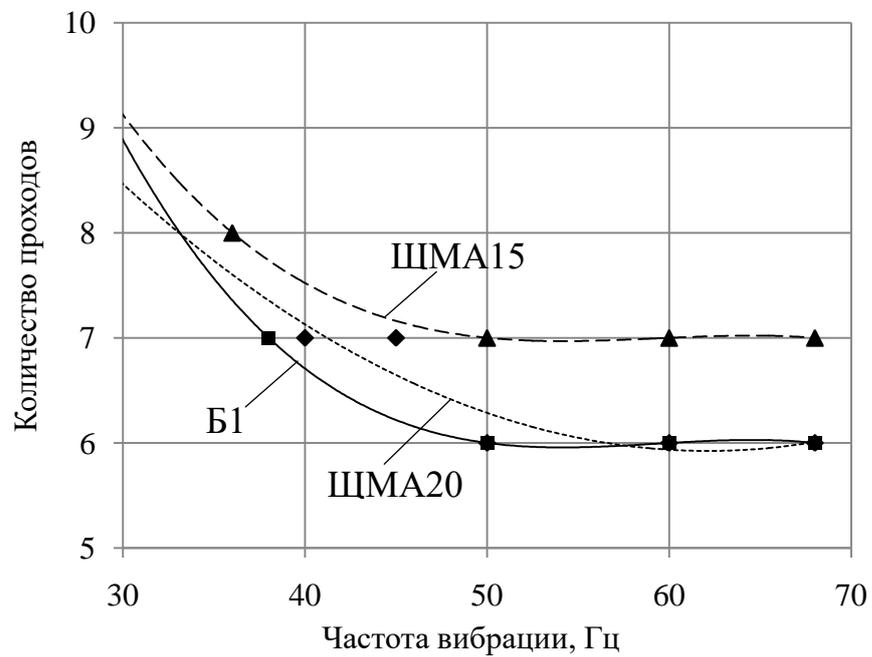


Рисунок 44 – Зависимость требуемого количества проходов от частоты колебаний вибровальца.

#### 4.4 Технико-экономическое обоснование эффективности использования многофункционального катка

Для определения целесообразности внедрения многофункционального катка необходимо произвести сравнение его рабочих показателей со звеном дорожных машин, состоящим из пневмошинного, вибрационного и статического катков, производящих укатку горячих асфальтобетонных смесей согласно существующей технологии уплотнения. В качестве критериев эффективности использования данного катка были выбраны годовая эксплуатационная производительность, приведенная к одной дорожной машине, и годовой экономический эффект от его внедрения.

Эксплуатационная производительность многофункционального катка определяется по следующей зависимости:

$$P^{mn} = \frac{1000 \cdot V \cdot (B - A) \cdot K^{mn}}{n}; \quad (86)$$

где  $P^{mn}$  – эксплуатационная производительность многофункционального катка, м<sup>2</sup>/ч;  $V$  – средняя скорость движения катка, км/ч;  $B$  – ширина укатываемой полосы, м;  $A$  – величина перекрытия, м;  $n$  – требуемое количество проходов для достижения заданного коэффициента уплотнения;  $K^{mn}$  – коэффициент использования рабочего времени катка.

Общий коэффициент использования рабочего времени звена дорожных катков, состоящего из пневмошинного, вибрационного и тяжелого статического средства уплотнения, равен произведению коэффициентов использования каждой из машин:

$$K_{зв}^{общ} = K^{nn} \cdot K^e \cdot K^{cm} = 0,92 \cdot 0,89 \cdot 0,9 = 0,74; \quad (87)$$

где  $K_{зв}^{общ}$  – коэффициент рабочего времени звена;  $K^{nn}$ ,  $K^e$ ,  $K^{cm}$  – коэффициент использования рабочего времени пневмошинного, вибрационного и статического катка соответственно.

Приведенная эксплуатационная производительность дорожного катка в составе звена машин вычисляется следующим образом:

$$P_{36}^{\kappa} = \frac{1000 \cdot V \cdot (B_{\min} - A)}{n_{\Sigma}} \cdot K_{36}^{\text{общ}}; \quad (88)$$

где  $P_{36}^{\kappa}$  – приведенная эксплуатационная производительность дорожного катка в составе звена машин, м<sup>2</sup>/ч;  $n_{\Sigma}$  – суммарное количество проходов по одному следу звена катков для достижения заданной плотности покрытия;  $B_{\min}$  – минимальная ширина рабочего органа дорожных катков, м.

Тогда приведенная эксплуатационная производительность одного катка в составе звена машин Дунарас СР2100, Дунарас СС2200 и Дунарас СС1400, используемого при строительстве автомобильных дорог в Санкт-Петербурге, будет равна:

$$P_{36}^{\kappa} = \frac{1000 \cdot 4 \cdot (1,5 - 0,2)}{6} \cdot 0,74 = 641,3;$$

Расчетная эксплуатационная производительность многофункционального катка составит:

$$P^{mn} = \frac{1000 \cdot 4 \cdot (1,5 - 0,2)}{6} \cdot 0,95 = 823,3;$$

Годовая эксплуатационная производительность рассчитывается по формуле:

$$P_{\Gamma} = P \cdot T_{\text{см}} \cdot (D_{\text{с}} - D_{\text{вых}}); \quad (89)$$

где  $P_{\Gamma}$  – годовая эксплуатационная производительность, м<sup>2</sup>/год;  $T_{\text{см}}$  – продолжительность рабочей смены, ч;  $D_{\text{с}}=200$  – продолжительность сезона дорожных работ;  $D_{\text{вых}}=60$  – количество выводных и праздничных дней.

Приведенная годовая эксплуатационная производительность дорожного катка в составе звена машин  $P_{36\Gamma}^{\kappa}$ :

$$P_{36\Gamma}^{\kappa} = 641,3 \cdot 8 \cdot (200 - 60) = 718256;$$

Расчетная годовая эксплуатационная производительность многофункционального катка:

$$P_{\Gamma}^{mn} = 823,3 \cdot 8 \cdot (200 - 60) = 922096;$$

За счёт использования многофункционального средства уплотнения увеличение годовой эксплуатационной производительности, приведенной к одному дорожному катку  $\Delta P$ , составит:

$$\Delta\Pi = \frac{\Pi_{\Gamma}^{mn} - \Pi_{36\Gamma}^k}{\Pi_{36\Gamma}^k} \cdot 100\% = \frac{922096 - 718256}{718256} \cdot 100\% = 28,4\%; \quad (90)$$

Общая годовая эксплуатационная производительность звена дорожных катков находится по формуле:

$$\Pi_{\Gamma}^{общ} = N \cdot \Pi_{36\Gamma}^k = 3 \cdot 718256 = 2154768; \quad (91)$$

где  $\Pi_{\Gamma}^{общ}$  – общая годовая эксплуатационная производительность звена катков, м<sup>2</sup>/год;  $N$  – количество дорожных катков в звене.

Удельные капитальные затраты звена катков  $K_{y\partial}^{mn}$  рассчитываются следующим образом:

$$K_{y\partial}^{mn} = \frac{(\Pi^{mn} + \Pi^g + \Pi^{cm}) \cdot E_T}{\Pi_{\Sigma}^{общ}} = \frac{(4500000 + 5000000 + 5500000) \cdot 1,07}{2154768} = 7,45; \quad (92)$$

где  $K_{y\partial}^{mn}$  – удельные капитальные затраты многофункционального катка, руб/м<sup>2</sup>·год;  $\Pi^{mn}$ ,  $\Pi^g$ ,  $\Pi^{cm}$  – цена пневматического, вибрационного и статического катков соответственно, руб;  $E_T = 1,07$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, связанные с приобретением оборудования;

Удельные капитальные затраты многофункционального катка рассчитываются исходя из расчетной стоимости машины, превосходящей на 20% существующие средства уплотнения:

$$K_{y\partial}^{mn} = \frac{\Pi^{mn} \cdot E_T}{\Pi_{\Sigma}^{mn}} = \frac{6000000 \cdot 1,07}{922096} = 6,96; \quad (93)$$

где  $\Pi^{mn}$  – расчетная цена многофункционального катка, руб.

Себестоимость машино-смены определяется из выражения [109]:

$$C_{см} = 1,1 \cdot (C_1 + C_2) + 1,5 \cdot C_3; \quad (94)$$

где  $C_{см}$  – себестоимость машино-смены, руб/м-см;  $C_1$  – затраты на амортизационные отчисления, руб/м-см;  $C_2$  – затраты на техническое обслуживание и ремонт, а также топливо и смазочные материалы, руб/м-см;  $C_3$  – затраты, связанные с заработной платой, руб/м-см.

Амортизационные отчисления для многофункционального катка, приведенные к машино-смене, рассчитываются по формуле:

$$C_1^{MH} = \frac{Ц^{MH} \cdot E_T \cdot A}{100 \cdot (D_c - D_{вых})} = \frac{6000000 \cdot 1,07 \cdot 21,9}{100 \cdot (200 - 60)} = 1004271; \quad (95)$$

где  $C_1^{MH}$  – себестоимость машино-смены многофункционального катка, руб/м-см;  
 $A=21,9\%$  – ставка амортизационных отчислений.

Соответственно амортизационные отчисления для звена дорожных катков рассчитываются аналогичным образом:

$$C_1^{36} = \frac{(Ц^{MH} + Ц^с + Ц^{CM}) \cdot E_T \cdot A}{100 \cdot (D_c - D_{вых})} = \frac{(4,5 + 5,0 + 5,5) \cdot 1000000 \cdot 1,07 \cdot 21,9}{100 \cdot (200 - 60)} = 2510679; \quad (96)$$

Затраты на ремонт определяются исходя из трудоемкости технического обслуживания дорожных катков и тарифной ставки рабочего, выполняющего данную операцию, и составляют 0,19 чел/час [80]. При этом стоимость запасных частей и ремонтных материалов учитывается через коэффициент к заработной плате, равный двум. Тарифная ставка ремонтного рабочего составляет 142 руб/час, а накладные расходы в 1,5 раза превышают размер заработной платы.

Начисления на заработную плату ремонтных рабочих за одну машино-смену многофункционального катка  $C_{3н}^{MH}$  и звена дорожных машин  $C_{3н}^{36}$  составят:

$$C_{3н}^{MH} = 0,19 \cdot 142 \cdot 8 = 215,84;$$

$$C_{3н}^{36} = 3 \cdot 0,19 \cdot 142 \cdot 8 = 647,52;$$

Накладные расходы из расчета на одну машино-смену для каждого из вариантов:

$$C_n^{MH} = 215,82 \cdot 1,5 = 323,73;$$

$$C_{3н}^{36} = 647,52 \cdot 1,5 = 971,28;$$

Стоимость ремонтных материалов и запасных частей:

$$C_n^{MH} = 2 \cdot 215,84 = 431,68;$$

$$C_{3н}^{36} = 2 \cdot 647,52 = 1295,04;$$

Затраты на топливо и смазочные материалы для одного дорожного катка составляют 1000 руб/смену, а для звена – 3000 руб/смену. Тогда затраты второй группы, являющиеся суммой вышеперечисленных затрат, для многофункционального катка  $C_2^{MH}$  и звена дорожных машин  $C_2^{36}$  достигают:

$$C_2^{MH} = 215,84 + 323,73 + 431,68 + 1000 = 1971,25;$$

$$C_2^{36} = 647,52 + 971,28 + 1295,04 + 3000 = 5913,84;$$

Затраты, связанные с оплатой труда, определяются из тарифной ставки машиниста катка, а также различных премий и доплат, достигающих 20% от оклада. При тарифной ставке машиниста 1400 руб/смену данные затраты равняются:

$$C_3^{MH} = 1400 \cdot 1,2 = 1680;$$

$$C_3^{36} = 3 \cdot 1400 \cdot 1,2 = 5040;$$

В результате себестоимость машино-смены, вычисленная по формуле (94), для многофункционального катка  $C_{см}^{MH}$  и звена дорожных машин  $C_{см}^{36}$  составит:

$$C_{см}^{MH} = 1,1 \cdot (1004271 + 1971,25) + 1,5 \cdot 1680 = 15735,36;$$

$$C_{см}^{36} = 1,1 \cdot (2510679 + 5913,84) + 1,5 \cdot 5040 = 41682,69;$$

Себестоимость укатки  $1 \text{ м}^2$  дорожного покрытия вычисляется следующим образом:

$$C_{ед} = \frac{C_{см}}{П \cdot T_{см}}; \quad (97)$$

где  $C_{ед}$  – себестоимость укатки  $1 \text{ м}^2$  дорожного покрытия, руб/ $\text{м}^2$ .

Себестоимость укатки  $1 \text{ м}^2$  многофункциональным катком равняется:

$$C_{ед}^{MH} = \frac{15735,36}{823,3 \cdot 8} = 2,39;$$

Для звена дорожных катков себестоимость укатки  $1 \text{ м}^2$ :

$$C_{ед}^{36} = \frac{41682,69}{3 \cdot 641,3 \cdot 8} = 2,71;$$

Годовой экономический эффект от внедрения от внедрения новой техники рассчитывается по формуле:

$$C_{эк}^{MH} = [(C_{ед}^{36} - C_{ед}^{MH}) + e_n (K_{уд}^{36} - K_{уд}^{MH})] \cdot П_z^{MH}; \quad (98)$$

где  $C_{эк}^{MH}$  – экономический эффект от внедрения многофункционального катка, руб/год;  $e_n$  – норма эффективности дополнительных капитальных вложений, руб/(год·руб).

Тогда годовой экономический эффект от использования многофункционального катка по сравнению со звеном дорожных машин составит:

$$C_{\text{эк}}^{\text{мн}} = [(2,71 - 2,39) + 0,12 \cdot (7,45 - 6,96)] \cdot 922096 = 349290;$$

Срок окупаемости вложений, приведенный к одной машине, рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{\text{ОВ}} = \frac{C^{\text{мн}} - C^{\text{б}}}{C_{\text{эк}}^{\text{мн}}} = \frac{6000000 - 5000000}{349290} = 2,86; \quad (99)$$

где  $T_{\text{ОВ}}$  – срок окупаемости вложений, лет.

Сравнение технико-экономических показателей рассмотренных вариантов представлено в таблице 13:

Таблица 13 – Сравнение технико-экономических показателей вариантов

Показатель	Базовый вариант	Новый вариант
Состав машин	комплект катков (пневмошинный, вибрационный, статический)	многофункциональный каток
Капитальные вложения (млн. руб.)	5	6,5
Приведенная годовая производительность (м <sup>2</sup> /год)	718256	922096
Удельные капитальные затраты (руб/ м <sup>2</sup> ·год)	7,45	6,96
Прирост приведенной производительности (%)	28,4	
Годовой экономический эффект (руб/год)	349290	
Срок окупаемости вложений (лет)	2,86	

Таким образом, внедрение многофункционального дорожного катка является целесообразным ввиду того, что позволит обеспечить рост годовой эксплуатационной производительности, приведенной к одной дорожной машине, на 28,4% и экономический эффект в размере 349290 рублей в год, а срок окупаемости вложений составит 2,86 лет.

### Выводы по четвертой главе

1. Разработана методика и алгоритм расчета параметров многофункционального катка, основанные на уточненной математической модели процесса взаимодействия рабочих органов дорожных машин с уплотняемым слоем и уточненной методике определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе укатки.

2. Разработан программный комплекс Unikat, позволяющий с высокой степенью точности производить расчет рациональных параметров и режимов работы средств уплотнения, а для многофункционального катка также определять моменты смены вариантов передачи силовой нагрузки на слой смеси.

3. Рациональным значением массы многофункционального катка является 13 т, а его рабочего органа – 2 т. Наименьшее требуемое количество проходов катка достигается при использовании вальца с диаметром 1,2 м и шириной 1,5 м.

4. Наибольшую производительность при одновременном обеспечении качества дорожного покрытия процесс вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей многофункциональным катком имеет при укатке с центробежной силой 60 кН и частотой колебаний вальца 50 Гц.

5. Использование многофункционального катка в дорожном строительстве позволит обеспечить рост годовой эксплуатационной производительности, приведенной к одной дорожной машине, на 28,4% и экономический эффект в размере 349290 рублей в год, вследствие чего срок окупаемости вложений составит 2,86 лет, а внедрение данного катка будет целесообразным с технико-экономической точки зрения.

## 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.

**Список литературы**

1. Антипов, Л.А. О шинах и пневмооборудовании дорожных катков [Текст] / Л.А. Антипов, В.И. Соломатин, Б.М. Шереметьев // Автомобильные дороги. – 1983. – № 4. – С. 10-12.
2. Бабков, В.Ф. Качение автомобильного колеса по грунтовой поверхности [Текст] / В.Ф. Бабков // Труды МАДИ. – 1953. – Вып. 15. – С. 50-68.
3. Бабков, В.Ф. Проходимость колесных машин по грунтам [Текст] / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
4. Бадалов, В.В. Изменение температуры асфальтобетона в процессе уплотнения [Текст] / В.В. Бадалов, А.Ф. Зубков // Автомобильные дороги. – 1973. – № 9. – С. 7.
5. Бадалов, В.В. Исследование катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Бадалов. – Л.: 1974. – 17 с.
6. Бадалов, В.В. Рациональный режим уплотнения асфальтобетонной смеси [Текст] / В.В. Бадалов, А.А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1972. – № 6. – С. 18.
7. Бадалов, В.В. Уплотнение асфальтобетонного покрытия катками различного типа [Текст] / В.В. Бадалов, Д.С. Гуральник // Автомобильные дороги. – 1978. – № 7. – С. 17-21.
8. Батраков, О.Т. Теоретические основы уплотнения грунтов земляного полотна и слоев дорожных одежд катками на пневматических колесах [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / О.Т. Батраков. – Харьков, 1978. – 360 с.
9. Белоусов, Л.И. Влияние способов уплотнения на ровность асфальтобетонных покрытий [Текст] / Л.И. Белоусов, Н.Я. Хархута // Автомобильные дороги. – 1974. – № 6. – С. 20-21.
10. Богомолов, В.А. Простейшие звенья линейной пространственной реологической модели асфальтобетона [Текст] / В.А. Богомолов, В.К.

- Жданюк, С.В. Богомолов // Автомобильный транспорт. – 2010. – Вып. 27. – С. 157-162.
11. Богуславский, А.М. Основы реологии асфальтобетона [Текст] / А.М. Богуславский, А.А. Богуславский. – М.: Высшая школа, 1972. – 200 с.
  12. Богуславский, А.М. Теоретические основы деформирования асфальтового бетона [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Богуславский. – М., 1970. – 343 с.
  13. Бушанский, С.П. Проблемы снижения стоимости строительства автомобильных дорог [Текст] / С.П. Бушанский // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – М., 2013. – № 18. – С. 9-15.
  14. Варганов, С.А. Исследование вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей и обоснование выбора их рабочих параметров [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.А. Варганов. – М., 1960. – 15 с.
  15. Варганов, С.А. Теоретические и экспериментальные исследования динамики вибрационных катков [Текст] / С.А. Варганов // Тр. ВНИИСтройдормаш. – М., 1962. – № 28. – С. 55-97.
  16. Вибрационные катки компании Sakai America [Текст] // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 11. – С. 12-14.
  17. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст] / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
  18. Гезенцевей, Л.Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов [Текст] / Л.Б. Гезенцевей. – М.: Стройиздат, 1971. – 256 с.
  19. Головнин, А.А. Виброволновой валец дорожного катка KB-03 [Текст] / А.А. Головнин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2011. – № 3. – С. 38-40.
  20. Головнин, А.А. Виброволновые дорожные катки: Конструкция. Теория и расчет. Опыт применения [Текст]. – Тверь: ТГТУ, 2002. – 76 с.
  21. Головнин, А.А. Сравнение наиболее нагруженных состояний обечайки гибкого и жесткого вальцов дорожного катка [Текст] / А.А. Головнин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 27-33.

22. Горельшев, Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы [Текст] / Н.В. Горельшев. – М.: Можайск–Терра, 1995. – 176 с.
23. Горельшев, Н.В. Исследование асфальтобетона каркасной структуры и его эксплуатационных свойств в дорожных одеждах [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Н.В. Горельшев. – М., 1978. – 444 с.
24. Данильян, Е. А. Исследование устойчивости к расслаиванию щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей и физико-механических свойств ЩМА [Текст] / Е.А. Данильян, С.А. Лисогор, Б.Г. Печеный // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2008. – № 2. – С. 73–75.
25. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке [Текст] / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М: Мир, 1980. – 611 с.
26. Дорожные машины. Теория, конструкция и расчет [Текст] / Под общ. ред. Н.Я. Хархута. – Л.: Машиностроение, 1976. – 472 с.
27. Дорожный асфальтобетон [Текст] / Л.Б. Гезенцевей, Н.В. Горельшев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. Под ред. Л.Б. Гезенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
28. Емельянов, Р.Т. Исследование процесса уплотнения асфальтобетонной смеси по ширине укладки [Текст] / Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, А.С. Климов // Строительные и дорожные машины. – 2009. – № 7. – С. 12-17.
29. Захаренко, А.В. Организация производства работ асфальтоукладчиков и катков ЗАО «Труд» при строительстве автомобильной дороги «Чита – Хабаровск» [Текст] / А.В. Захаренко и др. // Вестник иркутского государственного технического университета. – Иркутск, 2011. – № 1. – С. 80-86.
30. Захаренко, А.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Захаренко. – Омск, 2005. – 320 с.
31. Золотарев, В.А. Битумы, модифицированные полимерами, и асфальтополимербетоны [Текст] / В.А. Золотарев // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 88-95.

32. Золотарев, В.А. Реологическая модель асфальтобетона [Текст] / В.А. Золотарев, В.В. Маляр, Ю.П. Ткачук // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – Т.3. – № 2. – С. 103-107.
33. Золотарев, В.А. Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамических режимах деформирования [Текст] / В.А. Золотарев, В.В. Маляр, А.С. Лапченко // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 1. – С. 10-13.
34. Зубанов, М.П. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей и грунта [Текст] / М.П. Зубанов. – М.: Машиностроение, 1964. – 195 с.
35. Зубанов, М.П. Применение вибрационных механизмов для уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Зубанов // Строительство дорог. – 1938. – № 3. – С. 36-42.
36. Зубков, А.Ф. Исследование параметров вибрационных катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Зубков. – Л., 1974. – 146 с.
37. Зубков, А.Ф. Сопоставление параметров вибрационных и статических катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / А.Ф. Зубков, Н.Я. Хархута // Исследование современных способов и средств уплотнения грунтов и конструктивных слоев дорожных одежд : Тр. СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84. – С. 179-182.
38. Зубков, А.Ф. Технология строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [Текст] / А.Ф. Зубков, В.Г. Однолько. – М.: Машиностроение, 2009. – 224 с.
39. Зубков, А.Ф. Технология устройства покрытий нежесткого типа из асфальтобетонных горячих смесей [Текст] : учеб. пособие / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, Т.И. Любимова. – Тамбов: Изд-во тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 80 с.
40. Иванов, Н.Н. Пути повышения прочности и долговечности черных покрытий [Текст] / Н.Н. Иванов // Строительство дорог, 1947. – № 5. – С. 13-15.

41. Иванов, Н.Н. Пути увеличения долговечности асфальтобетонных покрытий [Текст] / Н.Н. Иванов, Н.В. Горелышев // Автомобильные дороги. – 1964. – № 1. – С. 21-32.
42. Иванченко, С.Н. Исследование влияния вакуумирования на структуру дорожно-строительных материалов при их уплотнении [Текст] / С.Н. Иванченко, С.В. Носов // Исследование рабочих процессов и динамики рабочих машин с регулируемыми параметрами. – Ярославль, 1984. – С. 21-23.
43. Иванченко, С.Н. Напряженно-деформированное состояние материала при уплотнении катком с вакуумным устройством [Текст] / С.Н. Иванченко, А.А. Шестопапов // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1993. – С. 58-64.
44. Иванченко, С.Н. Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С.Н. Иванченко. – СПб., 1997. – 482 с.
45. Иванченко, С.Н. Рабочий процесс и выбор параметров катка с вакуумным устройством [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Иванченко. – Л., 1985. – 16 с.
46. Иванченко, С.Н. Рациональные температурные диапазоны укатки асфальтобетонных дорожных покрытий самоходными катками [Текст] / С.Н. Иванченко // Исследование строительных и дорожных машин. – Ярославль, 1990. – С. 41-46.
47. Иванченко, С.Н. Релаксация напряжений в асфальтобетонных смесях при их уплотнении [Текст] / С.Н. Иванченко // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1993. – С. 101-110.
48. Иванчура, В.И. Идентификация динамической системы процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожными катками [Текст] / В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, О.Г. Клевцова // Журнал Сибирского федерального университета. – 2011. – № 4. – С. 557-566.

49. Ивлиев, М.И. Экономико-статистический анализ дорожной ситуации в Российской Федерации [Текст] / М.И. Ивлиев, Н.В. Черемисина // Социально-экономические явления и процессы. – 2014. – Т. 9. – № 7. – С. 23-31.
50. Иноземцев, А.А. Битумно-минеральные материалы [Текст] / А.А. Иноземцев. – Л.: Стройиздат, 1972. – 152 с.
51. Калужский, Я.А. Теоретические основы укатки дорожных покрытий [Текст] / Я.А. Калужский // Сборник трудов ХАДИ. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1949. – Вып. 8. – С. 55-73.
52. Калужский, Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд [Текст] / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. – М.: Транспорт, 1971. – 160 с.
53. Капустин, М.И. Улучшение ровности покрытий при их уплотнении катками на пневматических шинах [Текст] / М.И. Капустин, Н.Я. Хархута, Е.К. Чабуткин // Автомобильные дороги. – 1977. – № 5. – С. 8-9.
54. Карасева, А.Н. Выбор основных параметров шин катков при уплотнении асфальтобетонных дорожных покрытий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Карасева. – Л., 1983. – 172 с.
55. Катки комбинированного действия [Текст] / С.А. Варганов и др. – М.: ЦНИИТЭстройдормаш, 1974. – 41 с.
56. Кирюхин, Г.Н. Опыт устройства дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона в России [Текст] / Г.Н. Кирюхин // Вестник ХНАДУ. – 2006. – № 34–35. – С. 52–54.
57. Кирюхин, Г.Н. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. – М.: Элит. – 2009. – 176 с.
58. Коваленко, Ю.Я. Влияние параметров вибрационных катков на уплотняемость асфальтобетонных смесей [Текст] / Ю.Я. Коваленко, В.М. Михненко, С.В. Старков // Исследование и испытание строительных машин и оборудования. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 1993. – С. 75-80.

59. Коваленко, Ю.Я. Исследование самоходных вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Ю.Я. Коваленко. – Л., 1979. – 153 с.
60. 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.
61. Костельов, М.П. Инновации для высокого качества дорожных работ и объектов ЗАО «ВАД» [Текст] / М.П. Костельов, В.П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 20-36.
62. Костельов, М.П. Новая усовершенствованная технология устойчиво обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Костельов, В.П. Перевалов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2005. – С. 120-132.
63. Костельов, М.П. Рациональные режимы уплотнения асфальтобетонной смеси [Текст] / М.П. Костельов, Т.Н. Сергеева, Л.М. Посадский // Автомобильные дороги. – 1980. – № 6. – С. 20-22.
64. Костельов, М.П. «Умные виброкатки» для дорожников?! [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2006. – С. 30-44.
65. Костельов, М.П. Уплотнению асфальтобетона требуется обновленное поколение дорожных катков [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2003. – С. 12-22.
66. Костельов М.П. Уплотняющая способность дорожных катков для устройства оснований и покрытий [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2010. – С. 14-25.
67. Костельов, М.П. Устройство асфальтобетонных покрытий в неблагоприятных погодных условиях [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2002. – С. 46-52.

68. Костельов, М.П. Функциональные достоинства и недостатки виброкатков для уплотнения асфальтобетона [Текст] / М.П. Костельов // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2009. – С. 42-52.
69. Костиков, Ю.Б. Методика расчета дорожных одежд с покрытием из искусственных камней мощения [Текст] / Ю.Б. Костиков, А.А. Шестопалов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2013. – Т. 3. – С. 229-240.
70. Кузнецов, П.С. Разработка конструктивной схемы и обоснование параметров асимметричных планетарных вибровозбудителей для дорожных катков [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / П.С. Кузнецов. – Омск, 2008. – 195 с.
71. Кузнецова, А.В. Влияние положения центра тяжести на динамику самоходных вибрационных катков [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Кузнецова. – Тюмень, 2001. – 142 с.
72. Куприянов, Р. В. Исследование температурных режимов и прочностных характеристик щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / Р.В. Куприянов, А.Ф. Зубков, В.И. Леденев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 3. – С. 59–66.
73. Курбатов, А.Е. Определение рациональных геометрических параметров поперечного сечения трамбующих брусьев рабочего органа асфальтоукладчика [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Е. Курбатов. – М., 1995. – 147 с.
74. Леонович, И.И. Применение реологических моделей к расчёту дорожных одежд [Текст] / И.И. Леонович, С.С. Макаревич, А.П. Плащенко. – Минск: Изд-во Белорусского технологического института имени С.М. Кирова, 1971. – 184с.
75. Лихтерова, Н.М. Полимербитумные вяжущие для дорожного строительства на основе гудрона [Текст] / Н.М. Лихтерова, Ю.П. Мирошников, Е.С. Лобанкова // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 6. – С. 31-37.

76. Лобзова, К.Я. Исследование уплотняемости горячих асфальтобетонных смесей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.Я. Лобзова. – М.: 1972. – 27 с.
77. Ложечко, В.П. Исследование рабочего процесса гладковальцового катка с вакуумным балластным устройством [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.П. Ложечко. – Л., 1981. – 15 с.
78. Ложечко, В.П. К вопросу о рациональном режиме уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / В.П. Ложечко, А.Ф. Чебунин // Рукоп. деп. в ЦНИИТЭстроймаш. – Л., 1983. – 12 с.
79. Машины для уплотнения грунтов и дорожно-строительных материалов [Текст] / С.А. Варганов и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
80. Методические указания по разработке норм для определения нормативной себестоимости машиночаса строительных машин [Текст]. – М., 1974. – 129 с.
81. Налимов, В.В. Теория эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 260 с.
82. Нгуен, Л.Х. Прогнозирование вибрации кабины виброкатков с виброизоляторами переменной жесткости [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Л.Х. Нгуен. – Воронеж, 2010. – 155 с.
83. Новожилов, В.В. Микронапряжения в конструкционных материалах [Текст] / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
84. Новожилов, В.В. Разрыхление и построение критерия прочности при сложном нагружении с учетом ползучести [Текст] / В.В. Новожилов, Ю.И. Кадашевич, О.Г. Рыбакина // Труды ЦКТИ. – 1986. – Вып. 230. – С. 34-41.
85. Носарев, А.В. Автомобильные дороги в России [Текст] / А.В. Носарев // Межотраслевой альманах «Деловая слава России». – М.: Славица, 2011. – С. 84-85.
86. Носов, С.В. Разработка технологий уплотнения дорожных асфальтобетонных смесей и грунтов на основе развития их реологии [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Носов. – Воронеж, 2014. – 366 с.

87. Островский, Э.Б. Исследование уплотняющей способности рабочих органов асфальтоукладчиков [Текст] / Э.Б. Островский, В.М. Слепая // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд : Тр. СоюздорНИИ. – М., 1980. – С. 79-84.
88. Островцев, Н.А. Самоходные катки на пневматических шинах [Текст] / Н.А. Островцев. – М.: Машиностроение, 1969. – 104 с.
89. Островцев, Н.А. Эффективность самоходных катков на пневматических шинах [Текст] / Н.А. Островцев, А.И. Путьк // Автомобильные дороги. – 1968. – № 4. – С. 10-14.
90. Пат. 1401097 СССР. Дорожный каток [Текст] / Деникин А.И., Шестопапов А.А., Афанасьева Т.А., Лекомцева Е.Е., Карпова Т.А., Самохин А.А. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина; заявл. 13.06.1986; опубл. 07.06.1988, Бюл. № 21.
91. Пермяков, В.Б. Аналитическое описание процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком [Текст] / В.Б. Пермяков, В.В. Дубков, В.С. Серебренников // Омский научный вестник. – Омск, 2008. – № 1(64). – С. 67-71.
92. Пермяков, В.Б. Исследование релаксации напряжений в асфальтобетонных смесях в процессе их уплотнения [Текст] / В.Б. Пермяков // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 5. – С. 99-102.
93. Пермяков, В.Б. К вопросу о кинетике остывания слоя асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения [Текст] / В.Б. Пермяков, В.В. Дубков // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 6. – С. 102-105.
94. Пермяков, В.Б. Модель уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком [Текст] / В.Б. Пермяков, В.В. Дубков, В.С. Серебренников // Известия высших учебных заведений. – 2008. – № 10. – С. 84-90.
95. Пермяков, В.Б. Обоснование величины контактных давлений для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / В.Б. Пермяков, А.В. Захаренко // Строительные и дорожные машины. – 1989. – № 5. – С. 12-13.

96. Пермяков, В.Б. Совершенствование теории, методов расчёта и конструкций машин для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / В.Б. Пермяков. – Омск, 1992. – 412 с.
97. Пичугин, Е.С. Проблемы формирования региональной программы развития дорожной сети [Текст] / Е.С. Пичугин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 500-506.
98. Повышение эффективности гладковальцовых катков в строительстве [Текст] / Н.Я. Хархута и др. // Повышение эффективности использования машин в строительстве: сб. науч. тр. / ЛПИ. – Л., 1985. – С. 16-27.
99. Попов, Г.Н. Методы расчета параметров строительных и дорожных машин виброударного и ударного действия на основе вычислительного эксперимента [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Г.Н. Попов. – Ярославль, 1986. – 393 с.
100. Пособие по строительству асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов: (к СНиП 3.06.03-85 и СНиП 3.06.06-88) [Текст] / И.А. Плотникова и др. – М.: СоюздорНИИ, 1991. – 161 с.
101. Процуто, С.С. Работать совместно с гладкими металлическими катками [Текст] / С.С. Процуто, Н.Я. Хархута // Автомобильные дороги. – 1970. – № 6. – С. 4-5.
102. Прусов, А.Ю. Выбор рациональных режимов работы вибрационных катков при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.Ю. Прусов. – Ярославль, 2003. – 170 с.
103. Прусов, А.Ю. Определение режимов работы дорожных катков при уплотнении асфальтобетонных покрытий [Текст] / А.Ю. Прусов, Е.К. Чабуткин // Межвузовская региональная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов: тезисы докл. – Ярославль, 1997. – 123 с.
104. Путк, А.И. Обоснование выбора некоторых параметров и режимов работы самоходных катков на пневматических шинах при уплотнении

- асфальтобетона [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / А.И. Путьк. – М., 1967. – 365 с.
105. Путьк, А.И. Пневмоколесные катки. Основы теории и расчета основных параметров и режимов работы [Текст] / А.И. Путьк. – Таллинн: Валгус, 1985. – 144 с.
106. Путьк, А.И. Температурный режим асфальтобетонной смеси при ее уплотнении катками на пневматических шинах [Текст] / А.И. Путьк // Автомобильные дороги. – 1975. – № 3. – С. 8-9.
107. Путьк, А.И. Эффективность некоторых дорожных катков [Текст] / А.И. Путьк // Автомобильные дороги. – 1978. – № 6. – С. 12-13.
108. Радовский, Б.С. Конструирование и расчет дорожных одежд в первой половине XX столетия: ч. 1 [Текст] / Б.С. Радовский // Дорожная техника: каталог-справочник. – СПб.: Славутич, 2013. – С. 96-123.
109. Ритов, М.Н. Методика расчета стоимости машиномен дорожных машин [Текст] / М.Н. Ритов. – М.: Транспорт, 1971. – 88 с.
110. Руденский, А.В. Реологические свойства битумоминеральных материалов [Текст] / А.В. Руденский, И.М. Руденская. – М.: Высшая школа, 1971. – 127 с.
111. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение [Текст] / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
112. Сахаров, П.В. Способы проектирования асфальтобетонных смесей [Текст] / П.В. Сахаров // Транспорт и дороги города. – 1935. – № 12. – С. 17-20.
113. Сергеева, Т.Н. Исследование взаимодействия вальца катка с асфальтобетонным слоем при его уплотнении [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Т. Н. Сергеева. – Л., 1981. – 144 с.
114. Сергеева, Т.Н. К вопросу уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] / Т.Н. Сергеева, А.Я. Башкарев // Исследование современных способов и средств уплотнения грунтов и конструктивных слоев дорожных одежд: Тр. СоюздорНИИ. – М., 1975. – Вып. 84. – С. 124-132.

115. Серебренников, В.С. Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В.С. Серебренников. – Омск, 2008. – 170с.
116. Система управления Asphalt Manager фирмы Bomag [Текст] // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 1. – С. 28-30.
117. Современные модели дорожных виброкатков [Текст] // Строительные и дорожные машины. – 2010. – № 6. – С. 4-7.
118. Технологическое обеспечение качества строительства асфальтобетонных покрытий: методические рекомендации [Текст] / В.Н. Шестаков, В.Б. Пермяков, В.М. Ворожейкин, Г.Б. Старков. – Омск: Омский дом печати, 2004. – 256 с.
119. Угай, С.М. Интенсификация процессов уплотнения асфальтобетонных смесей катками с перфорированными рабочими органами [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / С.М. Угай. – Владивосток, 2008. – 117 с.
120. Уплотнение асфальтобетона с одновременным вакуумированием [Текст] / А.А. Васильев и др. // Автомобильные дороги. – 1980. – № 8. – С. 17-18.
121. Ферри, Д. Вязкоупругие свойства полимеров [Текст] / Д. Ферри. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 535с.
122. Филиппов, Д. Новое поколение катков Дунарас [Текст] / Д. Филиппов // Автомобильные дороги. – 2008. – № 7. – С. 128.
123. Хархута, Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий [Текст] / Н.Я. Хархута // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд : Тр. СоюздорНИИ. – М., 1980. – С. 55-61.
124. Хархута, Н.Я. Выбор типа и режима работы катков при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] / Н.Я. Хархута, А.А. Шестопапов // Автомобильные дороги. – 1986. – № 3. – С. 24-25.
125. Хархута, Н.Я. Оптимизация параметров силового воздействия на слой асфальтобетонной смеси при уплотнении его катками [Текст] / Н.Я. Хархута, Е.Л. Стефанюк // Строительные машины. – Ярославль, 1978. – С. 34-36.

126. Чабуткин, Е.К. Исследование динамики шин самоходных катков [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.К. Чабуткин. – Л., 1978. – 15 с.
127. Чабуткин, Е.К. Методика расчета режима работы вибрационного катка при уплотнении горячих асфальтобетонных смесей [Текст] / Е.К. Чабуткин, И.С. Тюремнов, Ю.Г. Попов // Вестник информационных технологий. – 2012. – № 5. – С. 10-13.
128. Шарифуллина, А.Р. Дорожные покрытия: сравнительный анализ применения и стоимости строительства [Текст] / А.Р. Шарифуллина, А.О. Хромова, К.А. Ключев // Arriogі. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – № 3. – С. 1-8.
129. Шестопалов, А.А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Шестопалов. – М., 1988. – 440 с.
130. Шестопалов, А.А. Основные направления повышения эффективности уплотнения дорожно-строительных материалов [Текст] / А.А. Шестопалов // Тез. докл. Респ. конф. – СПб., 1992. – С. 49.
131. Шестопалов, А.А. Пути улучшения ровности асфальтобетонных покрытий в процессе строительства [Текст] / А.А. Шестопалов, С.В. Старков // Автомобильные дороги. – 1979. – № 11. – С. 12-13.
132. Штромберг, А.А. Экспериментальная проверка способов повышения теплоустойчивости асфальтобетонных смесей [Текст] / А.А. Штромберг, В.Н. Гарманов // Дороги и мосты. – 2013. – Т. 1. – № 29. – С. 243–251.
133. Шубин, С.И. Исследование рабочего процесса катка на пневматических шинах при уплотнении асфальтобетонных смесей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.И. Шубин. – Л., 1981. – 16 с.
134. Щербаков, В.С. Совершенствование системы управления выглаживающей плитой асфальтоукладчика [Текст] / В.С. Щербаков, С.А. Милюшенко. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. – 79 с.

135. A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures [Text] / G. Al-Khateeb et al. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2006. – Vol. 75. – P.1-40.
136. A thermo-viscoelastic–viscoplastic–viscodamage constitutive model for asphaltic materials [Text] / M.K. Darabi et al. // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – Vol. 48. – № 1. – P. 191-207.
137. Abu Abdo, A.M. Sensitivity analysis of a new dynamic modulus ( $|E^*|$ ) model for asphalt mixtures [Text] / A.M. Abu Abdo // Road materials and pavement design. – 2012. – Vol. 13. – № 3. – P. 549-555.
138. Akesson, F. Dynapac compaction analyzer and optimizer [Text] / F. Akesson // Transportation pooled fund. Intelligent compaction systems initial task working group meeting. – 2008. – 20 p.
139. Ammann compaction expert. Intelligent compaction [Text] / Ammann America Inc. – 2006. – 16 p.
140. Andrei, D. Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures [Text] / D. Andrei, M.W. Witczak, M.W. Mirza // Inter-team technical report, NCHRP. Project No. 1-37A. – 1999. – 40 p.
141. Application of artificial neural networks for estimating dynamic modulus of asphalt concrete [Text] / M.S.S. Far et al. // Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – Vol. 2127. – № 1. – P. 173-186.
142. Basic principles of asphalt compaction [Text] / Bomag GmbH. – Hellerwald, 2009. – 59 p.
143. Chailleux, E. A mathematical-based master curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials [Text] / E. Chailleux, G. Ramond, C. de la Roche // Journal of road materials and pavement design. – 2006. – Vol. 7. – P. 75–92.
144. Chilingarian, G.V. Bitumens, asphalts and tar sands [Text] / G.V. Chilingarian. – Elsevier, 2011. – 330 p.

145. Christensen Jr., D.W. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete [Text] / D.W. Christensen Jr., T. Pellingen, R.F. Bonaquist // Journal of the association of asphalt paving technologists. – 2003. – Vol. 72. – P. 97-121.
146. DD-90 & DD-90HF Vibratory asphalt compactors [Text] / Ingersoll Rand Co. – 2005. – 2 p.
147. Elseifi, M.A. Viscoelastic modeling of straight run and modified binders using the matching function approach [Text] / M.A. Elseifi, I. Al-Qadi, G.W. Flinch, J.F. Masson // The international journal of pavement engineering. – 2002. – Vol. 3. – P. 53–61.
148. Field Evaluation of Witczak and Hirsch models for predicting dynamic modulus of hot-mix asphalt (with discussion) [Text] / R. Dongre et al. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2005. – Vol. 74. – P. 381-442.
149. Geske, D.M. Cat expands vibratory compactor line [Text] / D.M. Geske // Diesel progress (North American edition). – 2004. – Vol. 70. – № 9. – P. 78.
150. Guo, N. Dynamic modulus prediction of asphalt mixtures based on micromechanics [Text] / N. Guo, Y. Zhao // Engineering Mechanics. – 2012. – Vol. 10. – P. 13-19.
151. Harran, G. Improving the prediction of the dynamic modulus of fine-graded asphalt concrete mixtures at high temperatures [Text] / G. Harran, A. Shalaby // Canadian journal of civil engineering. – 2009. – Vol. 36. – №2. – P. 180-190.
152. Hirsch, T.J. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cementpaste matrix and aggregate [Text] / T.J. Hirsch // Journal of American concrete institute. – 1962. – Vol. 59. – № 3. – P. 427-452.
153. Hirsch, V. Lernen von den Strassen: Offenporige Asphalt [Text] / V. Hirsch, O.Ripke // Strasse und Autobahn. – 2008. – Vol. 59. – №. 1. – P. 12-19.
154. Hot mix asphalt intelligent compaction – a case study [Text] / Q. Xu et al. // Transportation research board 89th annual meeting. – 2010. – № 10(2213). – 17 p.
155. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction [Text] / F.L. Roberts et al. – 1996. – 603 p.

156. Huan, Q. The Improvement of Vibrator Design of Vibratory Roller [Text] / Q. Huan, J. Liu, C. Liu // Construction Machinery Technology & Management. – 2007. – Vol. 10. – P. 102-103.
157. Jongepier, R. The dynamic shear modulus of bitumens as a function of frequency and temperature [Text] / R. Jongepier, B. Kuilman // Rheologica acta. – 1970. – Vol. 9. – P. 102–111.
158. Kabir, P. Analytical approach to estimate the rheological properties of asphalt binders [Text] / P. Kabir, M.S. Sakhaeifar, D. Newcomb // Transportation Research Record: Journal of the transportation research board. – 2014. – Vol. 2447. – № 1. – P. 51-60.
159. Krishnan, J. M. On the mechanical behavior of asphalt [Text] / J.M. Krishnan, K.R. Rajagopal // Mechanics of materials. – 2005. – Vol. 37. – № 11. – P. 1085-1100.
160. Lee, S. Improving a model for the dynamic modulus of asphalt using the modified harmony search algorithm [Text] / S. Lee, S. Mun // Expert systems with applications. – 2014. – Vol. 41. – № 8. – P. 3856-3860.
161. Li, Y.Y. Comparative Study of Different Form of Asphalt Mixture Viscoelastic Rheological Model [Text] / Y.Y. Li, X.B. Zheng, Z. Yi // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 204. – P. 1773-1776.
162. LTPP computed parameter: dynamic modulus [Text] / Y.R. Kim et al. // Technical report of the U.S. department of transportation. – 2011. – № FHWA-HRT-10-035. – 263 p.
163. Marasteanu, M.O. Improved model for bitumen rheological characterization [Text] / M.O. Marasteanu, D.A. Anderson // Proceeding of the Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders. – 1999. – P. 1-4.
164. Martinez, F. The estimation of the dynamic modulus of asphalt mixtures using artificial neural networks [Text] / F. Martinez, S. Angelone // Proceedings of the 11th international conference on asphalt pavements. – 2010. – P. 1-10.

165. Maupin Jr., G.W. Preliminary field investigation of intelligent compaction of hot-mix asphalt [Text] / G.W. Maupin Jr. // Virginia Transportation Research Council. – 2007. – № VTRC 08-R7. – 18 p.
166. McLeod, N.W. Developments in asphalt pavement compaction by variable tire pressure rollers [Text] / N.W. McLeod // Proceedings of the convention Canadian Good Roads Association. – 1967. – P. 146-181.
167. Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt [Text] / R.C. West et al. – 2010. – 156 p.
168. Nijboer, L.W. Mechanical properties of asphalt materials and structural design of asphalt roads [Text] / L.W. Nijboer, R.C. Herner // Highway research board proceedings. – 1954. – Vol. 33. – P. 185-200.
169. Nijboer, L.W. Study of vibration phenomena in asphaltic road construction [Text] / L.W. Nijboer, C. Van der Poel // Assoc. asphalt paving technol. proc. – 1953. – Vol. 22. – P. 197-231.
170. Noise Analysis of Vibratory Roller [Text] / Y. Yao et al. // Road Machinery & Construction Mechanization. – 2007. – Vol. 7. – P. 23.
171. Pellinen, T.K. Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization [Text] / T.K. Pellinen, M.W. Witczak, R.F. Bonaquist // Geotechnical Special Publication. – 2003. – P. 83-101.
172. Pellinen, T.K. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion) [Text] / T.K. Pellinen, M.W. Witczak // Journal of the association of asphalt paving technologists. – 2002. – Vol. 71. – P. 281-309.
173. Research on oscillatory compaction impact on bridge structure [Text] / D. Yang et al. // Road Machinery & Construction Mechanization. – 2005. – Vol. 6. – P. 19.
174. Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures [Text] / M. Zeng et al. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2001. – Vol. 70. – P. 403-441.
175. Ryan, S. Intelligent compaction overview [Text] / S. Ryan // Proceedings of Idaho asphalt conference. – 2014. – 17 p.

176. Scherocman, J.A. Intelligent compaction, does it exist? [Text] / J.A. Scherocman, S. Rakowski, K. Uchiyama // Proceedings of the annual conference of the Canadian technical asphalt association. – 2007. – Vol. 52. – P. 373-393.
177. Schwartz, C.W. Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model [Text] / C.W. Schwartz // Proceedings of the 84th annual meeting of the transportation research board. – 2005. – № 05-2112. – 37 p.
178. Serafin, P.J. Comparative studies of pneumatic tire rolling [Text] / P.J. Serafin, L.L. Kole // Proceedings of the Association of asphalt paving technologists. – 1962. – Vol. 31. – P. 418-456.
179. Shu, X. Micromechanics-based dynamic modulus prediction of polymeric asphalt concrete mixtures [Text] / X. Shu, B. Huang // Composites part B: Engineering. – 2008. – Vol. 39. – № 4. – P. 704-713.
180. Singh, D. Inclusion of aggregate angularity, texture, and form in estimating dynamic modulus of asphalt mixes [Text] / D. Singh, M. Zaman, S. Commuri // Road materials and pavement design. – 2012. – Vol. 13. – № 2. – P. 327-344.
181. Stastna, J. Fractional complex modulus manifest in asphalt [Text] / J. Stastna, L. Zanzotto, K. Ho // Rheologica acta. – 1994. – Vol. 33. – P. 344–354.
182. Static contact characteristics analysis of wide base tire against hot asphalt pavement [Text] / R.Z. Wu et al. // Applied mechanics and materials. – 2014. – Vol. 587. – P. 1228-1232.
183. Thanh, D.V. Analysis of high temperature stability and water stability of SMA mixture using orthogonal experiments [Text] / D.V. Thanh, C.P. Feng, L.H. Long // International Journal of Civil & Structural Engineering. – 2011. – Vol. 2. – № 2. – P. 635–647.
184. Thanh, D.V. Study on Marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature [Text] / D.V. Thanh, C.P. Feng // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 1337–1341.
185. Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state [Text] / G.R. Chehab et al. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. – 2002. – Vol. 71. – P. 559-593.

186. Tobolsky, A.V. Systems manifesting superposed elastic and viscous behavior [Text] / A.V. Tobolsky, R.D. Andrews // The Journal of Chemical Physics. – 1945. – Vol. 13. – № 1. – P. 3-27.
187. Tran, N.H. Evaluating the predictive equation in determining dynamic moduli of typical asphalt mixtures used in Arkansas [Text] / N.H. Tran, K.D. Hall // Journal of the association of asphalt paving technologists. – 2005. – Vol. 74. – P. 1-17.
188. Ugay, S.M. Pavement roller with perforated operating elements [Text] / S.M. Ugay // World applied sciences journal. – 2013. – Vol. 25. – № 5. – P. 704-709.
189. Ugay, S.M. Statistical research of vibration road rollers and perforated operating devices [Text] / S.M. Ugay, U.U. Kovalenko, N.S. Pogotovkina // World applied sciences journal. – 2013. – Vol. 25. – № 7. – P. 1018-1022.
190. Viscoelastic-plastic model of asphalt-roller interaction [Text] / F. Beainy et al. // International Journal of Geomechanics. – 2013. – Vol. 13. – № 5. – P. 581-594.
191. Wang H. Characterization of the viscoelastic property of asphalt mastic [Text] / H. Wang, P. Hao, Z. You // Pavements and materials: recent advances in design, testing and construction. – 2011. – P. 115–122.
192. Witczak, M.W. Development of a master curve ( $E^*$ ) database for lime modified asphaltic mixtures [Text] / M.W. Witczak, J. Bari // Arizona state university research report. – 2004. – 29 p.
193. Xia, K. Understanding Vibratory Asphalt Compaction by Numerical Simulation [Text] / K. Xia, T. Pan // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2011. – Vol. 4. – P. 185-193.
194. Xu, S. Characteristics of Hamm oscillatory roller [Text] / S. Xu, J. Cui // Road Machinery & Construction Mechanization. – 2006. – Vol. 8. – P. 25.
195. Yen, T.F. Asphaltenes and Asphalts, 2 [Text] / T.F. Yen, G.V. Chilingarian (ed.). – Elsevier, 2000. – 644 p.
196. Zhigang Z. Study of the creep damage properties of asphalt mixture under static load [Text] / Z. Zhigang, F. Lin // Proceeding of the 13th International Conference on Fracture. – 2013. – 10 p.

## Акты внедрения результатов диссертационной работы



р/с 40702810200470005470  
 БИК 044030799  
 Санкт-Петербургский филиал ОАО «Банк Москвы»  
 к/с 30101810600000000799  
 ИНН/КПП 4703037072/783601001  
 ОКВЭД 45.23.1 45.21.1 51.70 52.12  
 ОГРН 1034700554195

192007, Санкт-Петербург  
 ул. Камчатская, дом 12, Лит. А  
 (812) 766-39-69  
 (812) 766-39-72  
 e-mail: office@orionplus-pls.ru

Для предоставления  
 в диссертационный совет

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Кондрашова Никиты Александровича на тему

«Исследование и расчет параметров многофункционального катка для  
 уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий»

ООО «СК «Орион плюс» рассмотрело уточненную методику определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей в процессе укатки, разработанную в ФГАОУ ВО СПбПУ Н.А. Кондрашовым.

Проведенный анализ представленных результатов исследований позволил сделать следующий вывод: положения методики являются актуальными и должны быть учтены при назначении рационального комплекта дорожных катков и установлении режимов их работы.

Генеральный директор  
 ООО «СК «Орион плюс»  
 « 21 » сентября 2015



А.Е. Вихарев



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное автономное**  
**образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Санкт-Петербургский политехнический**  
**университет Петра Великого»**  
**(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)**

**ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,**  
**ОКПО 02068574**

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251  
 Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80  
 E-mail: office@spbstu.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной деятельности

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Е.М. Разинкина



2015 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Кондрашова Никиты Александровича на тему

«Исследование и расчет параметров многофункционального катка

для уплотнения асфальтобетонных дорожных покрытий»

Разработанная Кондрашовым Н.А. уточненная математическая модель процесса взаимодействия рабочих органов дорожных катков с уплотняемым слоем и уточненная методика определения прочностных и деформативных характеристик асфальтобетонных смесей во время укатки внедрены и используются в учебном процессе на кафедре «Транспортные и технологические системы» института Металлургии, машиностроения и транспорта 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».

В частности, результаты диссертационной работы используются в лекционных курсах «Дорожные машины», «Строительные и дорожные машины» в разделах «Машины для уплотнения дорожно-строительных материалов» и «Теория уплотнения горячих асфальтобетонных смесей в дорожном покрытии укаткой». Кроме того, разработанный Кондрашовым Н.А. программный продукт «Unikat» применяется на практических занятиях при выполнении лабораторных работ по теме «Выбор рациональных параметров дорожных катков».

Заведующий кафедрой ТТС

ИММиТ ФГАОУ ВО «СПбПУ»

доктор технических наук, профессор

К.П. Манжула

## Исходный код программы Unikat

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
namespace UNIKAT
{
public partial class Form1 : Form
{
public double P, t_kon, t_cyc, c1, c2, theta2, theta3, pred_proch, m1, h, MassMin;
public double Va, Vbeff, P34, P38, P4, P200, PE0, PEx, Nu, x1, y1, L_AB, psi, R_ekv;
public int n_cyc, i, n_proh, n_krug, Nvalz, uni, k1, k2, k3, k4, i2, Mkat, m2, R, B, Vk, f;
public double L_zahv, Q, Ky_nach, T_nach, h_nach, L_AB_nach, R_nach, Ky_tr;
public double pred_tek = 900000;
public double n = 0.1;
public double m = 0.4;
public double g = 9.81;
public double pi = 3.1415927;
public double modul_osn = 50000000;
public double[] mass1 = new double[10000000];
public double[] mass2 = new double[10000000];
public double[] Temper = new double[10000000];
public double[] modul = new double[10000000];
public double[] Ky_new = new double[10000000];
public double koef_upl()

```

```

{Ky_new[n_proh] = (Ky_nach * h_nach) / h;
return Ky_new[n_proh];}

public double module()
{Nu = Math.Pow(10, 3-Math.Pow(10, (10.92 - 3.676 * Math.Log((1.8 *
Temper[n_proh] + 491.67), 10))));
PEX = 2.151411- 0.3136 * Math.Log(f, 10) - 0.39353 * Math.Log(Nu / 10, 10);
PE0 = 7.588583 + 0.02923 * P200 - 0.00177 * P200 * P200 - 0.00284 * P4 - 0.0581 *
Va / (Math.Pow(Ky_new[n_proh], 8)) - 0.8022 * Vbeff / (Va + Vbeff) + (3.87198 -
0.0021 * P4 + 0.00396 * P38 - 0.000017 * P38 * P38 + 0.00547 * P34) / (1 +
Math.Pow(2.718, PEX));
modul[n_proh] = Math.Pow(10, PE0);
return modul[n_proh];}

public double temperatura()
{switch (n_proh)
{case 0:
Temper[n_proh] = T_nach;
return Temper[n_proh];
default:
Temper[n_proh] = T_nach - n_proh * L_zahv / (Vk * 60);
return Temper[n_proh];}}

public double def()
{double r_def, a0, b0, c0;
switch (i)
{case 1:
r_def = 0;
mass1[i] = r_def;
return mass1[i];
case 2:
r_def = 0;
mass1[i] = r_def;

```

```

return mass1[i];
default:
a0 = (m1 + m2) * g / ((psi * m1 + m2) * h);
b0 = Q / ((psi * m1 + m2) * h);
c0 = L_AB * B / ((psi * m1 + m2) * h);
r_def = 2 * mass1[i - 1] - mass1[i - 2] + a0 * t_cyc * t_cyc + b0 * t_cyc * t_cyc *
Math.Sin(2 * pi * f * t_cyc * (i - 1)) - c0 * t_cyc * t_cyc * mass2[i - 1];
mass1[i] = r_def;
return mass1[i];}}
public double stress()
{ double r_stress;
switch (i)
{ case 1:
r_stress = P;
mass2[i] = r_stress;
return mass2[i];
case 2:
r_stress = P;
mass2[i] = r_stress;
return mass2[i];
default:
r_stress = (1 / (1 + t_cyc * c2 * (n * theta2 + m * theta3))) * (2 * mass2[i - 1] -
mass2[i - 2] + t_cyc * c2 * (n * theta2 + m * theta3) * mass2[i - 1] - t_cyc * t_cyc *
c2 * (mass2[i - 1] - pred_tek) + c1 * (modul[n_proh]+Math.Pow(modul_osn, (1-
h/L_AB))) * t_cyc * (n + m) * (mass1[i] - mass1[i - 1]) / (n * theta3 + m * theta2) +
c1 *(modul[n_proh]+Math.Pow(modul_osn, (1-h/L_AB))) * (mass1[i] - 2 * mass1[i - 1]
+ mass1[i - 2]));
mass2[i] = r_stress;
return mass2[i];}}
public void find_minimum_st()

```

```

{if (mass1[i] < mass1[i + 1])
{MassMin = mass1[i + 1];}}
public void find_minimum()
{if (mass1[i - 1] > mass1[i] && mass1[i] < mass1[i + 1])
{MassMin = mass1[i];}}
public double prohod()
{L_AB = L_AB_nach;
P = g * (m1 + m2) / (B * L_AB);
t_kon = L_AB / Vk;
t_cyc = 1 / (f * 100);
temperatura();
moduleE();
c1 = (n + m) / (n * m);
c2 = 1 / (theta2 * theta3 * n * m);
n_cyc = Convert.ToInt32(Math.Floor(t_kon / t_cyc));
n_krug = Nvalz * n_proh * n_cyc;
for (i = 1 + n_krug; i <= n_cyc + n_krug; i++)
{def();
stress();
if (MixtureType.Text == "Б1")
{pred_proch = 0.75 * (-0.025 * Temper[n_proh] + 2.943 * Ky_new[n_proh] + 0.029 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "ЦЦМА15")
{pred_proch = 0.75 * (-0.021 * Temper[n_proh] + 2.795 * Ky_new[n_proh] + 0.027 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "ЦЦМА20")
{pred_proch = 0.75 * (-0.012 * Temper[n_proh] + 1.968 * Ky_new[n_proh] + 0.026 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "А")
{pred_proch = 2500000;}

```

```

if (mass2[i] >= pred_proch)
{panel3.Visible = false;
panel2.Visible = false;
MessageBox.Show("Ошибка! Уменьшите нагрузку!");
return 1;}}
if (psi == 1)
{for (i = 1; i <= n_cyc + n_krug - 1; i++)
{find_minimum_st();}}
else
{for (i = n_cyc + n_krug - 1; i > n_cyc/2 - 10 + n_krug; i--)
{find_minimum();}}
h = h_nach * (1 - MassMin);
L_AB = 3.14 * R * (Math.Acos((R - h_nach * MassMin) / R)) / 180;
if (Nvalz == 2)
{for (i = n_cyc + 1 + n_krug; i <= 2 * n_cyc + n_krug; i++)
{def();
stress();
if (MixtureType.Text == "Б1")
{pred_proch = 0.75*(-0.025 * Temper[n_proh] + 2.943 * Ky_new[n_proh] + 0.029 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "ЦЦМА15")
{pred_proch = 0.75*(-0.021 * Temper[n_proh] + 2.795 * Ky_new[n_proh] + 0.027 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "ЦЦМА20")
{pred_proch = 0.75*(-0.012 * Temper[n_proh] + 1.968 * Ky_new[n_proh] + 0.026 *
100) * 1000000;}
if (MixtureType.Text == "А")
{pred_proch = 2500000;}
if (mass2[i] >= pred_proch)
{panel3.Visible = false;

```

```

panel2.Visible = false;
MessageBox.Show("Ошибка! Уменьшите нагрузку!");
return 1;}}
if (psi == 1)
{for (i = 1 +n_cyc+n_krug; i <= 2*n_cyc + n_krug - 1; i++)
{find_minimum_st();}}
else
{for (i = 2*n_cyc + n_krug - 1; i >1.5*n_cyc - 10 + n_krug; i--)
{find_minimum();}}
h = h_nach * (1 - MassMin);
L_AB = 3.14 * R * (Math.Acos((R - h_nach * MassMin) / R)) / 180;}
else
{return 0;}
return 0;}
public Form1()
{InitializeComponent();
chart2.Series[0].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
chart1.Series[0].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;}
private void panel1_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{}
private void comboBox1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{}
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{panel2.Visible = true;
label3.Visible = false;
ChastotaVibratsii.Visible = false;
label4.Visible = false;
ZentrebezhnayaSila.Visible = false;

```

```

label20.Visible = false;
ChisloValzov.Visible = false;
label22.Visible = false;
textBox12.Visible = false;
label23.Visible = false;
textBox13.Visible = false;
label24.Visible = false;
textBox14.Visible = false;
label25.Visible = false;
textBox15.Visible = false;
psi = 1;
Nvalz = 1;
L_AB_nach = 0.038;
ChisloValzov.Text = "";
uni = 2;}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{panel2.Visible = false;}

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{panel3.Visible = true;
if (ChisloValzov.Text == "2")
{Nvalz = 2;}
else
if (ChisloValzov.Text == "1")
{Nvalz = 1;}
Mkat= Convert.ToDouble(MassaKatka.Text);
m2 = Convert.ToDouble(MassaValtsa.Text);
R = Convert.ToDouble(RadiusValtsa.Text);
R_nach = Convert.ToDouble(RadiusValtsa.Text);
B = Convert.ToDouble(ShirinaValtsa.Text);
Vk = 1000*(Convert.ToDouble(SkorostKatka.Text))/3600;

```

```
L_zahv = Convert.ToDouble(DlinaZahvatki.Text);}
private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
{panel2.Visible = true;
panel3.Visible = false;}
private void chart1_Click(object sender, EventArgs e)
{}
private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{panel3.Visible = true;
panel4.Visible = false;}
private void chart1_Click_1(object sender, EventArgs e)
{}
private void button9_Click(object sender, EventArgs e)
{panel2.Visible = true;
label3.Visible = true;
ChastotaVibratsii.Visible = true;
label4.Visible = true;
ZentrobezhnayaSila.Visible = true;
label20.Visible = false;
ChisloValzov.Visible = false;
L_AB_nach = 0.032;
uni = 1;}
private void button10_Click(object sender, EventArgs e)
{panel2.Visible = true;
label3.Visible = true;
ChastotaVibratsii.Visible = true;
label4.Visible = true;
ZentrobezhnayaSila.Visible = true;
label20.Visible = true;
ChisloValzov.Visible = true;
label22.Visible = false;
```

```

textBox12.Visible = false;
label23.Visible = false;
textBox13.Visible = false;
label24.Visible = false;
textBox14.Visible = false;
label25.Visible = false;
textBox15.Visible = false;
L_AB_nach = 0.032;
psi = 0.02;
uni = 0;}

private void button50_Click(object sender, EventArgs e)
{panel4.Visible = true;
panel5.Visible = false;
T_nach = Convert.ToDouble(TemperaturaN.Text);
h_nach = 0.01*Convert.ToDouble(Tolschina.Text);
Ky_nach = Convert.ToDouble(KoefficientNach.Text);
Ky_tr = Convert.ToDouble(KoefficientKon.Text);
if (uni == 2)
{f = 1;
Q = 0;}
else
{f = Convert.ToDouble(ChastotaVibratsii.Text);
Q = 1000 * Convert.ToDouble(ZentrobezhnayaSila.Text);}
if (uni == 1)
{button6.Visible = false;}
if (MixtureType.Text == "Б1")
{Va = 4.7;
Vbeff = 10.5;
P34 = 3;
P38 = 30;

```

```
P4 = 50;
P200 = 10;
theta2 = 0.005;
theta3 = 5;}
else
{if (MixtureType.Text == "IIQMA15")
{Va = 2.9;
Vbeff = 9.1;
P34 = 0;
P38 = 50;
P4 = 82;
P200 = 11;
theta2 = 0.005;
theta3 = 5;}
else
{if (MixtureType.Text == "IIQMA20")
{Va = 2.8;
Vbeff = 9.6;
P34 = 3;
P38 = 70;
P4 = 79;
P200 = 11;
theta2 = 0.005;
theta3 = 5;}
else
{if (MixtureType.Text == "A")
{Va = 2.6;
Vbeff = 8.2;
P34 = 2;
P38 = 28;
```

```

P4 = 55;
P200 = 6;
thetha2 = 0.005;
thetha3 = 5;}}}}
private void button6_Click(object sender, EventArgs e)
{panel5.Visible = true;
chart1.Series[0].Points.Clear();
chart2.Series[0].Points.Clear();
for (i = 1; i <= 2 * 10 * n_cyc; i++)
{x1 = 1000 * h_nach * mass1[i];
y1 = 0.000001 * mass2[i];
chart1.Series[0].Points.AddXY(((i - 2) * t_cyc), x1);
chart2.Series[0].Points.AddXY(((i - 2) * t_cyc), y1);}
chart1.DataBind();
chart2.DataBind();}
private void button8_Click(object sender, EventArgs e)
{panel4.Visible = true;
panel5.Visible = false;}
private void button5_Click_1(object sender, EventArgs e)
{for (i = 1; i <=9000000 ; i++)
{mass1[i]=0;
mass2[i]=0;}
h = h_nach;
n_proh = 0;
Ky_new[0] = Ky_nach;
if (uni == 1)
{Nvalz = 2;
thetha2 = 0.1*thetha2;
m1 = Mkat / 4 - m2;
do

```

```

{psi = 1;
Q = 0;
f = 1;
prohod();
if (prohod() == 1)
{break;}
n_proh++;
koef_upl();}
while (Ky_new[n_proh] <= Ky_nach + (Ky_tr - Ky_nach) / 5);
i2 = i;
temperatura();
k1 = n_proh;
Ky_new[n_proh] = Ky_nach + (Ky_tr - Ky_nach) / 5;
m1 = Mkat / 2 - m2;
theta2 = 15*theta2;
for (i = i2; i > i2-2; i--)
{P = g * (m1 + m2) / (B * L_AB);
mass2[i] = P;}
do
{psi = 1;
Q = 0;
f = 1;
R = R_nach;
prohod();
if (prohod() == 1)
{break;}
R_ekv = R + L_AB * L_AB / (8 * MassMin);
R = R_ekv;
prohod();
n_proh++;

```

```

koef_upl();}
while (Ky_nach + (Ky_tr - Ky_nach) / 5 < Ky_new[n_proh] && Ky_new[n_proh] <
Ky_nach + 2 * (Ky_tr - Ky_nach) / 5);
temperatura();
k2 = n_proh-k1;
Ky_new[n_proh] = Ky_nach + 2*(Ky_tr - Ky_nach) / 5;
i2=i;
m1 = Mkat / 2 - m2;
theta2 = 0.8*theta2;
for (i = i2; i > i2-2; i--)
{P = g * (m1 + m2) / (B * L_AB);
mass2[i] = P;}
do
{psi = 0.02;
f = Convert.ToDouble(ChastotaVibratsii.Text);
Q = Convert.ToDouble(ZentrobezhnayaSila.Text);
prohod();
if (prohod() == 1)
{break;}
n_proh++;
koef_upl();}
while (Ky_nach + 2*(Ky_tr - Ky_nach) / 5 < Ky_new[n_proh] && Ky_new[n_proh] <
Ky_tr);
k3 = n_proh-k2-k1;
n_proh = n_proh + 2;
k4 = n_proh - k1 - k2 - k3;}
else
{m1 = Mkat / 2 - m2;
do
{prohod();

```

```
if (prohod() == 1)
{break;}
n_proh++;
koef_upl();}
while (Ky_new[n_proh] < Ky_tr);}
temperatura();
textBox3.Text = Convert.ToString(Math.Round(Temper[n_proh]));
textBox11.Text = Convert.ToString(Math.Round(T_nach - Temper[n_proh]));
textBox9.Text = Convert.ToString(n_proh);
textBox12.Text = Convert.ToString(k1);
textBox13.Text = Convert.ToString(k2);
textBox14.Text = Convert.ToString(k3);
textBox15.Text = Convert.ToString(k4);}
private void panel4_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{}}
```