

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите
Директор ВШТМиМФ
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
_____ А. М. Кривцов
«__» _____ 2024 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГО АСФАЛЬТА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ANSYS

по направлению подготовки
01.03.03 «Механика и математическое моделирование»
профиль
01.03.03_01 Механика и математическое моделирование сред с
микроструктурой

Выполнил
студент гр.5030103/00101

Н. Ю. Еремеева

Руководитель
Доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

Н. В. Михайлова

Консультант
Руководитель группы расчетов нефтегазового
оборудования АО «ЦИФРА»

Д. Г. Васильева

Санкт-Петербург

2024

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А. М. Кривцов

«__»_____20 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Еремеевой Наталье Юрьевне, гр. 5030103/00101

1. Тема работы: Моделирование теплого асфальта в программной среде Ansys
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 10.06.2024
3. Исходные данные по работе: актуальные научные публикации по теме работы, актуальная нормативная документация
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): подготовка геометрической модели, постановка задачи вычисления гомогенизированных свойств материала, вычисление гомогенизированных свойств, калибровка модели, постановка и решение практической задачи с использованием полученных свойств материала
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено
6. Консультанты по работе: Васильева Д. Г., руководитель группы расчётов нефтегазового оборудования АО «ЦИФРА»
7. Дата выдачи задания 28.02.2024

Руководитель ВКР _____ Михайлова Н. В., доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

Задание принял к исполнению 28.02.2024

Студент _____ Еремеева Н. Ю.

РЕФЕРАТ

На 41 с., 24 рисунка, 7 таблиц, 0 приложений

ТЕПЛЫЙ АСФАЛЬТ, ГОМОГЕНИЗИРОВАННЫЕ СВОЙСТВА, ДОРОЖНОЕ ПОКРЫТИЕ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ANSYS, МЕТОД КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ ГОМОГЕНИЗАЦИИ, SASOL, FISCHER TROPSCH

В данной работе рассматривается задача моделирования теплого асфальта, как композиционного материала. В первой главе представлены общие сведения об асфальтобетонных смесях, таких как состав, структура материала, классификация по типу укладки асфальта, содержанию щебня и зернистости. Вторая глава посвящена методам и специфике вычисления гомогенизированных свойств, в ней описана классификация по типам армирования композитов и зависимость вычисления эффективных свойств от типа армирования. Также рассматривается метод конечно-элементной гомогенизации и принцип вычисления гомогенизированных свойств в программном модуле Ansys Material Designer с учетом структуры, граничных условий и физических свойств компонентов материала. В третьей главе описывается поэтапный процесс создания модели для вычисления гомогенизированных свойств материала по заданному составу и сравнение полученных свойств с теоретическими значениями. В четвертой главе рассматривается задача с использованием полученных свойств. В ней рассчитывается напряженно-деформированное состояние слоя асфальта под действием давления четырехосного автопоезда. Также в главе были вычислены перемещения тел, значения максимальных нормальных и эквивалентных напряжений и их соответствие нормативным документам. Результатом работы является проверенный посредством статической задачи материал со свойствами, соответствующими теплomu асфальту.

THE ABSTRACT

On 41 p., 24 pictures, 7 tables, 0 appendixes

KEYWORDS: WARM ASPHALT, HOMOGENIZED PROPERTIES, ROAD COVERING, COMPOSITE MATERIALS WITH INCLUSIONS, COMPOSITE MATERIALS, ANSYS, FINITE ELEMENT HOMOGENIZATION METHOD, SASOL, FISCHER TROPSCH

This work considers the task of modeling warm asphalt as a composite material. The first chapter presents general information about asphalt concrete mixtures, such as composition, material structure, classification by type of asphalt paving, content of crushed stone, and granularity. The second chapter is dedicated to methods and specifics of computing homogenized properties; it describes the classification by types of reinforcement in composites and the dependency of calculating effective properties on the type of reinforcement. It also considers the finite element homogenization method and the principle of computing homogenized properties in the Ansys Material Designer software module, taking into account the structure, boundary conditions, and physical properties of the material components. The third chapter describes the step-by-step process of creating a model for computing the homogenized properties of the material based on the given composition and comparing the obtained properties with theoretical values. The fourth chapter deals with the task using the derived properties. It calculates the stress-strain state of the asphalt layer under the pressure of a four-axle road train. Additionally, the chapter calculated the displacements of bodies, the values of maximum normal and equivalent stresses, and their compliance with regulatory documents. The result of the work is a material verified through a static problem with properties corresponding to warm asphalt.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	8
ГЛАВА 2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ.....	13
2.1. Композиционные материалы	13
2.2. Гомогенизация. Программный модуль Ansys Material Designer.....	14
2.3. Конечно-элементная гомогенизация	18
ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	19
3.1. Общая постановка задачи	19
3.2. Моделирование теплого асфальта	19
3.2.1. Исходные данные	19
3.2.2. Вычисление гомогенизированных свойств вяжущего	20
3.2.3. Вычисление гомогенизированных свойств смеси вяжущего и щебня.....	23
3.2.4. Вычисление гомогенизированных свойств смеси вяжущего и песка	25
3.2.5. Вычисление гомогенизированных свойств теплого асфальта	27
3.2.6. Выводы.....	29
ГЛАВА 4. ЗАДАЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУЧЕННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА.....	30
4.1. Постановка задачи и исходные данные.....	30
4.2. Создание сетки.....	31
4.3. Задание граничных условий.....	32
4.4. Результаты	34

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	38

ВВЕДЕНИЕ

Дорожное строительство – сфера, играющая важную роль в развитии любой страны, в том числе и Российской Федерации. От качества дороги зависит многое: комфорт и безопасность передвижения, развитие туризма, скорость грузовых перевозок и многое другое, вследствие этого исследования в сфере дорожного строительства являются актуальной темой, особенно в связи с бурным развитием технологий в этой области. С первых дней производства асфальта промышленность продолжала внедрять новые продукты, становясь все более научной и строгой. В последние годы в дорожной отрасли произошел значительный прогресс, особенно в разработке новых материалов, добавок [17] и технологий, используемых на этапе проведения ремонтных работ или непосредственном создании и производстве материала. Эксперты отрасли работают над созданием различных рецептов асфальтовых покрытий, которые позволят использовать их при различных температурах и климатических условиях.

Одним из важных обновлений стало создание асфальта с теплыми смесями (WMA). Этот материал стал инновационным решением в сфере дорожного строительства. Теплый асфальт – уникальный по составу материал [19], обладающий множеством выдающихся преимуществ по сравнению с традиционным горячим асфальтом, наиболее популярным в России [18]. Асфальт – это композиционный материал, состоящий из различных компонентов, включая битум и агрегаты, которые вместе формируют сложную структуру.

Однако для понимания специфики материала и наиболее эффективного применения теплого асфальта в дорожной отрасли важно знать свойства, структуру и характер взаимодействия между компонентами смеси на каждом этапе дорожных работ.

В данном исследовании проводится детальный анализ и расчет основных свойств теплого асфальта, включая физические свойства такие, как модуль Юнга, плотность, коэффициент теплового линейного расширения,

коэффициент Пуассона, а также рассмотрим задачу с использованием свойств полученного материала. Особое внимание в нашем исследовании уделено процессу гомогенизации, который играет ключевую роль в определении свойств теплого асфальта.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Прежде всего, асфальтобетонная смесь — это многокомпонентная дисперсная система с пространственной сетчатой структурой, состоящая из заполнителя и связующего вещества. Состав смеси напрямую влияет на конечные свойства материала: некоторые смеси предназначены для заполнения основного дорожного полотна, по которым ездят автомобили, другие предназначены для пешеходов или авиационной техники.

В подавляющем числе случаев асфальт состоит из щебня, песка и вяжущего вещества, как правило, его роль играет битум с минеральным порошком [3]. Составляющими асфальтобетонной смеси могут быть и другие компоненты, в зависимости от того, какими характеристиками должно обладать покрытие, каково его назначение или же погодных условий и особенностей региона, в котором планируют использовать материал. Исходя из этого для каждой смеси состав в процентном отношении рассчитывается в индивидуальном порядке — ради получения подходящего материала для конкретной дороги, а само использование покрытия зависит от его физических и химических свойств.

Поскольку асфальт представляет собой материал со сложной структурой, его разделяют на типы по различным признакам. Приведем несколько классификации асфальта, которые в дальнейшем понадобятся для составления модели теплого асфальта:

- По особенностям укладки
- По зернистости
- По типу (содержанию щебня)

По особенностям укладки выделяются следующие виды материала. Классификация представлена на рисунке 1.

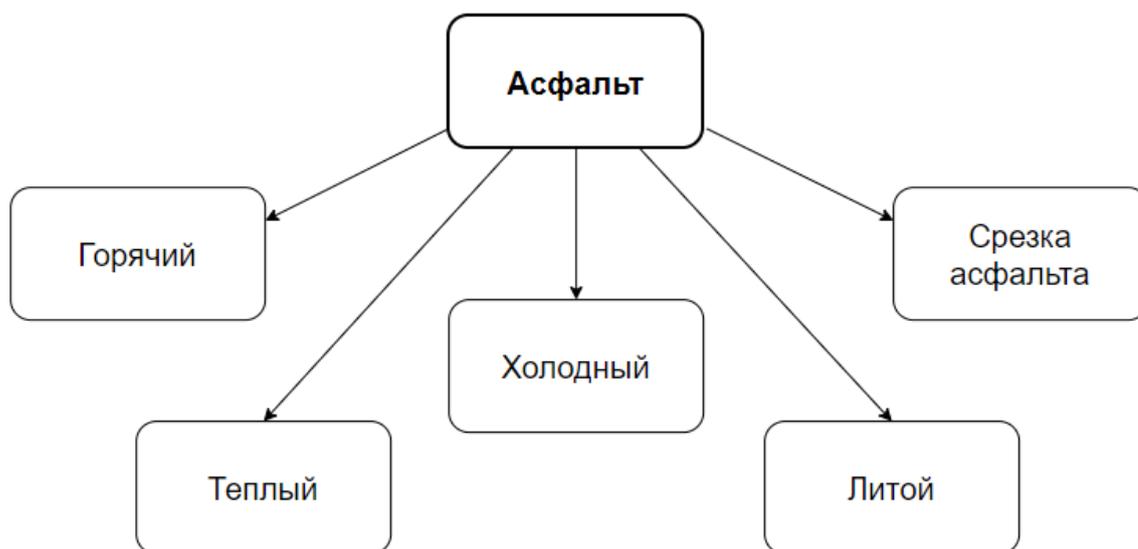


Рисунок 1 - Классификация асфальтобетонов по особенностям укладки

В данной работе речь пойдет об теплом асфальте (WMA). Однако прежде стоит ознакомиться с остальными видами асфальта данной классификации. Горячий асфальт — это асфальтобетон, состоящий из минерального заполнителя и вязкого битума, причем битуму соответствует меньшая доля, а заполнителю – большая [9]. Данная смесь укладывается при нагреве до температуры свыше 100°C. Горячий асфальт очень популярен, во многом, благодаря своим высоким качественным характеристикам. Горячая смесь имеет самую широкую сферу применения и пригодна для широкого спектра задач. Тем не менее горячий асфальт хуже всего влияет на экологию и требует специального оборудования для укладки.

В противовес горячему асфальту обычно предлагается холодный асфальт. Он изготавливается из щебня или песка, смешанного с жидкими битумами. Он не требует высоких температур при укладке, наличия специальной техники и навыков. Холодная смесь может использоваться при отрицательной температуре воздуха (до -5 - 15°C) и легко подвержена транспортировке. Недостатком такого материала является его слабая износостойкость и хрупкость, поэтому обычно его используют для ямочного ремонта или благоустройства территории.

Основной компонент в литого (мастичного) асфальта [7] – смесь битума с минеральным порошком, но в отличие от остальных вариантов асфальта в литом асфальте содержание щебня достаточно низкое. При укладке материал необходимо разогреть очень высокой температуры порядка 190 - 250°C. По итогу нагрева имеем пластичную и прочную массу, которая легко распределяется по поверхности и не требует дополнительного уплотнения. В последствии застывший литой асфальтобетон образует монолитное, качественное и водонепроницаемое покрытие. Но у мастичного асфальта есть существенный недостаток – это его высокая стоимость, поэтому несмотря на хорошие характеристики материал до сих пор не очень популярен и используется только в некоторых отраслях.

Еще один вариант смеси - срезка асфальта, иначе говоря, асфальтовая крошка или вторичный асфальт. Фактически срезка асфальт – это повторное использование одного из составов, описанных выше. Возможно, это благодаря тому, что асфальтобетон не имеет срока годности, поэтому старые покрытия можно снимать, измельчать и использовать заново. Такой материал стоит дешево и поэтому пользуется популярностью у владельцев частных домов. При укладке асфальтовую крошку разогревают или смачивают битумом и используют уже повторно в простых работах типа укладки пола в гараже или хозяйственной постройке.

В данной исследовании направлено на изучение теплого асфальта (WMA), поэтому рассмотрим его подробнее. Такой асфальтобетон производится путем вспенивания битума или добавления пластифицирующих добавок в горячий асфальт. В качестве добавок могут выступать водосодержащие минералы, химикаты, воски и органические добавки или комбинация технологий. В результате получается смесь, которая по свойствам идентична горячей, но может укладываться при более низких температурах – от 70-80°C.

Кроме того, у теплого асфальта множество плюсов: теплый асфальт производится при более низких температурах, что снижает количество

вредных выбросов в атмосферу [6], поэтому работа с теплой смесью более экологична и комфортна, чем с горячей смесью и не так пагубно влияет на здоровье. Видимые выбросы и запахи снижаются как на заводе, так и на площадке для укладки. В зависимости от температуры производства сообщалось о снижении выбросов углекислого газа и других веществ в процессе производства на 15%–70%. Также преимуществом производства WMA является снижение энергопотребления, необходимого для нагрева. Заявленное снижение расхода топлива обычно составляет 20%–35%, а для некоторых технологий - до 50 процентов. Особенность теплого асфальта также благоприятно влияет на транзит смеси, так как асфальт сохраняет свою работоспособность при более низких температурах, что позволяет увеличить время на транспортировку, укладку и уплотнений. Низкая температура производства снижает старение битума на стадии производства, что повышает стойкость смеси к термическому и усталостному растрескиванию, тем самым увеличивая срок службы дорожного покрытия. Процесс производства также влияет на характеристики асфальтобетона: вспененное вяжущее увеличивает прочность сдвига и уменьшает влагопроницаемость гранулированных материалов.

Чтобы вычислить свойства асфальта необходимо изучить его состав, перейдем к классификациям смеси по зернистости и содержанию щебня. Зернистость – это параметр обозначающий максимальный размер зерен, которые входят в состав асфальтобетонной смеси. Выделяется три разновидности материала:

- Крупнозернистый – диаметр частиц меньше 40 мм
- Мелкозернистый – диаметр частиц меньше 20 мм
- Песчаный – диаметр частиц меньше 5 мм

В работе был рассмотрен мелкозернистый материал с зернами до 16,5 мм в диаметре. Размеры зерен песка лежат в диапазоне от 0,25–2 мм, а щебня от 1,5–16,5 мм. Ниже представлена таблица рекомендуемых зерновых составов минеральной части теплых асфальтобетонных смесей [10]. В

дорожной промышленности отбора зерен определенных размеров щебень пропускают через сито, обычно изготовленное из стальной сетки или аналогичного материала.

Таблица 1 – Рекомендуемые зерновые составы минеральной части теплых асфальтобетонных смесей [10]

Вид и тип смесей	Количество частиц, %, мельче данного размера, мм									
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Теплые типов:	Непрерывные зерновые составы									
А	90-100	75-100	62-100	40-50	28-38	20-28	14-20	10-16	6-12	4-10
Б	90-100	80-100	70-100	50-60	38-48	28-37	20-28	14-22	10-16	6-12
В	90-100	85-100	75-100	60-70	48-60	37-50	28-40	20-30	13-20	8-14
Г	-	-	100	70-100	65-82	45-65	30-50	20-36	15-25	8-16
Д	-	-	100	70-100	60-93	45-85	30-75	20-55	15-33	10-16
Теплые типов:	Прерывистые зерновые составы									
А	90-100	75-100	62-100	40-50	28-50	20-50	14-50	10-28	6-16	4-10
Б	90-100	80-100	70-100	50-60	38-60	28-60	20-60	14-34	10-20	6-12
	Зерновые составы									
ЩМА-10	-	-	90-100	30-40	19-29	16-26	13-22	11-20	10-17	10-15
ЩМА-15	-	90-100	40-60	25-35	18-28	15-25	12-22	10-20	9-16	9-14
ЩМА-20	90-100	50-70	25-42	20-30	15-25	13-24	11-21	9-19	8-15	8-13

В зависимости от доли щебня выделяют 5 типов смесей. Данные типы представлены на рисунке 2.

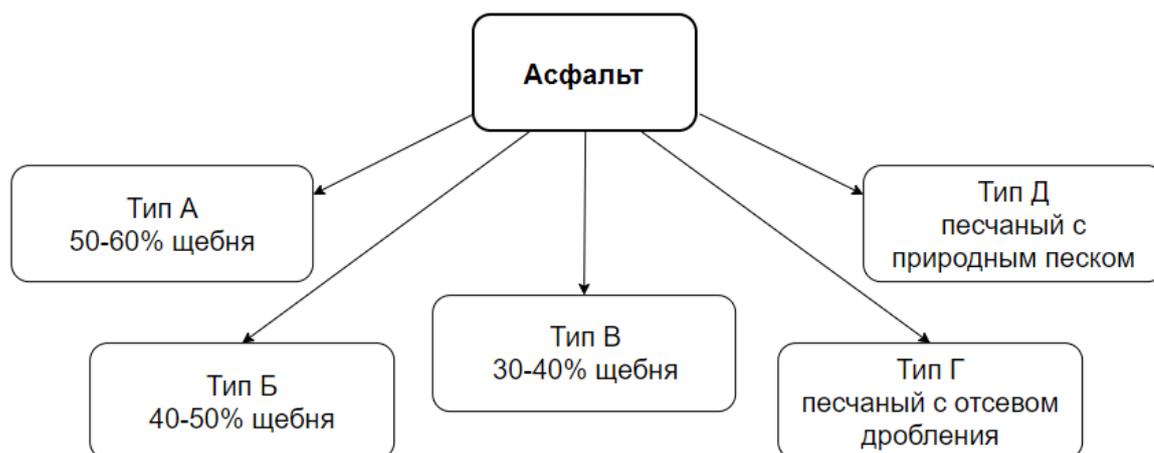


Рисунок 2 - Классификация асфальтобетонов по содержанию щебня

Щебень повышает прочностные свойства материала, а также устойчивость к деформациям. В связи с этим, для покрытий, которые постоянно подвержены нагрузкам, необходимо иметь в составе больше 25% щебня. Таким образом асфальт должен быть типа А или Б, как в крайнем случае - типа В

ГЛАВА 2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ

2.1. Композиционные материалы

Для нахождения свойств теплого асфальта недостаточно его рассмотрения в качестве смеси для дорожного покрытия, необходимо рассмотреть его как материал со сложной структурой, в особенности композиционной. Композиты — это материалы, представляющие собой объёмное сочетание отдельных тел-компонентов. Как правило, композиты состоят из матрицы (связующего) и равномерно распределённых в ней упрочнителей и армирующих наполнителей. Так как материал не равномерен и состоит из разного вида включений, то итоговые физико-механические свойства композита напрямую зависят от свойств его компонентов и структуры материала [16]. Композитные материалы можно классифицировать по типу армирования матричного материала.

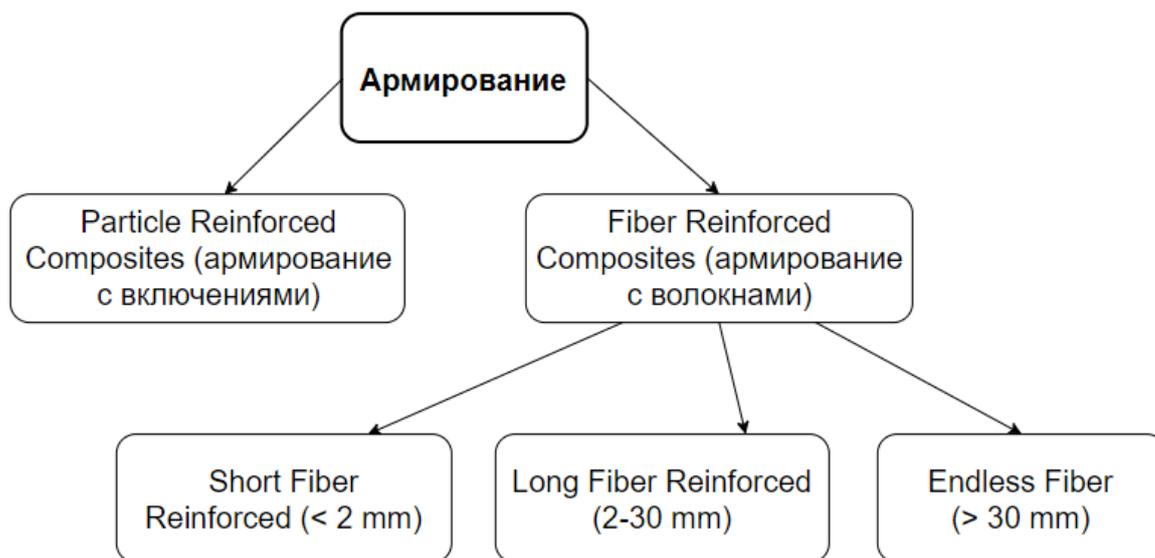


Рисунок 3 - Классификация композитов по типу армирования матричного материала

Композиты, армированные включениями, состоят из частиц одного материала, распределенных в матрице второго материала. Частицы могут иметь любую форму или размер, но обычно они имеют сферическую, эллипсоидную, многогранную или неправильную форму.

2.2. Гомогенизация. Программный модуль Ansys Material Designer

Композиты с включениями должны изучаться с помощью схем гомогенизации, поскольку невозможно напрямую детально смоделировать взаимодействие между случайно или аperiodически распределенными армирующими элементами и механизмами передачи нагрузки. В рамках упомянутой темы можем воспользоваться следующим определением гомогенизации [8]. Гомогенизация — это процесс, при котором асфальтовая смесь становится равномерной и однородной, что влияет на ее прочность и долговечность. Мы исследуем, как гомогенизация влияет на свойства теплого асфальта и как она может быть оптимизирована для достижения лучших результатов.

Для вычисления гомогенизированных свойств материала был использован специальный модуль программной среды Ansys – Material Designer. Material Designer позволяет моделировать и проводить анализ микроструктуры материалов, вычислять их гомогенизированные свойства для элемента представительного объема (RVE). Элемент представительного (репрезентативного) объема (RVE) – это наименьший объем, в котором производится измерение, дающее значения аналогичные для всей структуры в целом. Модуль используется для моделирования композитов, а также для ячеистых структур (аддитивное производство).

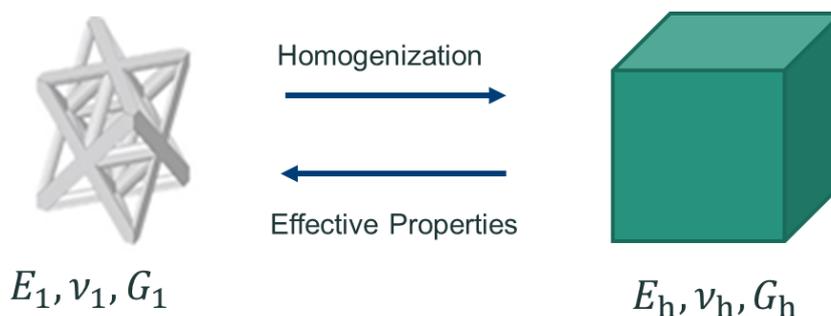


Рисунок 4 - Переход от периодического элемента сложной структуры материала к элементу представительного объема

Блок Material Designer имеет ряд преимуществ: при использовании модуля нет необходимости для проведения экспериментальных испытаний, которые обычно используются для нахождения точных свойств и могут быть дорогими и трудоемкими. Material Designer в большинстве случаев работает с заранее заготовленными RVE, поэтому знания структуры композитных материалов и свойств базовых материалов достаточно, чтобы узнать глобальные свойства материала. Кроме того, модуль имеет более точный подход, поскольку он основан на конечно-элементном анализе микроструктуры.

Предметом рассмотрения в данной работе будут модели анизотропных композиционных материалов, имеющих ячеистые структуры, для которых в рамках Material Designer внесены следующие допущения:

- Изготовлены из одного изотропного линейно-упругого материала
- Периодические
- Состоят из цилиндрических ферм

Вычисление свойств в модуле Material Designer происходит в соответствии с законом Гука. Закон Гука описывает связь между деформацией и напряжением в упругом материале [2] и в случае анизотропных материалов тензор жесткости в законе имеет более сложный вид. Анизотропным материалом называется материал, свойства которого меняются в зависимости от его ориентации. Так, жесткость изотропного материала (свойства одинаковы по всем направлениям) описывается двумя свойствами: модулем упругости и коэффициентом Пуассона, тогда для анизотропного материала потребуется до 21 свойства. Для описания поведения анизотропного материала в условиях малых деформаций закон Гука может быть расширен с использованием тензоров напряжений и деформаций.

Рассмотрим закон Гука для анизотропных материалов:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}, \quad \sigma_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \quad [S] = [D]^{-1}$$

Где S_{ijkl} – константы податливости, D_{ijkl} – константы жесткости. В самом общем случае рассматривается 81 такая константа. Однако, используя симметрию можем перейти от четырех индексов к двум, получив тем самым 36 независимых компонент.

С учетом вышесказанного, предварительно заданных граничных условий, а также допущений, принятых в программном модуле для анизотропных материалов, Material Designer из определяющего уравнения получает свойства материала: модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & 0 & 0 \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & 0 \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \{\varepsilon\} = [S] \cdot \{\sigma\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}$$

где σ_{ij} – напряжения, D_{ij} – жесткость, ε_{ij} – деформации, E_i – модуль Юнга, ν_{ij} – коэффициент Пуассона, G_{ij} – модуль сдвига.

Если материал меняет свои свойства под воздействием температуры, то предварительно задав коэффициент теплового расширения для материалов, используемых в модели, с помощью Material Designer можно получить данный коэффициент для итогового материала.

2.3. Конечно-элементная гомогенизация

Метод конечно-элементной гомогенизации — это численный подход, используемый для анализа материалов с комплексной микроструктурой. Идеей метода является усреднение микроскопических свойства материала для получения его эффективных макроскопических свойств. Это позволяет упростить расчеты и сделать их более управляемыми на макроуровне, сохраняя при этом точность в описании поведения материала.

Цель вычислительной гомогенизации состоит в том, чтобы создать виртуальную модель гетерогенного материала, макроскопические свойства которого могут быть оценены численно. Гомогенизированный материал — это материал, в котором удалось добиться однородного распределения свойств на макроскопическом уровне, несмотря на возможное наличие микроскопических неоднородностей. В свою очередь, гетерогенный материал состоит из различных компонентов, которые могут значительно отличаться по своим физическим или химическим свойствам. Такие компоненты характеризуются наличием фаз, включений или пор, которые влияют на их макроскопические свойства. Эффективные свойства гомогенизированного материала принимаются соответствующими трансверсально изотропному упругому материалу, для которого закон Гука может быть записан в виде:

$$\{\varepsilon\} = [C] \cdot \{\sigma\}$$

где $\varepsilon = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dV$ — тензор деформации, $\sigma = \frac{1}{V} \int_V \sigma dV$ — тензор напряжений (V — вышеупомянутый элемент представительного объема). C — эффективный тензор упругих податливостей 4-го ранга.

Таким образом, появляется возможность избежать явного описания всех неоднородностей материала на структурном уровне. Это может привести к существенной экономии времени и затрат на экспериментальные испытания и производство. И несмотря на то, что были предложены аналитические оценки гомогенизированных свойств композитов, вычислительная гомогенизация призвана обеспечить более широкую основу для прогнозирования эффективные свойства материалов с меньшими ограничениями на морфологию микроструктуры и локальные явления [4].

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

3.1. Общая постановка задачи

Требуется произвести расчет гомогенизированных свойств композитного материала на основе модели теплого асфальта в программной среде ANSYS с использованием модуля Material Designer, сравнить полученные свойства с реальными свойствами асфальта. Также необходимо постановить и решить практическую задачу с использованием полученных свойств материала.

3.2. Моделирование теплого асфальта. Вычисление гомогенизированных свойств

3.2.1. Исходные данные

В ходе работы реализовывалась модель мелкозернистого (с зернами до 16,5 мм в диаметре) теплого асфальта типа А. Для составления модели использовались следующие материалы: гранитный щебень, песок, битум 60/90 (60–90 – это интервал допустимого изменения условий твердости битума, т. е. пределы изменения показателей пенетрации) и химическая добавка Fischer-Tropsch Hard Wax от немецкой компании Sasol. Свойства данных материалов приведены в таблице 1. Щебень составил 55,16% от всей смеси, песок 32,74%, битум и химическая добавка – 9,07% и 3,03% соответственно.

Таблица 2 – Свойства материалов

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 [^] (-5), С ^{^-} 1	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Fischer Tropsch	1,82	1,89	3,10	0,39
Битум 60/90	1,60	6,50	4,50	0,22
Гранитный щебень	2,60	0,26	10,00	0,25
Песок	2,50	0,12	15,90	0,33

Компания Sasol разрабатывает широкий спектр органических и неорганических химикатов. Они безопасно и устойчиво добывают, производят и реализуют ряд высококачественных продуктов в 22 странах. Их продукты используются в процессе производства многих повседневных предметов, которые приносят пользу миллионам людей по всему миру.

Добавка Fischer Tropesch (FT) - популярный модификатор асфальтобетонных смесей (WMA), является видом химического воска. В области производства асфальта FT используется как добавка, которая улучшает свойства асфальта [15], снижая температуру строительства и укладки. Это помогает улучшить вязкость асфальтового связующего и значительно улучшить его высокотемпературные характеристики. Добавка производится из природного газа и воздуха с использованием процесса Фишера-Тропша [14]. Процесс Фишера-Тропша — это набор химических реакций, которые реконструируют смесь угарного газа (CO) и водорода (H_2), известную как синтез-газ, в жидкие углеводороды. Этот процесс преобразует эти газы в синтетическое смазочное масло и синтетическое топливо.

3.2.2. Вычисление гомогенизированных свойств вяжущего

Асфальтобетонное вяжущее — это материал, который удерживает заполнители вместе для образования дорожного покрытия. Как правило, асфальтобетонное вяжущее представляет собой липкое вещество от темно-коричневого до черного цвета, образующееся на нефтеперерабатывающих заводах при переработке нефти. При нагревании оно становится жидким, а при охлаждении затвердевает. Асфальтобетонное вяжущее составляет до 12% от массы дорожной смеси.

В качестве вяжущего рассматривается смесь битума и химической добавки Fischer Tropesch. В смеси битум и химическая добавка относятся как 3:1. Предварительную модель для расчета гомогенизированных свойств вяжущего представлена на рисунке 5.

На рисунке 5 нижнему слою присвоены свойства химической добавки, верхнему слою – свойства битума.

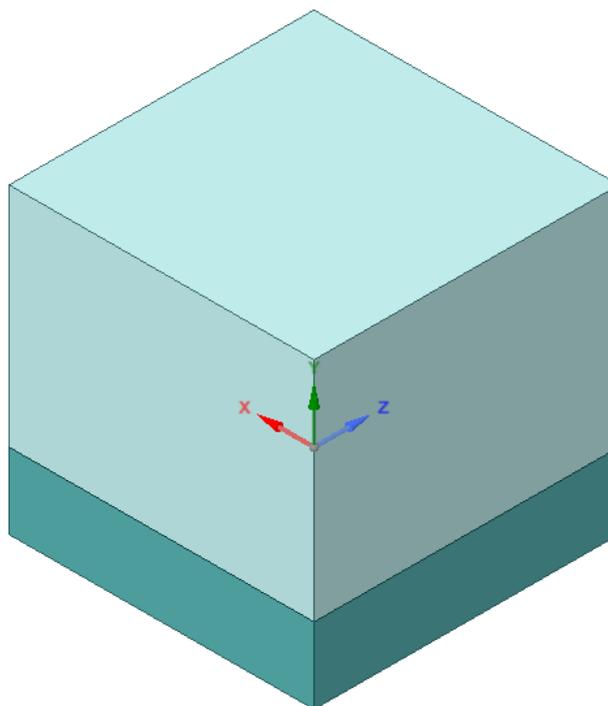


Рисунок 5 – Предварительная модель для расчета вяжущего

В модуле Material Designer расчет происходит по каждой из трёх осей. Вследствие чего, данная модель не подходит для расчета гомогенизированных свойств, так как только в одном из направлений (ось Y) встречается композиция и битума и химической добавки. В свою очередь в остальных направлениях (оси X и Z) в зависимости от координаты рассматриваться только один из заданных материалов, а не их смешение.

Усложним модель таким образом, чтобы по каждому из направлений рассматривалась композиция материалов и их соотношение не изменилось. Для этого сделаем композицию из 8 кубиков, каждый из которых повторяет предварительный вариант модели. Полученная геометрия представлена на рисунке 6. Серым цветом обозначена химическая добавка, зеленым – битум 60/90.

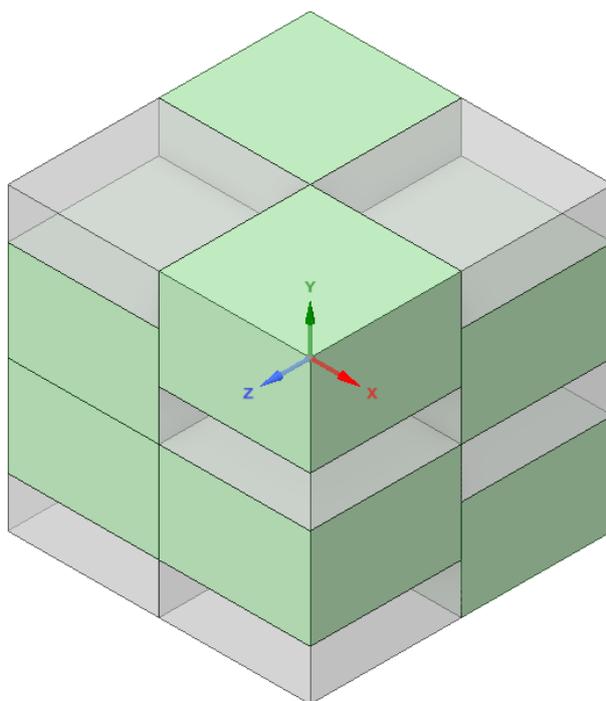


Рисунок 6 – Модель для расчета гомогенизированных свойств вяжущего

Для расчета используется конформная блочная сетка, так как модель имеет общую топологию. Максимальный размер элемента 1,5 мм. Полученная сетка представлена на рисунке 7.

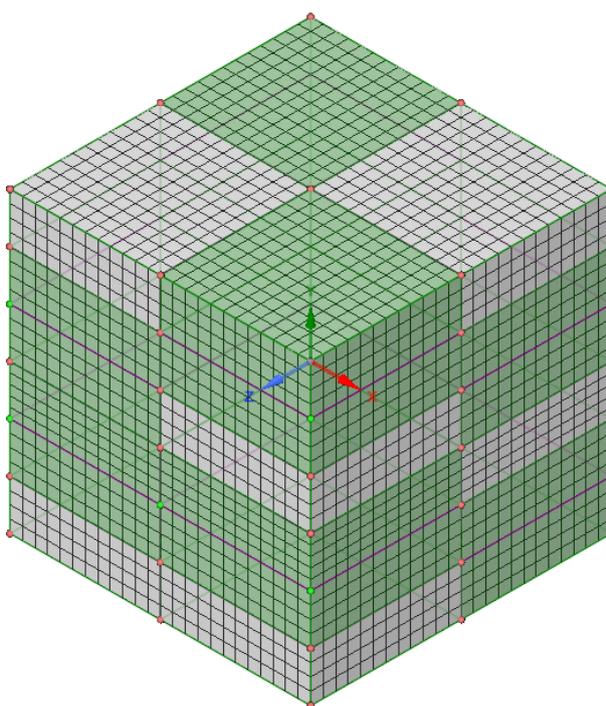


Рисунок 7 – Сетка для расчета гомогенизированных свойств вяжущего

Будем искать модули упругости, коэффициент Пуассон, плотность и коэффициент температурного расширения при температуре 20°C. Для уменьшения времени вычислений будем учитывать симметрию. Получим следующие свойства вяжущего:

Таблица 3 – Свойства вяжущего

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁵ , С ⁻¹	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Вяжущее	1,67	4,06	1,81	0,27

3.2.3. Вычисление гомогенизированных свойств смеси вяжущего и щебня

Заполнители представляют собой гранулированный материал, используемый в асфальтобетонных смесях, и обеспечивают большую часть несущих характеристик смеси. Это твердые, инертные минеральные материалы, такие как щебень, гравий и песок. Заполнители составляют 85%–95% дорожной смеси по весу. В данном исследовании в качестве заполнителей взяты гранитный щебень и песок.

Для создания геометрии воспользуемся одной из моделей представительного объема уже входящих, в программный модуль Material Designer – Random Particle. Среди всех моделей Material Designer, данная модель лучше всех описывает асфальт на этапе изготовления. В модели были заданы следующие параметры:

- Particle Volume Fraction = 0,81 (объемная доля включений)
- Diameter Distribution: Log-Normal (распределение по диаметру)
- Mean Particle Diameter = 9 мм (средний диаметр частиц)
- Std. Dev. Particle Diameter = 7,5 мм (стандартное отклонение от диаметра частицы)
- Size ratio = 1,5 (соотношение размеров)

На рисунке 8 представлена модель для расчета свойств смеси вяжущего и щебня. Вяжущее выступает в роли «заливки» - светло-зеленый цвет на рисунке, остальными цветами представлены включения из щебня. Щебень и вяжущее относятся как 41 к 9 соответственно.

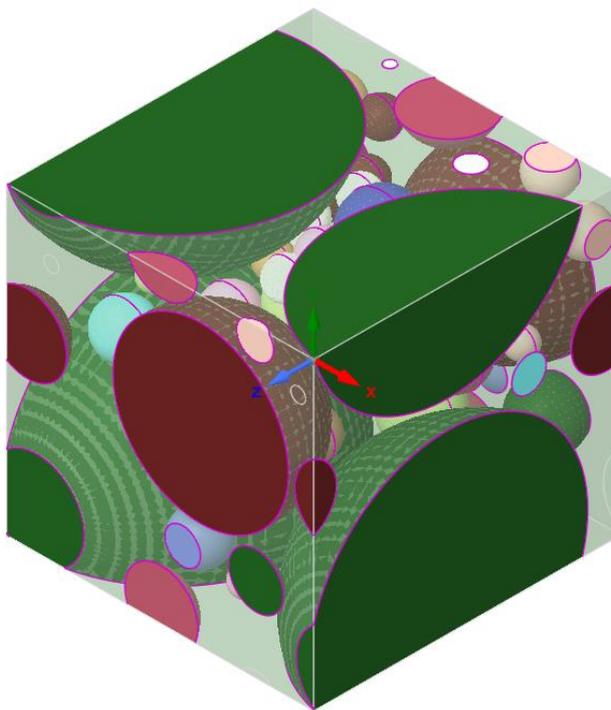


Рисунок 8 – Модель для расчета гомогенизированных свойств смеси вяжущего и щебня

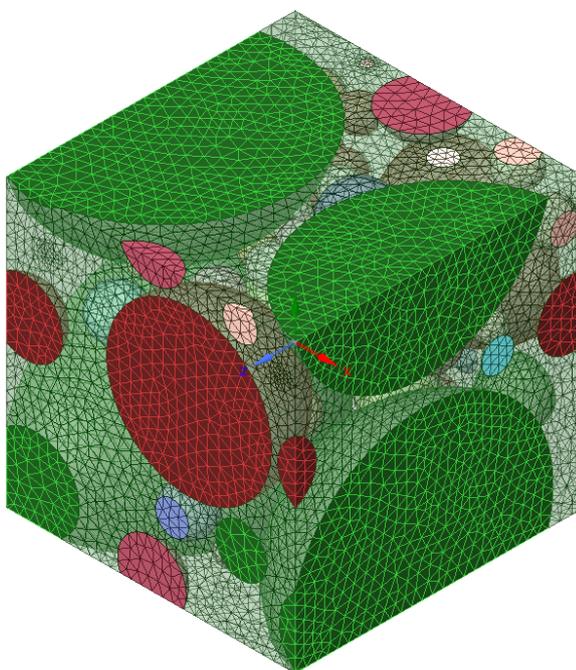


Рисунок 8 – Сетка для расчета гомогенизированных свойств смеси вяжущего и щебня

Построена конформная сетка с максимальным размером элемента – 0,5 мм. Задав параметры вычисления, получим гомогенизированные свойства для рассматриваемой смеси – Таблица 3.

Таблица 4 – Свойства для смеси вяжущего и щебня

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 ^{⁻⁵} , С ^{⁻¹}	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Вяжущее&Щебень	2,23	1,28	7,38	0,22

3.2.4. Вычисление гомогенизированных свойств смеси вяжущего и песка

В качестве еще одного заполнителя бы выбран песок. Рассмотрим аналогичным образом модель и вычисление гомогенизированных свойств для смеси песка и вяжущего. Будем использовать модель представительного объема Random Particle. Параметры модели:

- Particle Volume Fraction = 0,73 (объемная доля включений)
- Diameter Distribution: Uniform (распределение по диаметру)
- Min Particle Diameter = 0,25 мм (минимальный диаметр частиц)
- Max Particle Diameter = 2,5 мм (максимальный диаметр частицы)
- Size ratio = 1,8 (соотношение размеров)

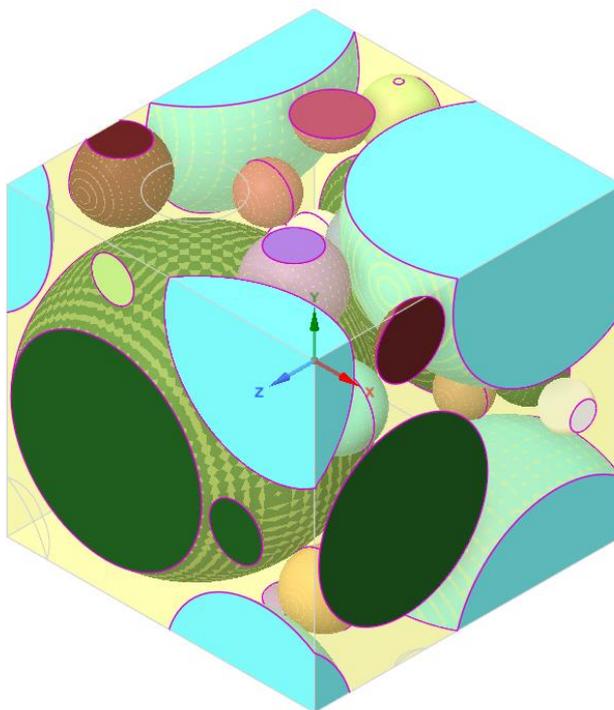


Рисунок 9 – Модель для расчета гомогенизированных свойств смеси вяжущего и песка

На рисунке 9: матрица светло-жёлтого цвета – вяжущее, включения – песок. Песок и вяжущее относятся как 73:23. Построим сетку с максимальным размером элемента 0,1 мм.

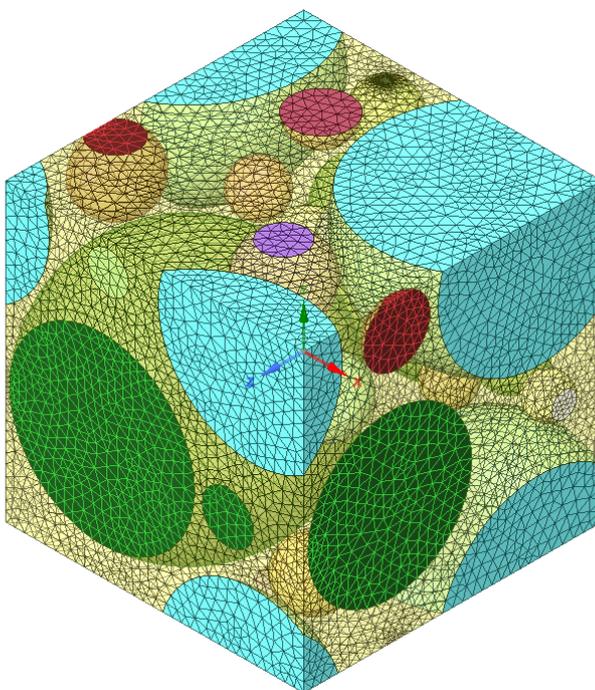


Рисунок 10 – Сетка для расчета гомогенизированных свойств смеси вяжущего и песка

Имеем гомогенизированные свойства для рассматриваемой смеси.

Таблица 5 – Свойства для смеси вяжущего и песка

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁵ , С ⁻¹	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Вяжущее&Песок	2,17	1,17	6,70	0,25

3.2.5. Вычисление гомогенизированных свойств теплового асфальта

Для создания итоговой модели будем использовать геометрию схожую с геометрией, построенной для вычисления свойств вяжущего, но в данном случае в каждом из восьми кубиков смесь вяжущего со щебнем составляет 62,5% от всей смеси, а смесь вяжущего с песком – 37,5%.

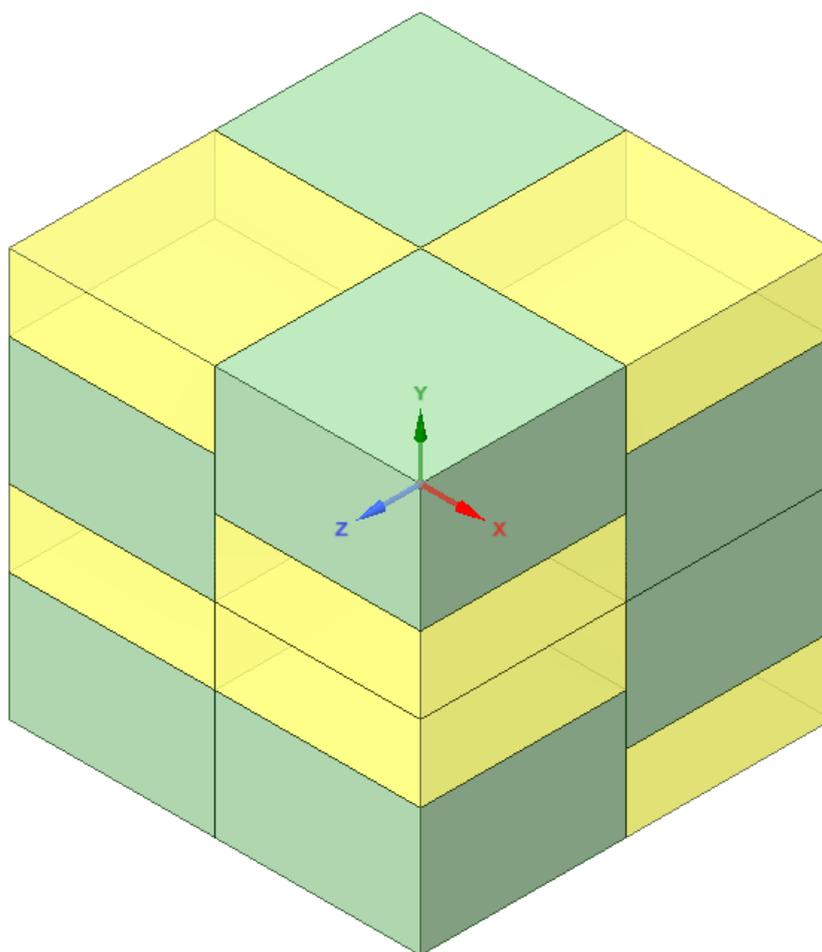


Рисунок 11– Модель для расчета гомогенизированных свойств теплового асфальта

На рисунке компонентам желтого цвета присвоены свойства смеси «вяжущее + песок», зеленым компонентам – «вяжущее + щебень». Построена конформная блочная сетка. Максимальный размер элемента 1,6 мм. Полученная сетка представлена на рисунке 12.

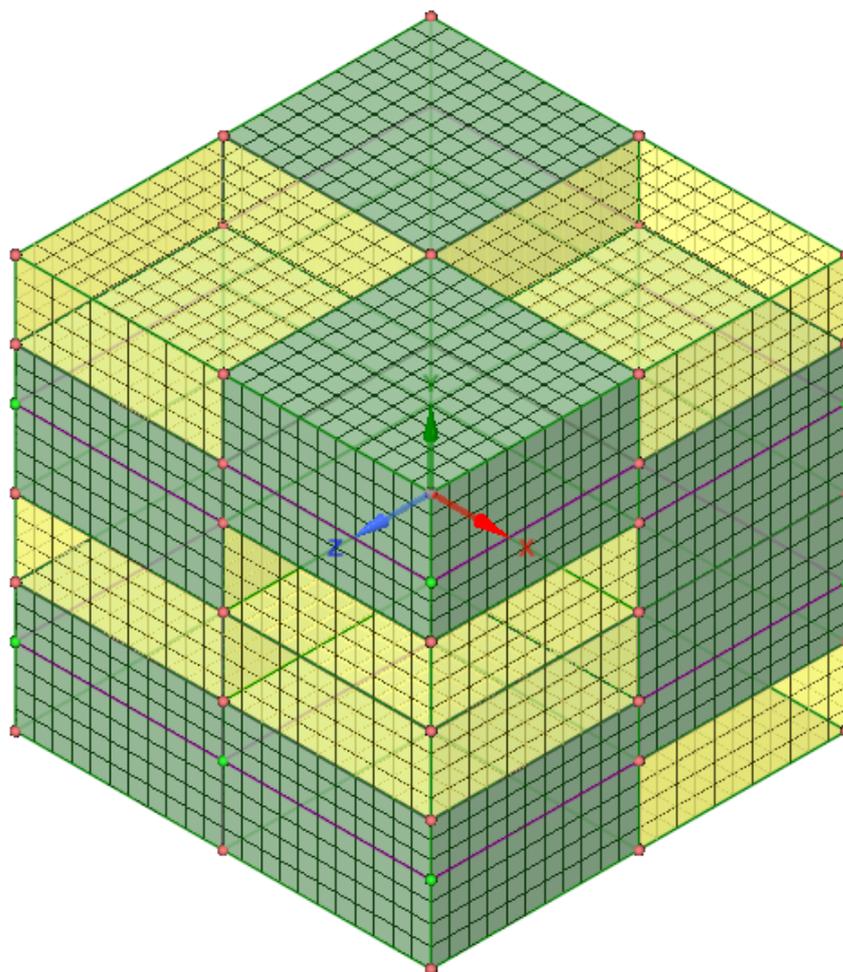


Рисунок 12 – Сетка для расчета гомогенизированных свойств теплого асфальта

По итогу расчета в программном модуле Ansys Material Designer получим следующие свойства для теплого асфальта:

Таблица 6 – Свойства теплого асфальта

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 ^{^(-5)} , С ^{^-1}	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Теплый асфальт	2,21	1,24	7,12	0,23

3.2.6. Выводы

Из таблицы 6 можем сделать вывод, что полученный материал имеет свойства асфальта и в дальнейшем может быть рассмотрен в задачах в качестве материала дорожного покрытия.

Таблица 7 – Сравнение свойств с теоретическими

	Плотность, г/см ³	Коэффициент теплового расширения, 10 ^{^(-5)} , С ^{^-1}	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
Теоретические значения	2,20-2,80	0,74-1,30	1,70-8,60	0,16-0,25
Теплый асфальт	2,21	1,24	7,12	0,23

ГЛАВА 4. ЗАДАЧА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУЧЕННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

4.1. Постановка задачи и исходные данные

Постановка задачи: необходимо рассмотреть статическую задачу давления автомобиля на слой асфальта.

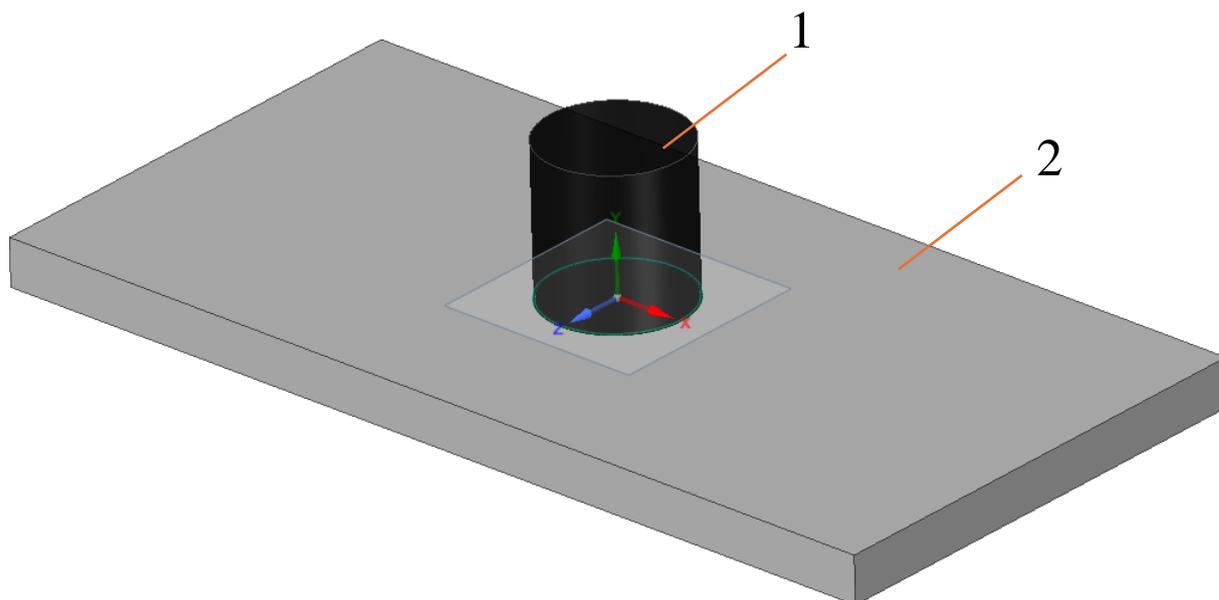


Рисунок 13 – Постановка задачи

На рисунке 13 тело №1 – упрощенная модель колеса автомобиля, тело №2 – модель слоя асфальта [5]. В таблице 7 представлены свойства материалов, используемых в задаче.

Таблица 8– Материалы

№	Материал	Плотность, г/см ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
1	Резина	1,2	0,01	0,49
2	Теплый асфальт	2,21	7,12	0,23

Тело №2 имеет форму параллелепипеда с размерами: 2 м × 1 м × 0,1 м. Тело №1 имеет форму цилиндра. В качестве высоты цилиндра взят средний радиус колеса – 0,65 м. Согласно [11] при проектировании дорожной одежды с использованием упрощенных расчетных схем принимают схему нагружения конструкции колесом автомобиля в виде одной круговой площадки диаметром D . Диаметр круговой площадки определяется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_{\text{ст.н.}}k_d}{\pi p}}$$

где $Q_{\text{ст.н.}}$ – нормативная статическая нагрузка от одного колеса, k_d – коэффициент динамичности, p – нормативное среднее давление. Для односкатного колеса нормативная статическая нагрузка равна 57,5 кН, коэффициент динамичности $k_d = 1,3$. Нормативное среднее давление – 800 кПа. Подставив значения, получим, что $D = 0,3$ м.

4.2. Создание сетки

Построим сетку с максимальным размером элемента 0,0025 м. Полученная сетка имеет 17181 элемент и 81584 узла.

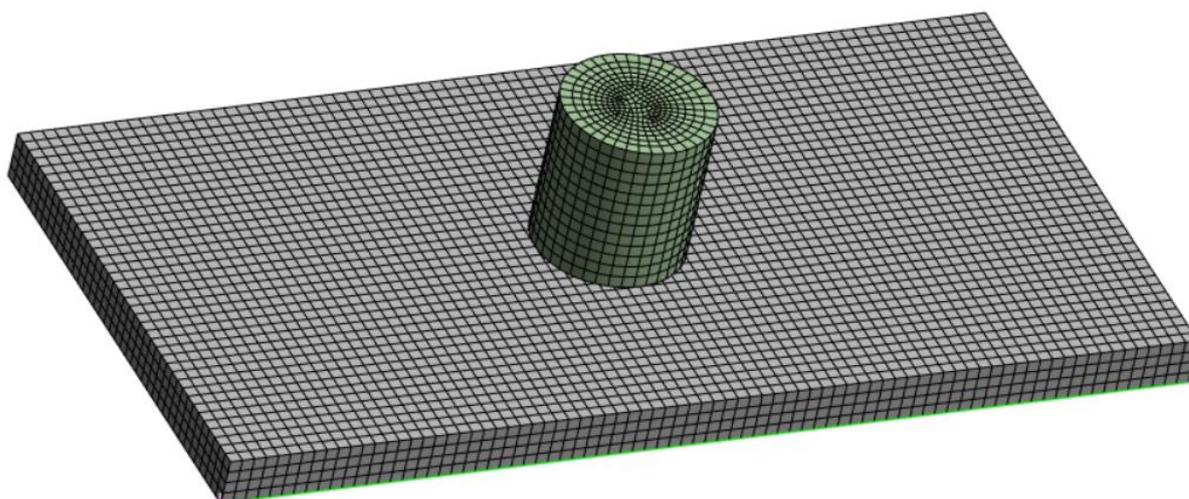


Рисунок 14 – Построение сетки

4.3. Задание граничных условий

В качестве граничных условий зададим контакт между телами и жестко закрепим все грани слоя асфальта кроме верхней.

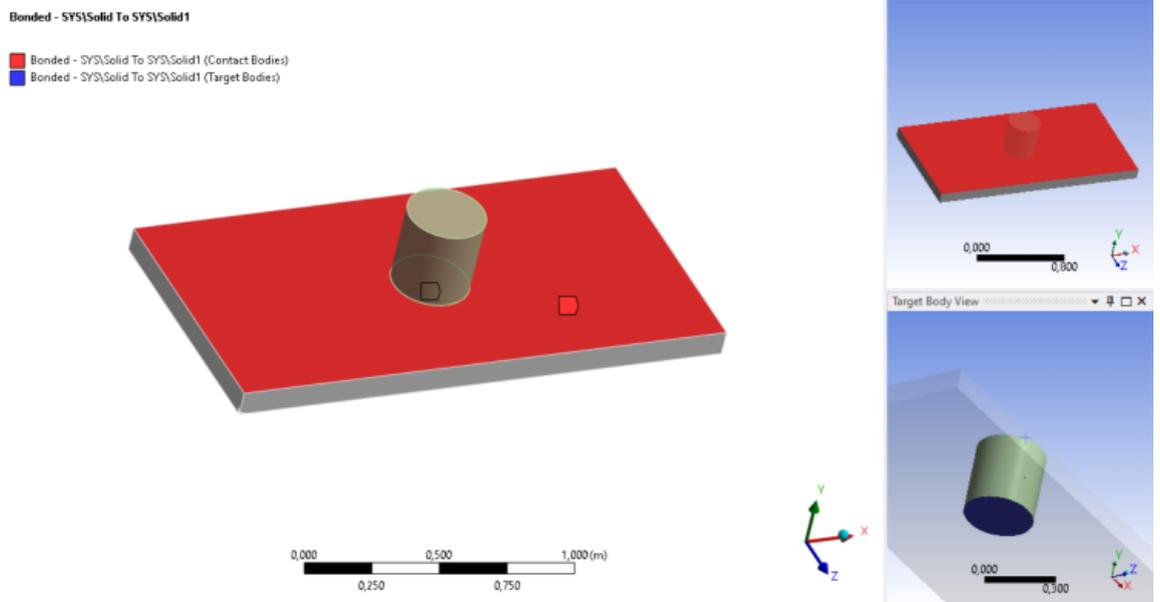


Рисунок 15 – Задание контакта

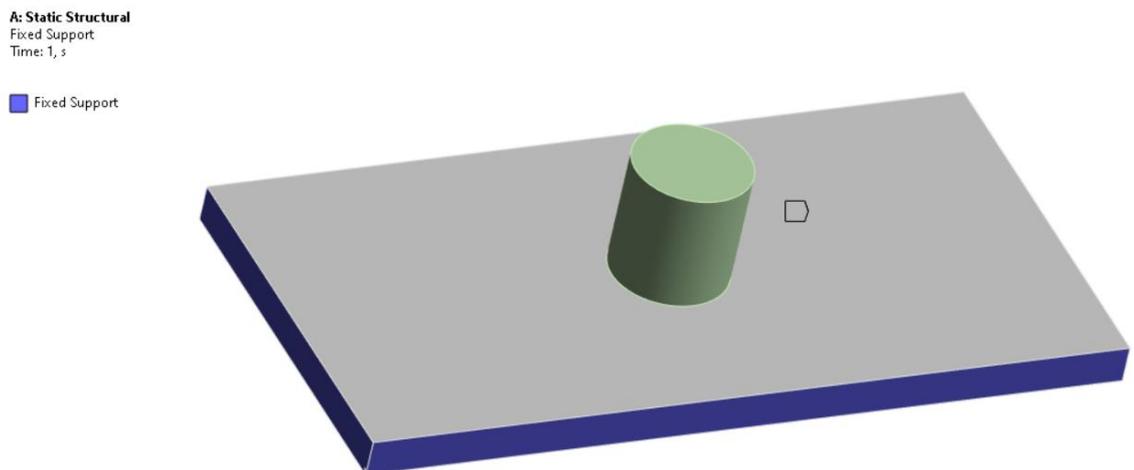


Рисунок 16 – Жесткое закрепление

Рассчитаем давление, которое будем оказывать на верхнюю грань цилиндра. Для этого рассмотрим четырехосный автопоезд [1].

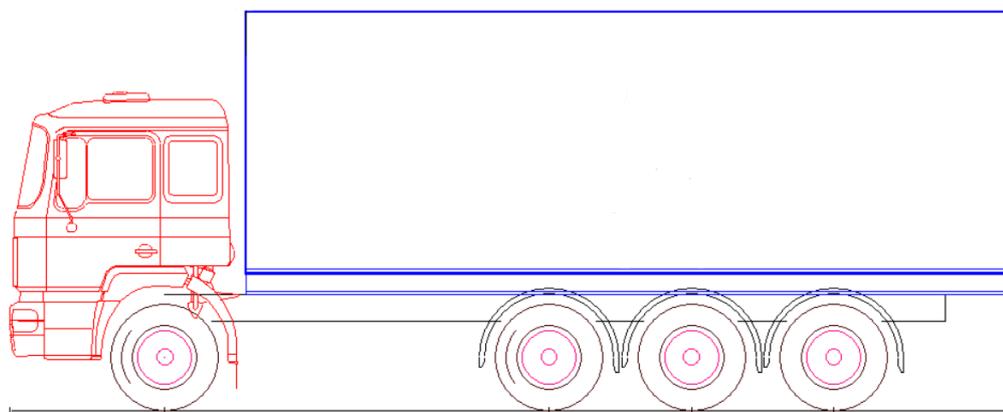


Рисунок 17 – Схематичное изображение автопоезда

Давление, оказанное автопоездом на одно колесо, можно найти по формуле:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{mg}{\pi R^2 n}$$

где F – сила тяжести, S – суммарная площадь контакта автомобиля со слоем асфальта, m – масса автопоезда, g – ускорение свободного падения, R – радиус кругового участка эквивалентного площади контакта одного колеса с асфальтом, n – количество колес. Предельная допустимая масса четырехосного автопоезда в России составляет 38 тонн [13]. Следовательно, $m = 38000$ кг, $g = 10 \frac{м}{с^2}$, $R = 0,15$ м, $n = 8$. Тем самым, $P = 672328,4$ Па.

A: Static Structural
Pressure
Time: 1, s

Pressure: 6,7233e+005 Pa

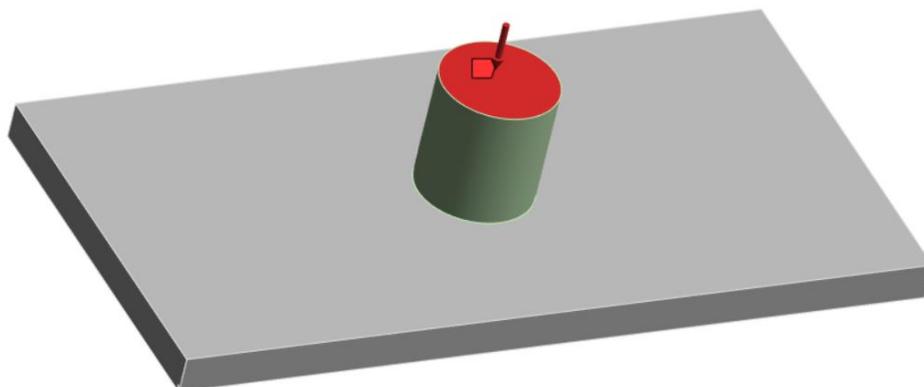


Рисунок 18 – Приложение давления

4.3. Результаты

Были рассчитаны перемещения под воздействием заданной нагрузки (рисунок 19, 20). Из рисунков можно увидеть, что перемещения слоя асфальта составили не более 9,5 мкм.

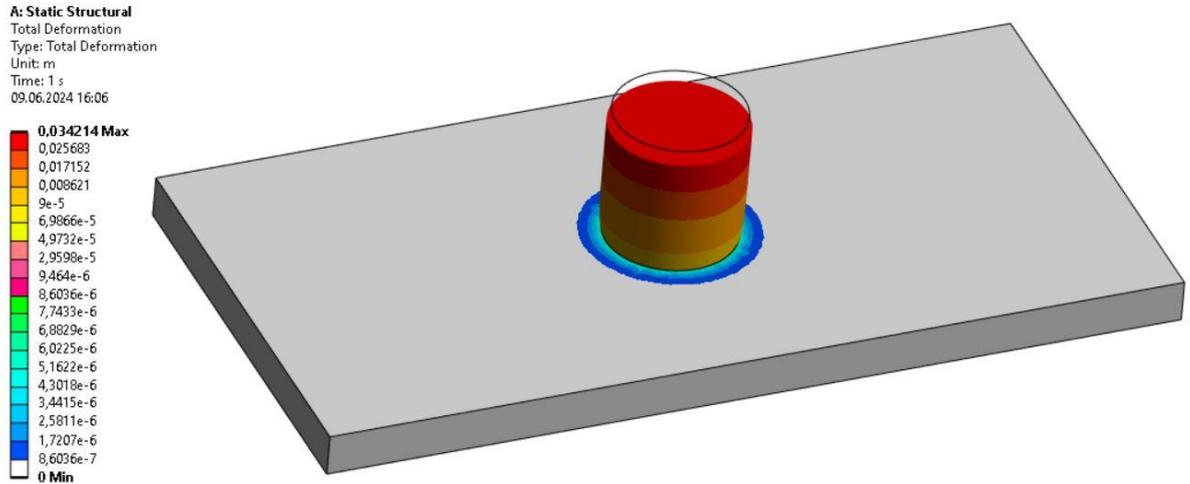


Рисунок 19 – Перемещения, полная модель

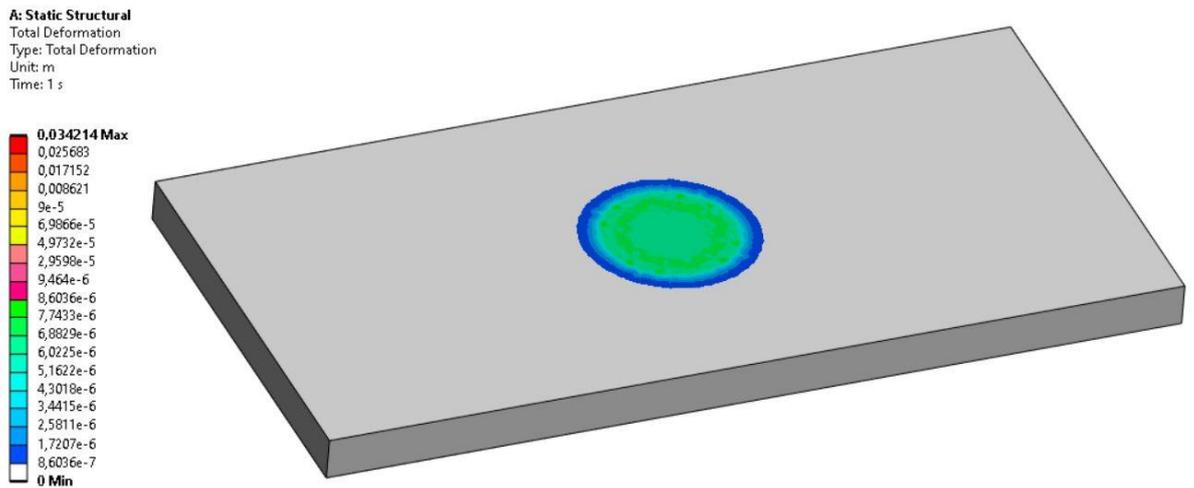


Рисунок 20 – Перемещения, только слой асфальта

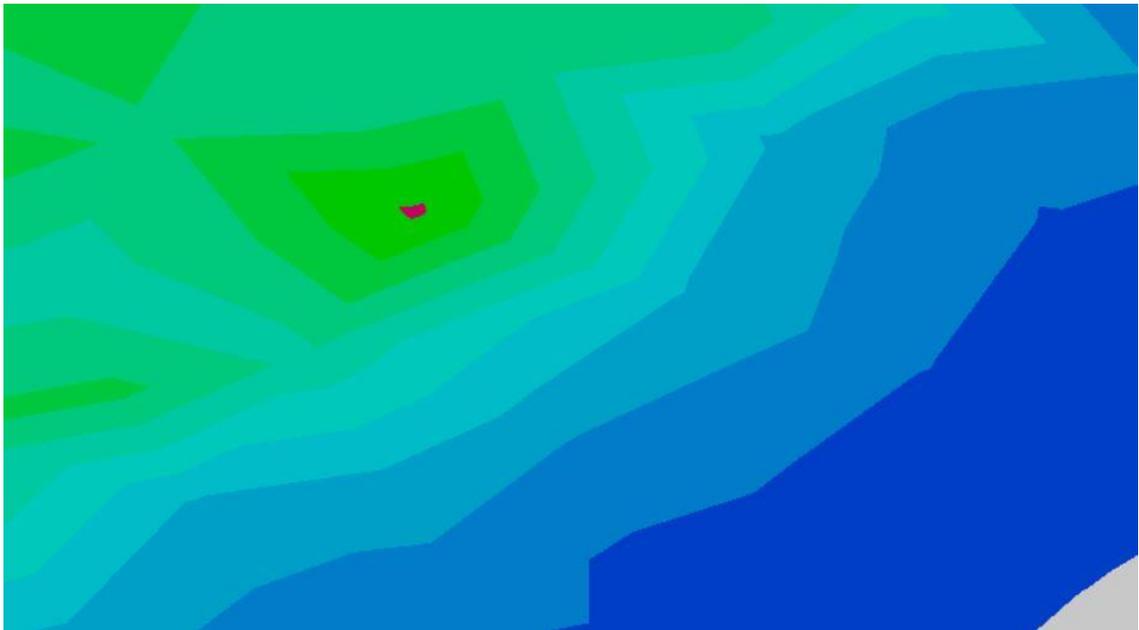


Рисунок 21 – Перемещения, зоны с максимальных значений для слоя асфальта

Помимо перемещений были рассчитаны эквивалентные напряжения по Мизесу, которые используются в материаловедении для оценки прочности и долговечности материалов. Из рисунка 22 максимальное значение напряжения составило 1,6 МПа.

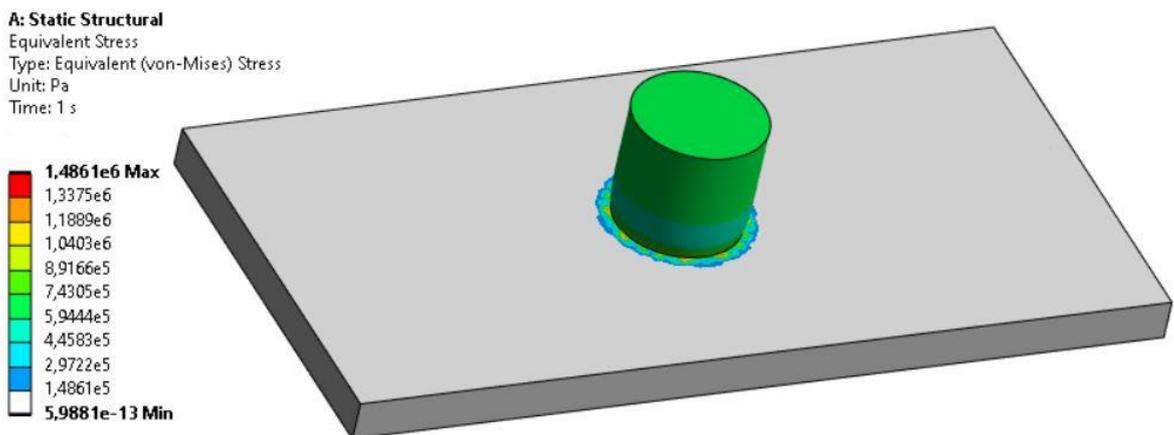


Рисунок 22 – Эквивалентные напряжения, полная модель

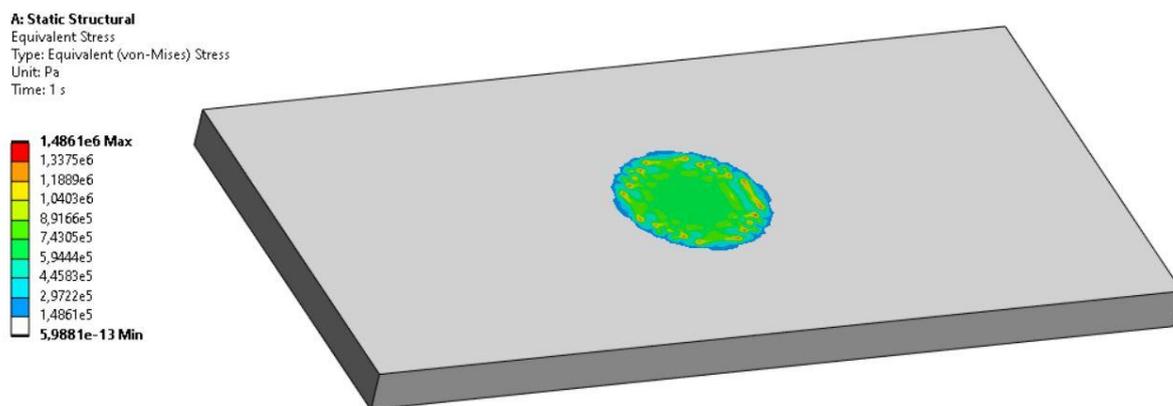


Рисунок 23 – Эквивалентные напряжения, только слой асфальта

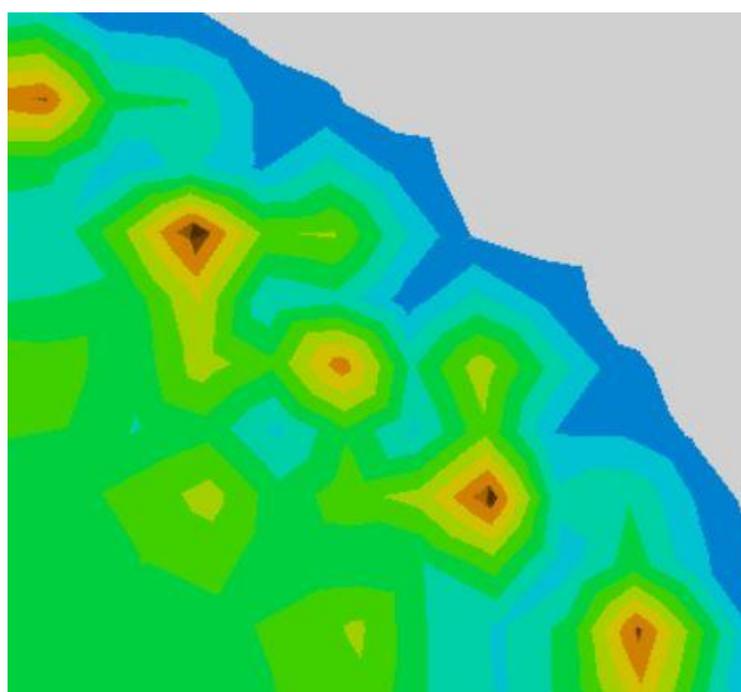


Рисунок 24 – Эквивалентные напряжения, зоны высокого напряжения

Согласно [12] при статическом нагружении для плотного асфальтобетона типа А на битуме марки БНД 60/90 предел прочности при сжатии составляет 33,5 МПа. Исходя из этого можно сделать вывод, что по результатам поставленной задачи значение предела прочности не превышено (максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_e = 1,49 \cdot 10^6 \text{ Па}$) и материал соответствует нормам для асфальтобетонных покрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной ВКР рассмотрена разработка модели теплого асфальта, как композиционного материала. В результате работы выполнены следующие задачи:

1. Изучена теория композиционных материалов, а также статьи, посвященные структуре и свойствам теплого асфальта, вследствие чего описаны особенности состава и структуры теплого асфальтобетона.
2. Разработана геометрия модели теплого асфальта в модуле Ansys Material Designer.
3. Были вычислены гомогенизированные свойства рассматриваемого материала. Полученный материал соответствует заявленным свойствам теплого асфальта
4. Была поставлена задача с использованием полученных свойств, и рассчитано напряженно-деформированное состояние слоя асфальта. Полученные результаты подтверждают, что рассмотренный материал может быть использован в качестве дорожного покрытия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тверсков Б. М. Теория автомобиля, 2010.
2. Баталов П. В., Галин Э. Р. Расчет эффективных упругих характеристик промёрзшего грунта // Аллея науки, 2018. – 372–377 с.
3. Готовцев В. М. и др. Принципы формирования оптимальной структуры асфальтобетона // Фундаментальные исследования, 2012. – 124–128 с.
4. Князева Е. Н. и др. Применение метода конечных элементов при исследовании композиционных материалов. Подходы, методики, программные средства // Механика машин, механизмов и материалов, 2013. – 69–76 с.
5. Корочкин А. В. Специфика конструирования и расчета жесткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием на автомобильных магистралях // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2018. – 104–109 с.
6. Савичев А. О. Совершенствование технологий производства теплых асфальтобетонных смесей с использованием вспененного битума, уменьшение вредного влияния на окружающую природную среду // Потаповские чтения, 2021. – 135 с.
7. Сатов А. Г., Гриневич Н. А. Литой асфальтобетон дорожный // Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. УГЛТУ, 2024. – 946–950 с.
8. Странска Э. и др. Влияние технологии производства на конечные свойства композитных материалов // Промышленное производство и использование эластомеров, 2015. – 19–24 с.
9. ГОСТ Р 58406.2, 2020.
10. ОДМ 218.2.042, 2014.
11. ОДМ 218.2.062, 2015.
12. ОДМ 218.3.119, 2019.

13. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.12.2023 № 2060 "Об утверждении Правил движения тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства", 2024.
14. Ail S. S., Dasappa S. Investigations into enhanced wax production with combustion synthesized Fischer–Tropsch catalysts // *Energy conversion and management*, 2016. – 80-90 с.
15. Kim H. H. et al. Effect of ft paraffin wax contents on performance properties of crumb rubber–modified asphalt binders // *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. – 04015011 с.
16. Ryu S. et al. Micromechanics-based homogenization of the effective physical properties of composites with an anisotropic matrix and interfacial imperfections // *Frontiers in Materials*, 2019. – 439850 с.
17. Sengoz B., Oylumluoglu J. Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen // *Construction and Building Materials*, 2013. – 173-183 с.
18. Stimilli A., Virgili A., Canestrari F. Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance // *Journal of Cleaner Production*, 2017. – 911-922 с.
19. Zhou D., Liang R., Kang Y. A review of chemo-rheological and thermo-rheological investigations on epoxy asphalt cementitious materials // *Construction and Building Materials*, 2023. – 132309 с.