Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

Санкт-Петербургский государственный университет  
Институт «Высшая школа менеджмента»

**Использование моделей дискретной оптимизации   
для решения задач загрузки   
грузового транспорта и контейнеров   
ООО «Петро»**

Выпускная квалификационная работа  
студента 4 курса бакалаврской программы,  
профиль – Логистика

Мишарева Ильи Петровича



Научный руководитель:  
к.э.н., доцент  
Федотов Юрий Васильевич  
  


**Санкт-Петербург  
2017**

Заявления

о самостоятельном выполнении выпускной квалификационной работы

Я, Мишарев Илья Петрович, студент 4 курса направления 080200 «Менеджмент» (профиль подготовки – Логистика), заявляю, что в моей выпускной квалификационной работе на тему «Использование моделей дискретной оптимизации для решения задач загрузки грузового транспорта и контейнеров ООО «Петро», представленной в службу обеспечения программ бакалавриата для последующей передачи в государственную аттестационную комиссию для публичной защиты, не содержится элементов плагиата. Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищённых ранее курсовых и выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Мне известно содержание п. 9.7.1 Правил обучения по основным образовательным программам высшего и среднего профессионального образования в СПбГУ о том, что «ВКР выполняется индивидуально каждым студентом под руководством назначенного ему научного руководителя», и п. 51 Устава федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» о том, что «студент подлежит отчислению из Санкт-Петербургского университета за представление курсовой или выпускной квалификационной работы, выполненной другим лицом (лицами)».

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (Подпись студента)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (Дата)

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Введение 5](#_Toc483305671)

[Глава 1. Описание компании и постановка задачи 8](#_Toc483305672)

[§ 1.1. Общая характеристика Japan Tobacco Inc 8](#_Toc483305673)

[§ 1.2. Japan Tobacco International в России 9](#_Toc483305674)

[§ 1.3. Логистические бизнес-процессы ООО «Петро» 10](#_Toc483305675)

[§ 1.4. Поставленная ООО «Петро» задача 12](#_Toc483305676)

[§ 1.4.1. Математическая постановка оптимизационной задачи 15](#_Toc483305677)

[§ 1.5. Обзор существующих решений 17](#_Toc483305678)

[Глава 2. Решение задачи о загрузке транспортного средства 20](#_Toc483305679)

[§ 2.1. Физические особенности решаемой задачи 20](#_Toc483305680)

[§ 2.1.1 Необходимые исходные параметры для расчета 27](#_Toc483305681)

[§ 2.2. Рассматриваемые транспортные средства и контейнеры 28](#_Toc483305682)

[§ 2.2.1. Транспортные средства 29](#_Toc483305683)

[§ 2.2.2. Контейнеры 32](#_Toc483305684)

[§ 2.2.3. Выбор оптимального транспортного средства 33](#_Toc483305685)

[§ 2.3. Принятые допущения и ограничения 35](#_Toc483305686)

[§ 2.3.1. Специфические ограничения 35](#_Toc483305687)

[§ 2.3.2. Общие допущения 36](#_Toc483305688)

[§ 2.4. Математическая постановка задачи 37](#_Toc483305689)

[Глава 3. Особенности программной реализации разработанного решения задачи 39](#_Toc483305690)

[§ 3.1. Описание Solver Add-in 39](#_Toc483305691)

[§ 3.1.1. Целевая функция для Solver 41](#_Toc483305692)

[§ 3.1.2. Указание переменных для Solver 42](#_Toc483305693)

[§ 3.1.3. Указание ограничений для Solver 43](#_Toc483305694)

[§ 3.2. Задаваемые и рассчитываемые данные для модели 45](#_Toc483305695)

[§ 3.2.1. Задаваемые параметры транспортного средства 45](#_Toc483305696)

[§ 3.2.2. Задаваемые параметры грузов 47](#_Toc483305697)

[§ 3.2.3. Задаваемые ограничения по нагрузкам на оси 48](#_Toc483305698)

[§ 3.2.4. Задаваемые ограничения по количеству загружаемых коробов 50](#_Toc483305699)

[§ 3.2.5. Расчет количества загруженных коробов 51](#_Toc483305700)

[§ 3.2.6. Расчет массы и объема 52](#_Toc483305701)

[§ 3.2.7. Расчет параметра α 54](#_Toc483305702)

[§ 3.2.8. Расчет нагрузок на оси 56](#_Toc483305703)

[§ 3.3. Принцип работы калькулятора Solver 56](#_Toc483305704)

[§ 3.3.1. Ввод исходных данных 57](#_Toc483305705)

[§ 3.3.2. Выбор транспортного средства 59](#_Toc483305706)

[§ 3.3.3. Обработка расчитанного плана погрузки 60](#_Toc483305707)

[§ 3.4. Тестирование разработанного калькулятора Solver 60](#_Toc483305708)

[§ 3.4.1. Сравнение результатов Solver c результатами калькулятора VDNK 61](#_Toc483305709)

[§ 3.5. Преимущества от калькулятора Solver для ООО «Петро» 65](#_Toc483305710)

[Заключение 67](#_Toc483305711)

[Список использованной литературы 69](#_Toc483305712)

[Приложение 1. Допустимые осевые нагрузки транспортных средств 72](#_Toc483305713)

[Приложение 2. Размеры штрафов за превышение допустимой массы или нагрузки на ось, руб. 73](#_Toc483305714)

[Приложение 3. 3D-модель плана погрузки в программе Packer3d 74](#_Toc483305715)

[Приложение 4. 3D-модель плана погрузки в программе Truckloader 75](#_Toc483305716)

[Приложение 5. Диалоговое окно Solver при полном заполнении 76](#_Toc483305717)

# Введение

Практика внедрения ограничений допустимых масс транспортных средств является распространенной как в России, так и в других развитых странах. Связаны данные ограничения с тем, что дорожные покрытия имеют свойство приходить в негодность и их необходимо обслуживать и ремонтировать. Данные ограничения позволяют минимизовать вред дорогам от транспортных средств и штрафовать тех, кто не соблюдает установленные ограничения и таким образом получать средства на ремонт и обслуживание дорог.

В России основной документ, регулирующий автомобильные перевозки грузов – это Постановление Правительства РФ N 272 в редакции от 22.12.2016 «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом»[[1]](#footnote-1). Оно, помимо прочего, устанавливает допустимые массы транспортных средств и допустимые осевые нагрузки транспортных средств (см. Приложение 1). Именно эти два ограничения будут более подробно рассмотрены в данной работе. При этом если ограничения общей массы транспортируемых грузов выполняется в большинстве случаев, ограничения по нагрузкам на оси выполняются редко в связи с тем, что это предполагает более ответственный и трудоемкий подход к процессу загрузки.

В связи с этим, многим компаниям, осуществляющим перевозки грузов автомобильным транспортом, зачастую приходится решать следующую дилемму: загрузить больше и превысить допустимые ограничения или же остаться в рамках ограничений, но снизить объем загрузки. Как известно, наиболее экономически выгодный способ использования автомобильного транспорта (в частности, грузовых автомобилей) – это так называемый Full Truck Load (FTL), когда транспортное средство загружается до полной вместимости. На первый взгляд, данный способ транспортировки обладает очевидным преимуществом – он позволяет снизить общие издержки на перевозку и получить максимальную прибыль. Однако не все компании осознают, сколько им придется заплатить за невыполнение существующих транспортных ограничений.

На самом же деле, штрафы за превышение общей допустимой массы или осевых нагрузок являются достаточно высокими. Усугубляет ситуацию еще и то, что данные штрафы накладываются как на перевозчика-экспедитора, так и на компанию-владельца груза. В общей сложности сумма штафа может достигать пятиста тысяч рублей за единоразовое превышение, при этом данная сумма возрастает при повторных правонарушениях (более подробная таблица штрафов представлена в Приложении 2[[2]](#footnote-2)). В связи с этим, некоторые компании задумываются о том, чтобы выстроить процесс автомобильной перевозки грузов таким образом, чтобы перевозить максимально возможное количество груза и при это оставаться в рамках транспортного законодательства.

Не стала исключением и компания ООО «Петро» - один из крупнейших производственных комплексов компании Japan Tobacco International. Компания очень ответственно подходит к выполнению требований Российского законодательства, в связи с чем приняла решение реализовать соответсвующий проект по совершенствованию процесса загрузки грузового транспорта и контейнеров. Таким образом, объектом данной работы выступает компания ООО «Петро», а предметом работы является процесс загрузки грузового транспорта и контейнеров продукцией компании.

Цель данной выпускной квалификационной работы заключается в нахождении подходящего под требования компании решения по улучшению процесса загрузки грузового транспорта и контейнеров с учетом требований российского транспортного законодательства в рамках допустимых нагрузок на оси. Для того, чтобы реализовать поставленную цель, было обозначено несколько задач, выполнение которых позволит достигнуть данную цель. Среди задач можно выделить следующие:

* Изучить текущие законодательные ограничения нагрузок на оси транспортных средств;
* Провести анализ текущего процесса загрузки транспортных средств в ООО «Петро»;
* Изучить существующие модификакции транспортных средств и контейнеров;
* Изучить физические особенности распределения нагрузок на оси транспортных средств;
* Провести анализ существующих решений на рынке;
* Разработать собственное решение и внедрить его в компании.

Для решения поставленных задач были использованы различные источники информации. Во-первых, для полного погружения в работу над проектом был изучен официальный сайт компании Japan Tobacco International, статистика по перевозкам от представителей ООО «Петро» и результаты опросов менеджеров ООО «Петро». Во-вторых, в работе активно используются теоретические наработки транспортной компании VDNK по расчету нагрузок на оси транспортных средств. В-третьих, была использована литература по дискретному программированию таких авторов как В.В. Псиола и М.М. Ковалев.

Структура работы представляет собой три главы различной смысловой направленности, каждая из которой, не считая первую, является логическим продолжением предыдущей. В первой главе представлено краткое описание компании и общее описание поставленной задачи, а также проведен анализ существующих готовых решений данной задачи. Вторая глава посвящена методологии исследования и включает в себя вывод формул для расчета нагрузок на оси, обзор существующих транспортных средств и контейнеров, а также формальную математическую постановку задачи. Наконец, третья глава полностью посвящена практическим особенностям создания собственного решения и его внедрения в компании, а также оценку данного решения с точки зрения ООО «Петро».

# Глава 1. Описание компании и постановка задачи

## § 1.1. Общая характеристика Japan Tobacco Inc

Japan Tobacco Inc - это японская мультинациональная корпорация, осуществляющая свою деятельность на рынке товаров повседневного пользования (FMCG-рынке). Основной вид деятельности компании – производство и продажа табачной продукции. Штаб-квартира компании находится в Токио, Япония. Компания является абсолютным лидером на рынке Японии с долей рынка в 60% на 2015 год[[3]](#footnote-3).

На международном рынке компания представлена подразделением Japan Tobacco International, штаб-квартира которого находится в Женеве, Швейцария. Данное международное подразделение было основано в 1999 году. Компания также представлена практически во всех регионах мира и активно занимается развитием новых регионов деятельности. Доля рынка компании на мировой арене на 2015 год составляла 8,8%, что является третьим показателем в мире не считая Китай (как правило, Китай исключается в силу того, что данный рынок закрыт для зарубежных компаний)[[4]](#footnote-4). При этом доля рынка компании в 2015 году снизилась за счет снижения долей на таких рынках, как Восточная Европа и Азия, но данное снижение было не столь значительным в связи с ростом долей в Западной Европе и Африке[[5]](#footnote-5).

Что касается табачных продуктов-брендов компании, выпускаемых компанией, то среди наиболее известных можно выделить следующие[[6]](#footnote-6):

* Winston

Наиболее продаваемый и самый популярный бренд сигарет компании, а также является вторым сигаретным брендом в мире. Был создан в 1954 году в США Ричардом Рейнольдсом, который назвал бренд в честь своего города рождения – Winston Samel. Бренд Winston продается в более чем ста странах мира. Доля рынка данного бренда в мире на 2015 год составляла 2,2%[[7]](#footnote-7).

* Camel

История Camel началась в 1913 году, когда данный бренд стал первым в мире сигаретным товарным знаком. Сегодня Camel является основным международным премиальным брендом компании Japan Tobacco International. Он продается в более чем ста странах мира. Доля рынка данного бренда в мире на 2015 год составляла 0,8%[[8]](#footnote-8).

* Sobranie

Зарегистрированный в 1879 году в Лондоне Альбертом Вейнбергом, Sobranie является одним из старейших сигаретных брендов в мире. Название произошло от славянского слова «Собрание», означающего официальное место встречи важных персон. Такое название отражает престижность данного бренда. Доля рынка данного бренда в мире на 2015 год составляла 0,1%[[9]](#footnote-9).

Кроме данных брендов, компании принадлежат не менее известные сигаретные бренды, такие как Mevius, LD, Glamour и другие. Кроме этого, компания выпускает сигары, табак для самокруток и снюс.

## § 1.2. Japan Tobacco International в России

Japan Tobacco International в России - это ведущая табачная компания на российском рынке, в ее портфеле – три из десятки самых продаваемых брендов в Российской Федерации[[10]](#footnote-10), а также региональные бренды, такие как «Русский Стиль», «Петр I» и другие. В России находится наиболее крупный производственный центр компании в мире, который включает четыре фабрики, на которых суммарно трудятся более 4500 сотрудников.

Компания Japan Tobacco International в России насчитывает четыре фабрики: производственный комплекс ООО «Петро» в Санкт-Петербурге, фабрику ООО «Крес Нева» в Ленинградской области, завод **ООО «Дж.Т.И. Елец» в Ельце, фабрика ЗАО «Лигетт-Дукат»** в Москве, а российская штаб-квартира компании находится в Москве. На данный момент завод «Лигетт-Дукат» компании находится в процессе закрытия, а производство на нем закончилось летом 2016 года. Закрытие данной фабрики, по большей части, связано с пересмотром компанией своего портфеля продуктов и экономической неопределенностью в России[[11]](#footnote-11).

Что касается портфеля компании на российском рынке, то, как и на международном рынке, Winston является наиболее продаваемым брендом на территории России c долей рынка в 13,9%[[12]](#footnote-12). Данный бренд производится на фабрике ООО «Петро», которая находится в Санкт-Петербурге. Данная фабрика также производит бренд «Петр I», который является локальным и занимает долю рынка в 3%[[13]](#footnote-13).

Экономическое положение компании на российском рынке является стабильно лидирующим, в частности, доля компании на 2015 год составляла 36,6% по данным исследования Marketline[[14]](#footnote-14). Это максимальный показатель среди всех табачных компаний в России. При этом чистая прибыль компании стабильно росла с 2013 по 2015 года, достигнув значения в 31,5 миллиард рублей по итогам 2015 года[[15]](#footnote-15).

## § 1.3. Логистические бизнес-процессы ООО «Петро»

Фабрика ООО «Петро» - один из крупнейших производственных комплексов компании Japan Tobacco International в мире, а также самая крупная из фабрик в России. Такой масштаб фабрики предполагает наличие большого количества логистических бизнес-процессов, начиная с доставки материалов для производства и заканчивая дистрибуцией продуктов клиентам. Среди существующих на фабрике логистических бизнес процессов можно выделить несколько основных:

* Доставка всевозможных материалов и комплектующих для производства сигаретной продукции;
* Транспортировка готовой продукции с производства на склады компании;
* Дистрибуция готовой продукции;
* Складирование готовой продукции и материалов на собственных и внешних складах компании.

В рамках данной работы будет наиболее подробно рассматриваться процесс дистрибуции готовой продукции, так как именно данный процесс был затронут изменением транспортного законодательства РФ. В связи с этим, целесообразно выделить основные процессы, которые осуществляются ООО «Петро» в рамках дистрибуции готовой продукции:

* Дистрибуция в пределах России

Дистрибуция готовой продукции клиентам компании, которые находятся в России, может осуществляеться как стандартными транспортными средствами (грузовые фуры), так и контейнерами через порт Санкт-Петербурга. При этом в обоих случаях процесс транспортировки предполагает использование транспортных средств либо на всем пути следования, либо до определенного местоположения. (при контейнерных перевозках).

Перевозки по данному маршруту осуществляются через компанию Мегаполис – крупнейшего в России дистрибьютора сигаретной продукции. Компания Japan Tobacco International владеет долей в 20% в данной компании, такой же долей владеет компания Philip Morris International – один из конкурентов компании[[16]](#footnote-16). При этом компания Мегаполис сначала покупает готовую продукцию, а затем осуществляет его перевозку. Таким образом, при перевозке грузов собственником является уже компания Мегаполис и ответственность за нарушения транспортного законодательства несет именно она.

* Экспорт в страны СНГ и другие близлежащие страны

Экспорт в данные страны, как правило, осуществляется стандартными транспортными средствами на всем протяжении пути. При этом основные страны, в которые регулярно отправляется продукция компани, находятся в Средней Азии. Как правило, данные маршруты являются наиболее проблематичными с точки зрения весового контроля, так как на соответствующих дорогах распологается большое количество пунктов весового контроля.

Перевозки по данному маршруту осуществляются через транспортные компании, то есть в случае нарушения допустимых ограничений по нагрузкам на оси, штраф будет наложен и на транспортную компанию. Данный фактор также обуславливает критичность данного маршрута для компании и, в частности, его важность в рамках данного проекта.

* Экспорт в страны дальнего зарубежья – контейнерные перевозки

Экспорт с фабрики ООО «Петро» в страны дальнего зарубежья осуществляется компанией достаточно редко в виду того, что в данные страны более экономически целесообразно поставлять из фабрик, которые распологаются ближе к данным регионам. Тем не менее, такие перевозки осуществляются контейнерами, которые также необходимо доставить до порта, то есть существует риск проведения весового контроля и, соответственно, необходимо данный маршрут учитывать при разработке решения.

Таким образом, исследовав существующие в компании логистические бизнес-процессы можно выделить один основной процесс – дистрибуция готовой продукции автомобильным транспортом и контейнерами. В рамках данной работы данный процесс будет рассматриваться применительно к экспортной дистрибуции через компании-перевозчики с которыми взаимодействует компания.

## § 1.4. Поставленная ООО «Петро» задача

Принимая во внимание ужесточения текущего транспортного законодательства РФ в разрезе допустимой массы, а также осевых нагрузок транспортного средства, группой транспортной логистики фабрики «Петро» было принято решение найти решение, которое позволит оптимизировать загрузку транспортных средств таким образом, чтобы план погрузки учитывал требования законодательства в сфере грузовых перевозок, а именно Постановления Правительства РФ №272.

Для решений поставленной задачи компанией было принято решение реализовать соответствующий проект, в котором автор данной работы принимал непосредственное участие. С точки зрения компании, результатом данного проекта должно было стать готовое приложение, которое бы позволило рассчитывать оптимальные планы погрузки[[17]](#footnote-17) и полностью соответствовало требованиям компании. В качестве требований ООО «Петро» выделило следующие критерии:

* Простота в использовании

Предлагаемое решение должно быть интуитивно понятно конечным пользователям и минимизировать количество решений, которые должен принимать пользователь. Данный критерий также предполагает отказ от необходимости в полноценном обучении ключевых пользователей.

* Быстрое время расчетов

Расчет оптимального плана погрузки должен занимать не больше нескольких минут и проводиться автономно.

* Высокая точность расчетов

Рассчитываемые значения нагрузок на оси не должны отличаться от значений, получаемых на пунктах весового контроля, более чем на 20%.

Таким образом, управленческая задача заключается в нахождении аппаратного средства, которое бы позволяло калькулировать оптимальные планы погрузки и при этом соответствовало всем вышеперечисленным критериям.

В первую очередь, для достижения необходимого результата было необходимо провести анализ специфики решаемой задачи, а именно понять, что именно ограничивает Постановление Правительства РФ №272. Данный нормативный акт ограничивает допустимую нагрузку на оси транспортного средства, то есть нагрузку от массы автотранспортного средства, которая передается на плоскость через колеса[[18]](#footnote-18). Расчет нагрузки на оси можно производить несколькими способами:

* Приблизительный расчет

При данном виде расчета последовательность действий примерно следующая:

1. Определяется массу машины и массу полуприцепа (информацию можно взять из свидетельства о регистрации ТС);
2. Определяется фактическая масса загруженного груза (например, из товарной накладной);
3. Проводится расчет нагрузки на оси прицепа следующим образом: необходимо взять 75% от массы всего груза, прибавить к этому значению массу пустого полуприцепа и поделить данное значение на количество осей у полуприцепа.
4. Проводится расчет нагрузки на заднии(-юю) оси(-ь) тягача следующим образом: необходимо взять 25% от массы всего груза и массы полуприцепа, прибавить к этому значению массу тягача и поделить данное значение на количество задних осей у тягача.
5. Проводится расчет нагрузки на переднюю ось тягача следующим образом: необходимо взять 25% от массы всего груза и массы полуприцепа, прибавить к этому значению массу тягача, а затем взять от полученной суммы еще раз 25%.

Основной недостаток данного способа расчета – очень низкая точность получаемых результатов, что не гарантирует отсутствие перегруза осей на пунктах весового контроля.

* Точный расчет с использованием физических зависимостей

Данный вид расчета предполагает разработку алгоритма, который бы позволял расчитывать нагрузку на оси транспортного средства используя точные формулы, которые показывают данную нагрузку (см. Параграф [2.1.](#_§_2.1._Физические)). Нетрудно догадаться, что данный способ расчета предполагает куда более серьезные инструменты и его нельзя провести на простом листке бумаги, в отличие от первого способа.

Таким образом, сравнивания эти два способа расчета можно сделать очевидный вывод о том, что для решения поставленной задачи необходим более серьезный инструментарий. Именно этот вывод стал причиной обратиться к математической составляющей данной задачи с целью понять ее специфику.

### § 1.4.1. Математическая постановка оптимизационной задачи

В ходе проведенного анализа стало понятно, что данную задачу можно свести к трехмерной оптимизационной задаче, которая включает целевую функцию, переменные и ограничения. Применительно к данному случаю задача состоит в том, чтобы сложить максимально возможное количество коробов разных масс и объемов при условии непревышения допустимых нагрузок на оси транспортного средства и удовлетворения дополнительных ограничений. В математике общий случай такой задачи называется задачей о рюкзаке, а применительно к данному случаю – 3-х мерной задачей о рюкзаке[[19]](#footnote-19).

Наиболее известный в математике вариант этой задачи – одномерная задача о рюкзаке. Она заключается в том, что в определенных размеров рюказ необходимо упаковать неделимые предметы разного объема и стоимости таким образом, чтобы общая стоимость рюкзака была максимальна. В связи с тем, что переменными в данной задачи являются предметы, на данные переменные накладываются условия целочисленности и неотрицательности, что позволяет классифицировать данную задачу как задачу дискретного программирования (дискретной оптимизации)[[20]](#footnote-20).

Математическая формулировка данной задачи выглядит следующим образом[[21]](#footnote-21):

При условиях:

На данный момент наверняка известно, что такая задача попадает под класс NP-полных задач[[22]](#footnote-22). Если рассматривать задачу о рюкзазе в трехмерном пространстве, то она значительно усложняется за счет дополнительных условий, однако тем не менее остается решабельной за полиномиальное время, то есть также попадает под класс NP-полных задач[[23]](#footnote-23). При этом основная трудность в решении задач такого рода заключается в том, что они имеют экспоненциальную временную сложность, то есть для их решения даже при небольшом количестве грузов/переменных самым мощным на данный момент компьютером потребуется огромное количество времени - годы[[24]](#footnote-24).

Также существенным ограничением является необходимость учета дополнительных ограничений, которые возникают в связи с особенностями укладки грузов в транспортное средство. Применительно к данной задаче в Логистике, в качестве дополнительных ограничений могут выступать требования равномерной погрузки, определенная очередность укладки грузов при доставке сразу нескольким клиентам и так далее. Данные ограничения, как правило, требуется отразить в математической постановке задачи, но при этом надо быть уверенным в их необходимости, так как дополнительные ограничения значительно увеличивают время и могут повлиять на точность расчетов. О математической постановке задачи для ООО «Петро» будет посвящен параграф [2.4.](#_§_2.4._Математическая) данной работы.

Несмотря на всю сложность разработки такого решения, на рынке IT-услуг в логистике существуют две программы, которые позволяют решить данную оптимизационную задачу с использованием серьезных математических алгоритмов, которые лежат в их основе. Данные алгоритмы являются собственными разработками компаний и поэтому представляют собой приближенные способы решения задач такого рода. Тем не менее, они позволяют получать решения, которые зачастую являются очень близки к оптимальным и именно поэтому программы на их основе необходимо рассмотреть более подробно в рамках данной работы.

## § 1.5. Обзор существующих решений

На данный момент, на российском рынке существуют два очень похожих инструмента, позволяющие решать задачи, связанные с оптимальной укладкой грузов в транспортные средства и контейнеры.

* Packer3d - <http://www.packer3d.ru/>

Данная программа была разработана и поддерживается студентами и профессорами кафедры МАТИС механико-математического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова. В ее основу положены уникальные эвристические алгоритмы, которые основаны на разработках в области дискретной математики, математической логики и статистики. Как указывают разработчики данной программы, точность расчетов составляет не менее 85% от наилучшего решения, при этом время работы программы составляет всего лишь несколько минут для более ста коробов.

Из практических преимуществ данной программы также можно выделить возможность представить полученные расчеты в трехмерной моделе (иллюстрация представлена в Приложении 3), которая четко показывает, куда и какой тип груза необходимо сложить. Также она позволяет создавать типовые расчеты, которыми пользователь может в дальнейшем пользоваться без проведения новых расчетов.

Пользователями данного инструмента являются компании из различных секторов экономики. Так, среди них есть производственные компании, например ЗАО Пивоваренная компания «Балтика» и ООО «Газпромнефть – СМ». Также данное решение активно используется транспортными компаниями, такими как Agility (ЗАО "Геологистикс") и Multimodal Transport Equipment GmbH.

Что касается минусов, то прежде всего это стоимость, которая составляет 550 тысяч рублей без учета стоимости интегрирования программы в ИС заказчика. Также данная программа предполагает обучение конечных пользователей по работе с данной программой и каждый проводимый расчет предполагает ввод большого количества данных от пользователя, что значительно усложняет процесс расчета оптимального плана погрузки.

* Truckloader - <http://tlrun.com/ru/index.php>

Данная программа по своему смыслу очень схожа с Packer3d. Информации о том, что лежит в основе алгоритмов данной программы, практически нет в открытых источниках, однако компании-клиенты компании утверждают, что получаемые с помощью нее значения зачастую совпадают с реальными значениями на пунктках весового контроля. Truckloader так же позволяет рассчитать оптимальную укладку грузов разных видов в разные типа транспортных средств и отображает полученные расчеты в 3D моделях (иллюстрация представлена в Приложении 4). Плюс к этому, программу возможно интегрировать практически с любой информационной системой компании, будь это SAP или 1C.

Среди значимых проектов с использованием данного инструмента можно выделить проект для компании Coca-Cola HBC Russia, где данная программа была использована для оптимизации осевых нагрузок при перевозках большегрузным транспортом. При этом, согласно отзывам компании, результаты расчетов с использованием Truckloader соответсвуют действительности, то есть измерениям на весах поосного взвешивания.

В качестве минусов можно выделить достаточно долгое время расчетов (в среднем 10 минут) при большом количестве различных грузов для погрузки, а также необходимость обучать ключевых пользователей. Как и Packer3d, данная программа является платной и предполагает оформление подписки стоимостью 5000 рублей в месяц.

Таким образом, несмотря на то, что оба представленные программы обладают рядом важных преимуществ, они не совсем соответствовали требованиям ООО «Петро»: простота в использовании и создание простых и понятных планов погрузки. Таким образом, требовалось разработать инструмент, который бы предполагал минимальное участие конечного пользователя и создавал универсальные планы погрузки, которые бы соответствовали специфическим требованиям компании.

В связи с этим, было принято решение создать свой собственный инструмент на основе приложения к Microsoft Excel под названием Solver Add-in. Данное приложение позволяет решать оптимизационные задачи за считанные секунды при условии, что построенная математическая модель была правильно составлена. Более подробно про Solver Add-in будет изложено в параграфе [3.1.](#_§_3.1._Описание) данной работы.

Кроме этого, существуют так называемые онлайн-калькуляторы, позволяющие проводить расчеты нагрузок на оси транспортных средств, зная общую массу груза и параметры транспортного средства. Среди примеров таких калькуляторов можно выделить «VDNK», «Сеспель» и другие. Однако данные калькуляторы не могут выступать в виде альтернативы полноценному решению в виде готовой программы в связи с тем, что они лишь производят расчеты «по факту» и не позволяют предотвратить перегруза. Тем не менее, один из таких калькуляторов был использован про проведении тестирования собственного решения, а именно – калькулятор VDNK. Результаты данного сравнения будут представлены в рамках данной работы.

# Глава 2. Решение задачи о загрузке транспортного средства

## § 2.1. Физические особенности решаемой задачи*[[25]](#footnote-25)*

Основная сложность при решении данной задачи применительно к рассматриваемому в данной работе случаю – это физические взаимоотношения, которые и определяют нагрузки на оси транспортного средства. Данная часть работы будет посвящена объяснению используемых формул и зависимостей.

В рассматриваемой модели есть три объекта: тягач (Т), полуприцеп (П.П.) и груз (Гр.). Каждый из объектов будет иллюстрирован соотвествующим индексом для более удобного восприятия формул. Также, все векторные выражения упрощены до уравнений скалярного вида, за исключением иллюстраций, где показано направление воздействия силы. Например, символ обозначает силу как векторную величину, направление действия которой задается соответствующим вектором. Символ обозначает силу как скалярную величину, то есть проекцию силы на соответствующую координатную ось (в данном случае ось Y).

Все объекты будут рассматриваться в рамках прямоугольной системы координат, то есть в системе отсчета, где ось Х является горизонтальной осью, а ось Y – вертикальной. При этом точка отсчета совпадает с передней осью тягача. Таким образом, проекции всех сил, действующих на объекты системы, на ось Х равны нулю (так как эти силы будут перпендикулярны оси Х). Проекции всех сил на ось Y, в свою очередь, равны величине действующей силы (по модулю), а знак определяется следующим образом: если направление действия силы совпадает с направлением оси Y, то знак «+», в противном случае знак «-».

Уравнения относятся к моментам, когда объекты находятся в состоянии покоя, либо двигаются равномерно и прямолинейно. В эти моменты сумма всех сил, действующих на объекты системы, равна нулю. Также, сумма всех моментов сил, действующих на объекты системы, равна нулю.

В данной модели рассматривается двуосный тягач и одноосный полуприцеп. При этом предполагается, что если у тягача/полуприцепа будет больше осей, то нагрузка на каждую ось распределяется пропорционально. То есть если нагрузка на одну ось полуприцепа составляет 12 тонн, то в случае с тремя осями нагрузка будет составлять 4 тонны на ось. На практике, однако, данное предположение оказывается неверным, что приводит к необходимости скорректировать либо модель, либо ее ограничения. Более подробно про то, как это учтено в описываемой модели, будут описано в части 4 данной главы.

Вывод физических формул будет описан последовательно, начиная с рассмотрения отдельно тягача, затем тягача и полуприцепа, а затем в полученную модель добавится груз и будет выведена формула для расчета нагрузок на оси транспортного средства.

1. Тягач

Начнем с рассмотрения стандартного тягача с двумя осями – передней и задней.

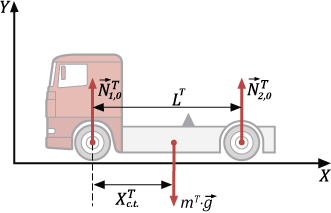


Рисунок 1. Тягаг

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/transport-articles/mechanics-freight

Согласно данному рисунку, на тягач действуют следующие 3 силы: сила тяжести , а также силы реакции опоры (первая ось) и (вторая ось). Индекс «0» означает, что мы рассматриваем только тягач, без присоединения к нему полуприцепа.

Исходя из условия, что сумма всех сил, действующих на тело, должна быть равна нулю, мы получаем следующее уравнение (в скалярных величинах):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.1) |

C практической точки зрения, показывает массу тягача, а - нагрузку на заднюю ось тягача без присоединенного к нему полуприцепа. Тогда мы можем записать уравнение для вычисления **нагрузки на первую ось тягача** на основании уравнения 1.1.:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.2) |

Теперь рассмотрим ось, которая проходит через переднюю ось тягача и направленную перпендикулярно плоскости рисунка (оси X). Так как мы придерживаемся условия, что тягач находится в состоянии покоя (или движется равномерно и прямолинейно), то можно сделать вывод, что он не вращается вокруг любой выбранной оси. Из этого следует, что он не вращается относительно оси, проходящей через переднюю ось тягача. Учитывая условие, что сумма моментов сил, действующих на тело, должна быть равна нулю, получаем следующее уравнение:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.3) |

Где – расстояние между осями тягача (добавить про случай с двумя осями), – расстояние от передней оси тягача до центра тяжести тягача. Также необходимо отметить, что сила не учитывается в уравнении 1.2 в силу того, что она приложена к той же точке, через которую проходит ось вращения. То есть расстояние между соответствующими прямыми (осью вращения и вектором силы) равно нулю и, соответственно, плечо этой силы относительно рассматриваемой оси равно нулю.

Также стоит отдельно выделить уравнение 2.2. относительно величины в следующем виде:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.4) |

Полученная формула позволяет, зная массу, расстояние между осями и нагрузку на заднюю ось тягача без полуприцепа, рассчитать расстояние от передней оси такого тягача до его центра тяжести.

1. Тягач с полуприцепом

Присоединение полуприцепа к тягачу также изменяет нагрузку на оси тягача в связи с тем, что масса полуприцепа давит на тягач.

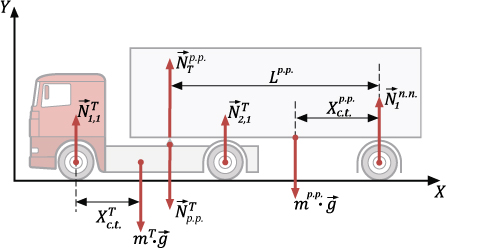


Рисунок 2. Система тягач и полуприцеп

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/transport-articles/mechanics-freight

Исходя из рис.2, мы можем написать уравнение условия равновесия для тягача и полуприцепа:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.5) |

Где – сила, с которой полуприцеп «давит» на тягач в точке их соединения.

С точки зрения практической применимости, данную формулу можно переписать следующим образом:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.6) |

Таким образом, с помощью формулы (6) можно вычислить силу, с которой полуприцеп без груза давит на тягач.

Далее рассмотрим систему пустой полуприцеп и тягач с точки зрения полуприцепа. Для начала, необходимо определить положение центра тяжести полуприцепа, для чего записываем уравнение условия равенства моментов сил, действующих на полуприцеп, относительно оси, которая проходит через заднюю ось полуприцепа:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.7) |

Где,

– расстояние от задней оси полуприцепа до центра тяжести,

– расстояние между задней осью полуприцепа и местом сцепки полуприцепа с тягачом («седлом»),

– модуль силы, полученной из уравнения 2.6.

Из уравнения 2.7. следует, что:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.8) |

Данная формула будет использоваться при рассмотрении полуприцепа с грузом.

Также на данном этапе можно вывести формулу для расчета **нагрузки на ось полуприцепа**, придерживаясь изначального условия о том, что у полуприцепа одна ось (как отмечалось выше, при невыполнении данного условия общая нагрузка делится пропорционально между всеми осями полуприцепа):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.9) |

1. Тягач с полуприцепом, в котором находится груз

В данном разделе рассматривается система тягач и полуприцеп в практических условиях, то есть с учетом находящегося в полупрципе груза. При этом предполагается, что рама полуприцепа является идеально жесткой, то есть нагрузка от груза распределяется равномерно по всей ее длине.

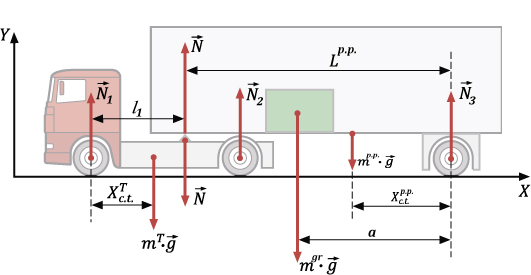


Рисунок 3. Система тягач и полуприцеп с грузом

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/transport-articles/mechanics-freight

Для начала запишем уравнения, которые обеспечивают выполнение условия равенства сил и моментов сил, действующих на тягач в данной системе:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.10) |
|  |  | (2.11) |

Где:

– нагрузка на переднюю ось тягач,

– нагрузка на заднюю ось тягача,

– сила, с которой полуприцеп в месте сцепки давит на тягач,

Далее запишем аналогичную пару уравнений, но уже для полуприцепа (условие равенства сил рассматривается относительно задней оси полуприцепа):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.12) |
|  |  | (2.13) |

Где:

– расстояние от задней оси полуприцепа до места сцепки с тягачом (см. Рисунок 3)

– расстояние от задней оси полуприцепа до центра тяжести груза.

Теперь мы можем, используя уравнения (четыре выше) выписать формулы для расчета нагрузки на все три оси транспортного средства.

Из уравнения (2.13):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.14) |

Из уравнения (2.12):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.15) |

Из уравнения (2.11):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.16) |

Наконец, из уравнения (2.10):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.17) |

Из данных уравнений становится понятно, что для изменения нагрузок на оси транспортного средства необходимо изменять параметр , который содержит один единственный параметр, который можно варьировать – это параметр .

Так как параметр изначально предполагает, что в полуприцепе находится один цельный груз, что на практике практически невыполнимо, необходима формула для расчета данного параметра при условии, что в полуприцепе находятся несколько грузов. Данная формула будет рассчитывать усредненное расстояние от центра тяжести груза до задней оси полуприцепа. При этом, конечно же, данное значение будет менее точное, чем в случае с одним грузом, однако это делает формулы практически применимыми.

Итак, формула для параметра для случая, когда в полуприцепе находится несколько грузов выглядит следующим образом:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.18) |

Где:

- масса k-й секции полуприцепа,

— расстояние от центра тяжести k-го груза до задней оси полуприцепа.

При этом предполагается, что каждый груз представляет из себя коробку, внутри которой вес будет распределен равномерно. Таким образом, центр тяжести каждой «коробки» находится на середине ее ширины, то есть будет равен половине геометрического размера стороны коробки, которая параллельна борту полуприцепа.

### § 2.1.1 Необходимые исходные параметры для расчета

Так как абсолютно каждая расчетная задача предполагает наличие определенных исходных данных, данный случай не исключение. Более того, для проведение точных расчетов потребуется знать данные из технического паспорта транспортного средства, ведь иначе расчеты будут искажены и не будут соответствовать действительности. При этом предполагается, что при необходимости возможно взять некое «стандартное» транспортное средство, для которого всегда проводить расчеты, но при этом корректировать соответствующим образом ограничения по нагрузкам на оси.

Итак, для расчета нагрузок на оси транспортного средства необходимо знать следующие исходные данные:

* Длина полуприцепа
* Расстояние между осями полуприцепа (сдвоенными/строенными)
* Расстояние от начала полуприцепа до места сцепки с тягачом
* – расстояние между осями тягача
* – расстояние от передней оси тягача до точки сцепки с полуприцепом
* – расстояние от задней оси полуприцепа до места сцепки с тягачом
* – нагрузка на переднюю ось тягача без полуприцепа
* – нагрузка на заднюю ось тягача без полуприцепа
* – нагрузка на переднюю ось тягача с пустым полуприцепом
* – нагрузка на заднюю ось тягача с пустым полуприцепом
* – собственная масса полуприцепа
* – собственная масса тягача

Таким образом, зная данные параметры можно, используя выведенные выше формулы, расчитать нагрузку на все оси заданного транспортного средства.

В качестве дополнительного усовершенствования инструмента возможно создать некие типовые модели транспортных средств, которые использует компания для своих перевозок, и занести эти данные в мастерданные, чтобы потом притягивать их по мере необходимости. Данная функция будет более подробно описана в следующих параграфах.

## § 2.2. Рассматриваемые транспортные средства и контейнеры

Как правило, для наземных перевозок грузов используются стандартные транспортные средства, однако бывают случаи, когда приходится преодолевать большое расстояние по суши с контейнерами, которые предназначаются для дальнешей морской переправы. В таких случаях, необходимо контролировать нагрузки на оси транспортного средства, которое перевозит контейнеры. Как правило, контейнеры перевозятся так называемыми платформами, которые по своей сути представляют собой систему тягач и полуприцеп, где полуприцеп является открытым и представляет из себя платформу, на которую крепится контейнер или контейнеры, если их несколько.

В связи с тем, что по своей конструкции контейнер практически не отличается от полуприцепа, все формулы, указанные в главе 2.2, работают и для контейнерных перевозок. При этом, конечно же, необходимо понимать, что при использовании контейнеров могут возникнуть сложности с получением данных по весу пустых контейнеров и той нагрузке, которые они оказывают на оси платформы транспортного средства. Наилучшим решением будет взвешивание транспортного средства с пустым контейнером каждого типа с целью определить нагрузку на оси без груза.

Итак, в последующих параграфах будет представлено подробное описание основных видов транспортных средств и контейнеров, которые рассматриваются в рамках данной работы. Иллюстрации транспортных средств заимствованы с сайта компании VDNK[[26]](#footnote-26).

### § 2.2.1. Транспортные средства

Многие перевозчики используют различные типы транспортных средств для осуществление автомобильных перевозок. Каждое транспортное средство имеет свои отличительные особенности, которые необходимо учитывать при построении инструмента для расчета нагрузок на оси.

Далее будут представлены основные виды используемых транспортных средств и представлены иллюстрации каждого из них, а также описаны основные особенности каждого.

* Двуосный тягач и трехосный полуприцеп

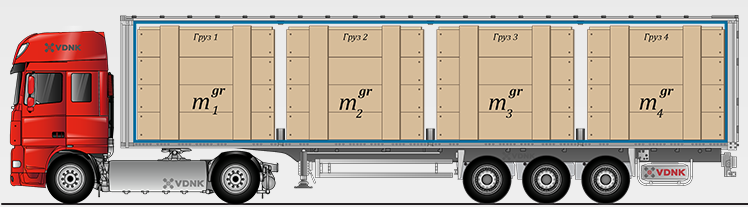


Рисунок 4. Двуосный тягач и трехосный полуприцеп

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload

Наиболее распространенное транспортное средство, используемое перевозчиками как в России, так и за рубежом. Представляет из себя тягач с двумя одиночными осями, расстояние между которыми, как правило, составляет более 2,5 метров, а также полуприцеп с тремя осями, расстояние между которыми может быть от менее одного метра до более 1,8 метров.

* Двуосный тягач и двуосный полуприцеп

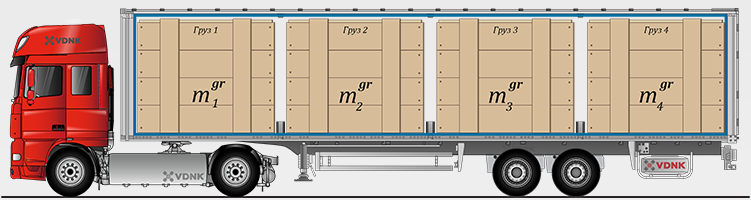


Рисунок 5. Двуосный тягач и двуосный полуприцеп

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload

Наиболее редко встречающийся тип транспортного средства в связи с уникальностью двуосных полуприцепов, которые почти не используются для грузовых перевозок в связи со своей малоэффективностью (с точки зрения безопасности, их опасно загружать до полной вместимости). Параметры колесной базы такие же, как и системы двуосный тягач и трехосный полуприцеп, за исключением наличия только двух осей у полуприцепа.

* Трехосный тягач и трехосный полуприцеп

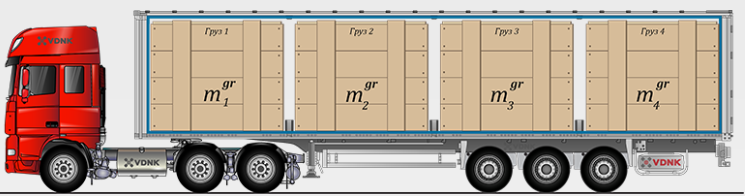


Рисунок 6. Трехосный тягач и трехосный полуприцеп

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload

Менее распространенное транспортное средство, которое рационально использовать при необходимости перевезти более тяжелые грузы, так как в данном случае распределение нагрузки на оси тягача будет происходить на большее количество осей. Представляет из себя тягач с тремя осями, две из которых объеденены в сдвоенную «тележку» с расстоянием между осями от менее метра до более 1,8 метров, а первая ось является одиночной. Полуприцеп имеет три оси с аналогичным расстоянием между осями.

* Трехосный тягач и двуосный полуприцеп

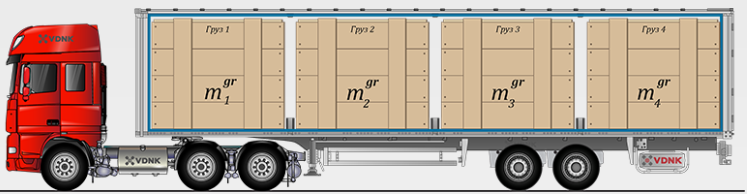


Рисунок 7. Трехосный тягач и двуосный полуприцеп

Источник: http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload

Также достаточно малораспространненое грузовое транспортное средство в связи с тем, что двуосные полуприцепы малоосообразны для грузовых перевозок. Исключение составляют сыпучие грузы, которые перевозятся в транспортных средствах, где длина полуприцепа намного меньше стандартного. Представляет из себя тягач с тремя осями, две из которых объеденены в сдвоенную «тележку» с расстоянием между осями от менее метра до более 1,8 метров, а первая ось является одиночной. Полуприцеп имеет две оси с аналогичным расстоянием между осями.

* Автопоезд-сцепка

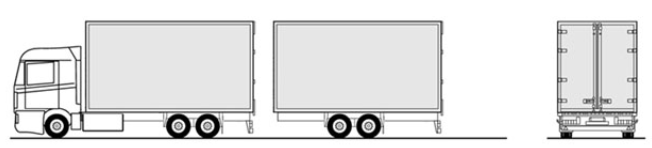


Рисунок 8. Автопоезд – сцепка

Источник: http://tk-edelis.ru/evrofury/razmer-fury-stcepki-110-ka-120-ka-polupritcep-pritcep-avtopoezd

Грузовое транспорстное средство, позволяющее перевезти максимально возможный объем груза. Оно отличается тем, что состоит из двух частей: автомобиля (тягач и прицеп) и полуприцепа. При этом полезный объем такого транспортного средства может варьироваться в зависимости от параметром прицепа и полуприцепа.

Вне зависимости от количества осей у тягача/полуприцепа, грузовые транспортные средства различаются по метрическим характеристикам, таким как: высота полуприцепа, длина полуприцепа, объем полуприцепа. В связи с этим в таблице 1 представлены наиболее распространенные и подходящие под рассматриваемую модель грузовые транспортные средства с указанием их метрических характеристик[[27]](#footnote-27).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Название ТС | Длина, м | Ширина, м | Высота, м | Объем, м3 | Объем, паллетомест |
| EURO («Евро») | 13,6 | 2,45 | 2,45 | 82 | 33 |
| JUMBO («Джамбо») | 13,8 | 2,45 | 2,45/3 | 96/125 | 33 |
| MEGA (“Мега») | 13,6 | 2,45 | 3 | 100 | 33 |
| Автопоезд-сцепка (110 м3) | 7,1 (прицеп) + 8 (п/прицеп) | 2,45 | 2,95 (прицеп) + 3 (п/прицеп) | 110 | - |
| Автопоезд-сцепка (120 м3) | 8 (прицеп) + 8 (п/прицеп) | 2,45 | 2,95 (прицеп) + 3 (п/прицеп) | 120 | - |

Таблица 1. Метрические характеристики транспортных средств

Источник: <http://www.charoit.net/index.php?page=articles/tipi_gabaritnie_razmeri_gruzovih_kuzovov>

### § 2.2.2. Контейнеры

Как уже отмечалось ранее, контейнерные перевозки также занимают большой объем транспортных перевозок, так как зачастую чтобы доставить контейнер до морского порта требуется преодолеть значительные расстояния по суше. Таким образом, рассматриваемая модель также учитывает контейнерные перевозки, ведь нагрузка на ось имеет место и у транспортных средств, которые перевозят контейнеры (так называемые «контейнеровозы»).

Итак, в данной работе будут рассматриваться следующие виды контейнеров[[28]](#footnote-28):

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Название контейнера | Длина,м | Ширина, м | Высота, м | Объем контейнера, м3 | Вес пустого контейнера, кг |
| Контейнер 20 футов (20' DRY CONTAINER) | 5,898 | 2,350 | 2,390 | 33 | 2200 |
| Контейнер 40 футов (40' DRY CONTAINER) | 12,035 | 2,350 | 2,393 | 67 | 3700 |
| Контейнер 40 футов высокий (40' HC DRY CONTAINER) | 12,030 | 2,350 | 2,690 | 76 | 3930 |
| Контейнер 45 футов (45' DRY CONTAINER) | 13,556 | 2,352 | 2,695 | 86 | 4590 |

Таблица 2. Метрические характеристики контейнеров

Источник: <http://www.tnspb.ru/uslugi/morskie-perevozki/tipy-kontejjnerov.html>

Основное отличие данной таблицы от таблицы с полуприцепами заключается в том, что она содержит столбец «Вес пустого контейнера». Данная информация необходима для того, чтобы правильно рассчитать нагрузку на оси транспортного средства, которое будет перевозить контейнер. Так как полуприцепы представляют собой цельные структуры, а контейнеры возят на «платформах», необходимо при рассчете нагрузок на оси «платформ» учитывать веса контейнеров.

### § 2.2.3. Выбор оптимального транспортного средства

Для того, чтобы избежать перегруза по осям и при этом перевозить максимально возможный объем груза, необходимо понимать, какое транспортное средство является наиболее оптимальным с данной точки зрения. Так как транспортные средства отличаются исключительно расположением и количеством осей, то и сравнения будет проводиться по данным признакам.

Что же касается контейнеров, то для них делать такое сравнения нецелесообразно в силу того, что они имеют разные объемы, в связи с чем каждый случай необходимо рассматривать индивидуально и общего правила здесь не вывести. Также, общее правило для транспортных средств будет работать и для контейнеров в том смысле, что количество осей у тягача и платформы, на которых перевозятся контейнеры, собственно и определяют допустимый объем к погрузке в контейнер без превышения нагрузок на оси.

Итак, для проведения сравнения допустим следующую ситуацию. Пусть номинальная нагрузка на вторую ось тягача – 10 000 кг, а на ось полуприцепа – 12 000 кг[[29]](#footnote-29). При этом допустимые нагрузки на оси взяты с учетом предположения, что транспортное средство движется по дороге с допустимыми ограничениями 10 тонн/ось, а расстояние между осями как тягача, так и полуприцепа составляет до 1,3 метров[[30]](#footnote-30). Тогда нагрузки на оси транспортного средства будет распределяться следующим образом:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вид ТС | Нагрузка на ось тягача, кг | Допустимая нагрузка на ось, кг | Запас по нагрузке на ось, кг | Нагрузка на ось п/прицепа, кг | Допустимая нагрузка на одну ось п/прицепа, кг | Запас по нагрузке на ось, кг | **Общий запас по нагрузкам на оси, кг** |
| Двуосный тягач и двуосный п/прицеп | 10 000 | 13 000 | 3000 | 12 000 | 13 000 | 1000 | **4000** |
| Двуосный тягач и трехосный п/прицеп | 10 000 | 13 000 | 3000 | 12 000 | 18 000 | 6000 | **9000** |
| Трехосный тягач и двуосный п/прицеп | 10 000 | 18 000 | 8000 | 12 000 | 13 000 | 1000 | **9000** |
| Трехосный тягач и трехосный п/прицеп | 10 000 | 18 000 | 8000 | 12 000 | 18 000 | 6000 | **14000** |

Таблица 3. Сравнение транспортных средств по нагрузкам на оси

Источник: составлено автором работы

Из представленной таблицы видно, что максимальный запас по нагрузкам на оси обеспечивает трехосный тягач и трехосный полуприцеп.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальный вариант перевозки тяжелых грузов при необходимости остаться в рамках допустимых ограничений по нагрузкам на оси – трехосный тягач и трехосный полуприцеп (трехосная платформа для контейнеров). Это связано с тем, что в данном случае распределение нагрузки на оси происходит на наибольшее количество осей, а так как нагрузка распределеятся равномерно на все оси, то перевеса по осям не происходит.

К сожалению, однако, данные транспортные средства встречаются очень редко и в связи с этим компаниям-производителям и компаниям-перевозчикам приходится оптимизировать процесс перевозки при помощи других инструментов, как, например, описываемый в данной работе калькулятор.

## § 2.3. Принятые допущения и ограничения

Прежде чем перейти к описанию математической модели необходимо определить некоторые допущения, которые предопределяют созданную модель. Данные допущения были введены в связи с тем, что модель строилась под конкретные предпочтения и пожелания ООО «Петро».

### § 2.3.1. Специфические ограничения

Во-первых, рассматривается один тип грузов – универсальные коробки разных размеров, при этом средний размер составляет 500 мм × 500 мм × 500 мм, а вес коробки составляет не более 20 килограмм.

Во-вторых, укладка данных коробок происходит вручную, без использования специальной техники и без паллет. Это делается для того, чтобы оптимизировать укладку с учетом ограниченного пространства (паллеты не позволяют использовать весь полезный объем транспортного средства).

В-третьих, подача коробок со склада для погрузки осуществляется партиями в паллетизированном виде. То есть укладка коробок в транспортное средство происходит следующим образом: загружается партия 1, далее партия 2, далее партия 3 и так далее. То есть создаваемый инструмент должен учитывать данное условие и предлагать планы погрузки, которые не предполагают смешивание партий в процессе погрузки в транспортное средство. При этом под партией подразумевается определенне количество коробов с одинаковым номером SKU.

В-четвертых, клиенты компании определяют необходимое им количество товара (коробок) определенного вида, то есть модель должна обеспечивать укладку именно такого количества, не больше и не меньше. При этом, по требованию компании, инструмент должен иметь возможность загружать один вид товара до максимально возможной загрузки транспортного средства, чтобы не пришлось везти «воздух». То есть, клиент компании может запросить 100 коробов типа 1, 200 коробов типа 2 и максимально возможное количество коробов типа 3. Данную оптимизационную задачу и должен решать создаваемый инструмент.

### § 2.3.2. Общие допущения

Как уже отмечалось в главе 2, формулы для расчета нагрузок на оси предполагают, что в полуприцепа находится один цельный груз. Так как данное предположение практически никогда не выполняется на практике, необходимо ввести соответсвующие допущения, которые позволят использовать выведенные формулы на практике.

Наиболее оптимально решить данную задачу путем разделения транспортного средства на четыре равные части, каждая из которых будет уметь собственный центр тяжести. Далее, необходимо учесть расстояние от центра тяжести каждой из частей полуприцепа до раздней оси полуприцепа и найти среднее значение Однако, с учетом пожеланий менеджеров, ответственных за складские процессы ООО «Петро», было принято решение разделить полуприцеп на 2 равные части. При этом процедура расчетов никак не отличается от аналогичной ситуации с 4 равными частями, а разница в получаемых значениях составляет менее одного процента.

Параметр α при этом будет расчитываться по следующей формуле:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.18.1) |

Где:

- масса 1-й секции полуприцепа/контейнера

- масса 2-й секции полуприцепа/контейнера

— расстояние от центра тяжести 1-го груза (1-й секции до задней оси полуприцепа)

— расстояние от центра тяжести 2-го груза (2-й секции до задней оси полуприцепа).

Также необходимо выдвинуть предположение, что грузы будут уложены в транспортное средство равномерно, что обеспечит нахождение центра тяжести каждой такой коробки на середине ее стороны, которая будет параллельна полу полуприцепа при укладке. Равномерность достигается при равенстве объемов двух частей полуприцепа, на которые мы мысленно его разделям.

## § 2.4. Математическая постановка задачи

Как уже было описано выше, математически решаемая задача представляет из себя задачу дискретного программирования, когда необходимо максимизировать целевой параметр при заданных ограничениях и условии неотрицательности и целочисленности переменных. В данном случае математическую постановка задачи будет выглядеть следующим образом:

При следующих базовых ограничениях:

И следующих дополнительных ограничениях:

…

Где:

– количество коробов типа «k», загруженных в полуприцеп транспортного средства

N – множество натуральных чисел

– объем первой секции полуприцепа/контейнера

– объем второй секции полуприцепа/контейнера

– допустимая погрешность условия равномерности,

– объем загруженного в транспортное средство груза

– допустимый объем транспортного средства

– нагрузка на первую ось тягача

– нагрузка на вторую ось тягача/первую ось полуприцепа

- нагрузка на вторую ось полуприцепа/третью ось транспортного средства

– допустимая нагрузка на первую ось тягача

– допустимая нагрузка на вторую ось тягача/первую ось полуприцепа

– допустимая нагрузка на вторую ось полуприцепа/третью ось транспортного средства

– количество коробов типа «k», которое пользователь указывает в качестве необходимого к погрузке.

При этом ограничения по количеству загружаемых коробов являются дополнительными, так как они могут не всегда присутствовать при проведении реальных расчетов. Так, в данных ограничениях нет необходимости, если загружается всего лишь один тип коробов до максимально возможного количества.

Таким образом, описанную выше задачу и требуется решить с помощью разрабатываемого калькулятора. Далее более подробно описываются дополнительные ограничения, задаваемые для данной модели, а также как эти ограничения внести в калькулятор и что указывать в качестве целевой функции.

# Глава 3. Особенности программной реализации разработанного решения задачи

Построенную математическую модель было необходимо реализовать через простой, но действенный, инструмент. При этом для ООО «Петро» основным требованием являлось простота использования инструмента. Это создало предпосылки для использования приложения к Microsoft Excel под названием Solver Add-in, описание которого и будет представлено ниже.

Также данная глава содержит практическую информацию относительно того, как данную модель представить в Microsoft Excel таким образом, чтобы Solver Add-in мог ее решить. Как показал опыт, это одна из самых сложных частей данной работы и именно поэтому ей будет уделяться целая глава.

## § 3.1. Описание Solver Add-in

Калькулятор Solver (далее – Solver) позволяет решать задачи как линейной, так и нелинейной оптимизации (линейного и нелинейного программирования) с помощью различных заложенных в него методов нахождения оптимальных решений. По своей сути он представляет собой калькулятор, который подбирает значения пока не найдется наиболее оптимальное решение с учетом целевой функции и заданных ограничений.

Данное приложение является наиболее оптимальным для решаемой задачи сразу по нескольким причинам. Во-первых, оно не привязано ни к какому дополнительному программному обеспечению и не требует установки каких-либо приложений (подразумевается, что стандартный пакет Microsoft Office есть у любой компании). Во-вторых, его функционал соответствует всем требованиям, предъявляемым к решению данной задачи. В-третьих, данный инструмент является очень простым в использовании и не предполагает никаких лишних действия от конечного пользователя. Последний фактор оказался ключевым при выборе инструмента, так как это было одним из ключевых требований представителей компании ООО «Петро».

Диалоговое окно данного инструмента выглядит следующим образом:

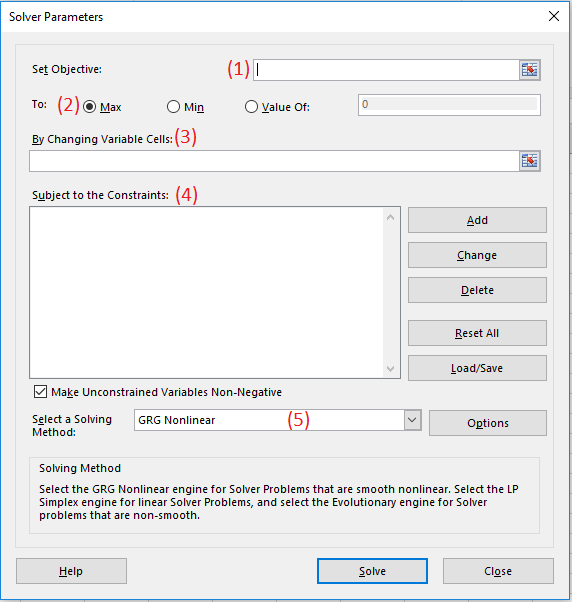


Рисунок 9. Диалоговое окно Solver Add-in

Окно (1) предполагает ввод целевой функции, с которой Solver в дальнейшем будет работать. Окно (2) предполагает выбор одно из трех возможных вариантов направления оптимизации целевой функции: максимизация, минимизация или равенство определенному значению. Окно (3) предполагает ввод ячеек, где содержатся переменные, которые Solver будет менять в поисках оптимального значения целевой функции. Окно (4) включает в себя ограничения на переменные, которые пользователь устанавливает согласно созданной математической модели. Наконец, окно (5) предполагает выбор метода поиска оптимального решения: GRG Nonlinear (для нелинейных зависимостей), LP Simplex (для линейных зависимостей) или Evolutionary (для негладких функций).

Далее будет предоставлено подробнейшей описание того, как данная модель была реализована в Microsoft Excel и какие параметры вводились как для инструмента Solver, так и непосредственно в Microsoft Excel в виде исходных данных.

### § 3.1.1. Целевая функция для Solver

В качестве целевой функции для Solver необходимо задать ячейку, которая будет содержать формулу, рассчитывающую общее количество загруженных в транспортное средство коробов. Тут важно понимать, что:

* Возможно задать только один целевой параметр, поэтому ячейка должна рассчитывать уже окончательное значение, с которым Solver будет работать.
* Целевая ячейка обязательно должна содержать формулу, которая будет учитывать изменение переменных, указанных далее.

В данном случае это делается следующим образом:

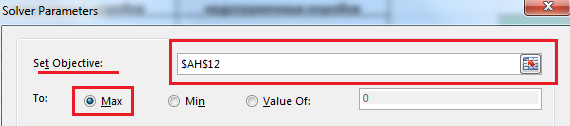


Рисунок 10. Диалоговое окно Solver Add-in (Целевая функция)

Ячейка AH12 содержит формулу, рассчитывающую общее количество загруженных в машину коробов. Данная формула выглядит следующим образом:

Где – число загруженных в транспортное средство коробов типа k.

Так как нам необходимо загрузить максимально возможное количество с учетом ограничений, то мы максимизируем данное значение.

### § 3.1.2. Указание переменных для Solver

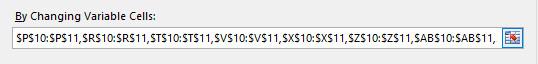


Рисунок 11. Диалоговое окно Solver Add-in (Переменные)

В качестве переменных указывается количество коробов каждого типа, загружаемых в первую и вторую секции транспортного средства соответственно. Важно понимать, что Solver может распределить один тип короба в разные секции (что недопустимо из-за особенности погрузки, принятых в компании ООО «Петро» - см. Параграф [2.3.1.](#_§_2.3.1._Специфические)), поэтому каждая переменная должна быть разделена на две секции, то есть получается своего рода прямоугольная матрица следующего вида:

Где

– количество коробов типа «k», загруженных в первую секцию полуприцепа/контейнера.

– количество коробов типа «k», загруженных во вторую секцию полуприцепа/контейнера.

– количество коробов типа «k», загруженных в полуприцеп транспортного средства.

При этом стоит отметить, что по договоренности с ООО «Петро» было принято решение в целях получения более точных значений «разрешить» Solver распределять один тип короба на две секции. Такое распределение коробов по транспортному средству не оказывает значительного влияния на процесс погрузки в связи с тем, что если Solver и делит один тип короба на две секции, то ответственные за погрузку работники это понимают и загружают данную SKU на стыке двух секций. Таким образом получается, что общий процесс погрузки не нарушается и погрузка происходит последовательно, не меняя SKU в процессе.

### § 3.1.3. Указание ограничений для Solver

Это, пожалуй, самая важная часть, которой требуется уделить наиболее пристальное внимание и быть уверенным в правильности вводимых ограничений. Объясняется это тем, что без ограничений решаемая задача превращается в задачу максимизации числа без каких-либо дополнительных условий, которую можно решить простым калькулятором. Особенность же калькулятора Solver заключается в том, что он позволяет найти максимум при выполнении определенных ограничений.

Итак, в диалогом окне введенные ограничения выглядят следующим образом:

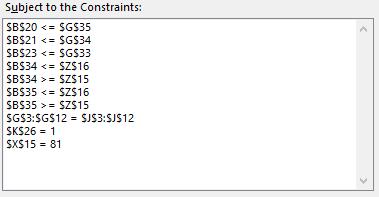


Рисунок 12. Диалоговое окно Solver Add-in (Ограничения)

Ограничения (1) – (3) обеспечивают выполнение основных ограничений по нагрузкам на ось, то есть последние три ограничения в математической постановке задачи.

Ограничения (4) – (7) обеспечивают условие **равномерной погрузки**. Однако необходимо отметить, что в силу особенности погрузки данное условие было скорректировано и получается, что объем секции 1 равен объему секции 2 (+/- до 1 м3). В математическом виде это выглядит следующим образом:

Где

– объем загруженного транспортного средства

– объем загруженной секции 1

– объем загруженной секции 2

- допустимая погрешность условия равномерности,

Сделано это именно таким образом по причине того, что примерно один кубический метр пространства является своего рода максимальной «погрешностью», с которой ответственные за погрузку сотрудники компании могут реально загрузить продукцию.

Предполагать, что груз будет загружен вручную абсолютно равномерно было бы слишком амбициозно, в связи с чем исходное предположение было скорректировано в Solver.

Ограничение (8) является дополнительным и предполагает, что пользователь может указать определенное количество коробов какого-либо продукта. В данном случае Solver загрузит (по возможности) именно это количество, не больше и не меньше. Данное ограничение соответствует дополнительным ограничениям в математической модели.

Ограничение (9) означает, что сумма объемов заполненных секций 1 и 2 должна быть равна 81 (подразумевается 81 м3). То есть данное ограничение обеспечивает выполнение одного из базовых ограничений математической модели. При этом значение 81 кубический метр было выбрано не случайно – это стандартный объем полуприцепов, которые наиболее часто используются на регулярных перевозках. Однако следует отметить, что в силу особенности работы Solver это ограничение необходимо записывать в виде равенства, а не в виде неравенства, как это было описано в математической моделе.

Существуют несколько дополнительных параметров у калькулятора Solver, которые работают по умолчанию и которые нет необходимости менять. Это, во-первых, условие неотрицательности переменных (то есть количество загружаемых коробов не может быть отрицательным, хотя может быть равно нулю).

Данное условие выглядит в диалоговом окне Solver следующим образом:



Рисунок 13. Диалоговое окно Solver Add-in (Условие неотрицательности)

Галочка должна быть проставлена.

Во-вторых, метод, с помощью которого будет рассчитывать требуемые значения Solver, должен быть выбран «Simplex LP», то есть метод, предназначенный для решения задач с линейными зависимостями. В данном случае все зависимости линейные, описываемые формулами из параграфа [2.1](#_§_2.1._Физические).

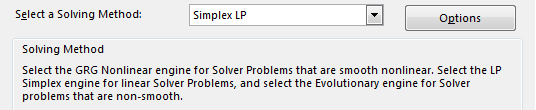


Рисунок 14. Диалоговое окно Solver Add-in (Выбор метода решения)

На этом диалоговое окно Solver должно быть полностью заполнено и можно его запускать для расчета нажатием кнопки «Solve» в диалоговом окне. При условии правильности введеных параметров Solver должен получить необходимые значения, которые можно использовать как конечный план погрузки в транспортное средство. Пример заполненного диалогового окна Solver представлен в Приложении 5.

## § 3.2. Задаваемые и рассчитываемые данные для модели

### § 3.2.1. Задаваемые параметры транспортного средства

Для начала необходимо определить и внести исходные параметры. Список параметров указан в главе [2.1.1](#_§_2.1.1_Необходимые). На данный момент в Microsoft Excel есть таблица «Задаваемые параметры», куда вводятся значения данных параметров в зависимости от выбранного транспортного средства или вручную. Таким образом, выглядит это следующим образом:



Таблица 4. Задаваемые параметры транспортного средства

Источник: составлено автором

Данная информация содержится в ячейках A2:B13.

Также, у пользователя инструмента есть возможность внести данные по транспортным средствам на специально выделенном рабочем листе Microsoft Excel под названием «Мастерданные по ТС». Данный лист представляет из себя таблицу матричного вида, которая ничем не отличается от представленной таблице выше, кроме того, что там не один столбец с данными, а бесконечное количество – в данные столбцы и вводятся названия транспортных средств, а затем ниже проставляются значения по всем необходимым параметрам.

Данная возможность позволяет в дальнейшем выбирать используемое транспортное средство и все задаваемые параметры будут автоматически притягиваться с данного рабочего листа на основной с помощью функции ИНДЕКС (ПОИСКПОЗ, ПОИСКПОЗ). Таким образом, пользователю лишь необходимо выбрать транспортное средство из выпадающего списка, который будет включать в себя все имеющиеся в мастерданных транспортные средства.

Выглядит это следующим образом:



Таблица 5. Тип ТС

Источник: составлено автором

Ячейка L4 позволяет выбрать из выпадающего списка необходимое транспортное средство. При этом выбрать можно только то транспортное средство, данные по которому уже занесены в таблицу с листа «Мастерданные по ТС». То есть пользователю предварительно будет необходимо проверять наличие необходимого ему транспортного средство в мастерданных и своевременно обновлять данные.

Примечание: так как задаваемые данные различаются в зависимости от предоставленного к погрузке транспортного средства, то на текущий момент были введены данные, которые дают максимальную изначальную нагрузку на ось. Это сделано для того, чтобы полученные в итоге значения если и отличались от реальных, то в меньшую сторону (таким образом гарантируется отсутствие перегруза осей).

### § 3.2.2. Задаваемые параметры грузов

В текущей версии калькулятора есть рабочий лист с названием «Мастерданные по материалам», в котором содержатся данные по массам и объемам всех имеющихся в компании SKU. Данная таблица может обновляться ключевыми пользователями, а данные с данного рабочего листа будут перетягиваться на основной лист для проведения расчетов автоматически. Такая форма задания параметров грузов позволяет пользователю сэкономить большое количество времени, так как в момент расчета плана погрузки все данные по SKU уже будут в системе и останется всего лишь выбрать необходимые из соответствующего списка.

Таким образом, масса и объем SKU притягиваются с данного листа с помощью функции ВПР. В силу особенности расчетов Solver данную функцию необходимо использовать вместе с функцией ЕСЛИОШИБКА в следующем формате: ЕСЛИОШИБКА(ВПР;0).

Использование дополнительной функции ЕСЛИОШИБКА обусловлено спецификой решаемой задачи. Так как изначально задано 10 переменных, а единовременно может использоваться любое количество от 1 до 10, то без использования данной функции Solver будет выдавать ошибку при попытке расчета. Это обусловлено тем, что Solver будет пытаться использовать ячейки, где вместо значение будет находиться ошибка. Использование функции ЕСЛИОШИБКА позволяет ввести нулевые значения во все ячейки, где значения и не должно быть согласно исходным данным.

Данная информация содержится в ячейках N15:Q24



Таблица 6. Задаваемые параметры грузов

Источник: составлено автором

Как видно из таблицы выше, она также содержит информацию по плотностям каждого из коробов. Это вспомогательные данные, которые позволяют по необходимости понять ответственному за погрузку какие короба следует по возможности укладывать первыми, а какие последними. При погрузке коробов разных объемов и весов следует придерживаться следующего общего правила: сначала грузить менее плотные короба, а потом более плотные. Это правило обусловлено тем, что наиболее часто перегружаются именно передние оси транспортного средства, то есть на них необходимо по возможность укладывать как можно меньше коробов. При этом равномерность погрузки не позволяет оставить пустое место в передней части транспортного средства, однако короба с меньшей плотностью занимают больший объем при меньшей массе, что позволяет снизить общую нагрузку на передние оси.

### § 3.2.3. Задаваемые ограничения по нагрузкам на оси

В первую очередь необходимо отметить, что ограничения по нагрузкам на оси зависят как от расположения осей у транспортного средства, так и от дорог, по которым данное транспортное средство передвигается. Данные ограничения определяются Постановлением Правительства РФ № 272. В Microsoft Excel данные ограничения представлены на отдельном листе – «Мастерданные по дорогам» в форме адаптированной таблицы. При этом предусмотрены все разновидности транспортных средств, определяемых транспортным законодательством РФ.

Информация с листа «Мастерданные по дорогам» выглядит следующим образом:



Таблица 7. Ограничения по нагрузкам на оси транспортного средства

Источник: составлено автором

Данная таблица содержит ограничения по нагрузкам на оси для всех описанных в главе 2.3.1 транспортных средств в зависимости от колесной базы и дорог, по которым данное транспортное средство будет передвигаться. Данная таблица не требует никакой дополнительной обработки и должна быть скрыта от конечного пользователя (во избежание ненужных изменений).

Информация из данной таблицы автоматически перетягивается через функцию ВПР на основной лист Excel в следующую таблицу:



Таблица 8. Рассчитанная нагрузка на оси ТС

Источник: составлено автором

В данной таблице ячейки F33:F35 отображают исчисленную нагрузку на оси транспортного средства, при этом значения изначально не нулевые в силу того, что тягач и пустой полуприцеп имеют определенную ненулевую нагрузку на все соответствующие оси.

Ячейки G33:G35 содержат данные, взятые из таблицы с листа «Мастерданные по дорогам».

Ячейки H33:H35 содержат так называемый «Запас по нагрузке на ось» в килограммах, рассчитываемый как разница между допустимой нагрузкой на ось и исчисленной. Данный столбец является исключительно информационным и создан для того, чтобы пользователь мог примерно представить, как распределены нагрузки на оси с учетом рассчитанного плана погрузки и какая именно ось не позволяет загрузить больший объем груза.

### § 3.2.4. Задаваемые ограничения по количеству загружаемых коробов

При необходимости пользователь может указать количество коробов каждого SKU, которое надо загрузить в транспортное средство. Данная информация вносится в ячейки F3:12. Ячейки G3:G12 показывают фактическое количество загруженных коробов согласно построенному плану погрузки. Ячейки H3:H12 показываю количество недогруженных коробов, то есть разницы между соответствующими ячейки из столбцов G и F.



Таблица 9. Минимальный объем заказа по каждому SKU

Источник: составлено автором

При этом в силу особенностей работы Solver, ячейки J3:12 содержат функцию IF (ЕСЛИ в русскоязычном Экселе), которые обеспечивают выполнения данного правила только для необходимых SKU, то есть чтобы Solver не приравнивал количество всех SKU без заданного минимального количества к нулю.



Таблица 10. Как задавать минимальный объем заказа в Microsoft Excel

Источник: составлено автором

SKU без данных ограничений будут грузиться до максимально возможной вместимости с учетом базовых ограничений. При этом рекомендуется всегда вводить необходимое количество грузов и оставлять не больше одного SKU без минимального значения, так как в противном случае Solver будет максимизировать SKU с минимальной плотностью, при этом все остальные не будут «погружены» калькулятором Solver в транспортное средство.

### § 3.2.5. Расчет количества загруженных коробов

Ячейки N10:AG11 представляют из себя матрицу, описываемую в главе [3.1.2.](#_Часть_3.1.2._Указание) Стоит отметить, что в качестве переменных для Solver используются следующие ячейки:

P10:11, R10:11, T10:11, V10:11, X10:11, Z10:11, AB10:11, AD10:11, AF10:11, AH10:11.



Таблица 11. Количество загруженных в ТС коробов по секциям

Источник: составлено автором

В матричной форме это выглядит следующим образом:

Ячейки P12, R12, T12, V12, X12, Z12, AB12, AD12, AF12, AH12 суммируют значения по ячейкам P10:P11, R10:R11 и т.д. вплоть до AH10:AH11, то есть они считают количество коробов каждого типа, загруженных в транспортное средство. Ячейка AI32 суммирует значения ячеек P12, R12, T12, V12, X12, Z12, AB12, AD12, AF12, AH12 и получает общее количество коробов, загруженных в транспортное средство.

Такое разделение по ячейкам необходимо для того, чтобы Solver не распределял все короба в одну секцию, а разделил их наиболее оптимальным образом.

### § 3.2.6. Расчет массы и объема

Масса и объем относятся к общим параметрам, которые рассчитывает Solver. В Excel они представлены в таблице следующего вида:



Таблица 12. Расчет массы и объема груза

Источник: составлено автором

Ячейки B32:33 содержат формулы, рассчитывающие массы загруженных секций 1 и 2. Другими словами, они рассчитывают массу загруженного груза в каждой из секций полуприцепа.

Данные формулы в общем виде выглядят следуюшим образом:

Где

- масса загруженной секции 1,

– масса загруженной секции 2,

– количество коробов типа «k», загруженных в первую секцию полуприцепа транспортного средства,

– количество коробов типа «k», загруженных во вторую секцию полуприцепа транспортного средства,

– масса соответствующего короба типа «k».

Ячейка B35 содержит формулу, рассчитывающую общую массу загруженного в транспортное средство груза по следующей формуле:

Где

– количество коробов типа «k», загруженных в транспортное средство,

– масса соответствующего короба типа «k».

Ячейки B36:37 содержат формулы, рассчитывающие объемы загруженных секций 1 и 2. Другими словами, они рассчитывают объем загруженного груза в каждой из секций полуприцепа.

Данные формулы в общем виде выглядят следующим образом:

Где

– объем загруженной секции 1,

– объем загруженной секции 2,

– количество коробов типа «k», загруженных в первую секцию полуприцепа транспортного средства,

– количество коробов типа «k», загруженных во вторую секцию полуприцепа транспортного средства,

– объем соответствующего короба типа «k».

Ячейка B38 содержит формулу, рассчитывающую общий объем загруженного в транспортное средство груза по следующей формуле:

Где

– объем загруженного в транспортное средство груза,

– объем загруженной секции 1,

– объем загруженной секции 2.

### § 3.2.7. Расчет параметра α

Особое внимание необходимо уделить параметру α, так как от его расчета зависит непосредственно нагрузка на оси транспортного средства. Для его расчета, как было описано в главе 2.2., необходимо знать расстояние от центра тяжести каждой секции полуприцепа до задней оси транспортного средства, а также массу каждой из секций полуприцепа.

Ячейки B29 и B30 рассчитывают расстояния от центра тяжести первой и второй секции соответственно до задней оси транспортного средства. Порядок расчета примерно следующий:

1. Ячейка B26 рассчитывает значение ширины одной секции полуприцепа путем деления полезной длины полуприцепа на два (то есть просто берется половина погрузочной длины полуприцепа).
2. Далее, ячейка B27 рассчитывает середину (центр тяжести) одной секции полуприцепа путем деления ширины одной секции на 2 (опять же, берется половина значения ширины).
3. Ячейка B28 рассчитывает расстояние от начала полуприцепа до задней оси. Данное расстояние либо необходимо рассчитывать вручную и вписывать в задаваемые параметры, либо просто посчитать расстояния относительно точки сцепления полуприцепа и тягача.
4. Наконец, расстояние от центра тяжести первой секции до задней оси рассчитывается как разница между Расстоянием от начала полуприцепа до задней оси и Центром тяжести одной секции. Эта формула находится в ячейке B29.
5. Ячейка B30 содержит формулу для расчета расстояния от центра тяжести второй секции до задней оси полуприцепа. При этом из значения ячейки B28 вычитается полторы ширины одной секции полуприцепа (так как центр тяжести второй секции – ширина первой секции + центр тяжести второй).



Таблица 13. Расчет параметра α

Источник: составлено автором

Что касается непосредственно параметра α, то он рассчитывается по формуле 2.18.1.

При этом в силу особенности работы Solver необходимо расчетную функцию задать через ЕСЛИОШИБКА в следующем формате: ЕСЛИОШИБКА (целевая функция;0). Использование функции ЕСЛИОШИБКА обусловлено тем, что при переборе различных решений в поиске оптимального, Solver попадает на значение «0» в знаменателе формулы для расчета параметра α и выдает ошибку, но функция ЕСЛИОШИБКА позволяет перевести данное значение из ошибки в ноль и продолжить расчет.

### § 3.2.8. Расчет нагрузок на оси

Расчет нагрузок на оси осуществляется на основе выведенных в главе 2.2. формулах. Таблица, в которой содержится данная информация, выглядит следующим образом:



Таблица 14. Расчет нагрузок на оси ТС

Источник: составлено автором

В ячейках B17:B24 содержатся формулы для расчетов Нагрузок на все оси транспортного средства.

Ячейка B16 содержит формулу 2.14.

Ячейка B17 содержит формулу 2.6.

Ячейка B18 содержит формулу 2.6. (берется модуль от значений ячейки B17)

Ячейка B19 содержит формулу 2.8.

Ячейка B20 содержит формулу 2.15.

Ячейка B21 содержит формулу 2.16

Ячейка B22 содержит формулу 2.4.

Ячейка B23 содержит формулу 2.17

## § 3.3. Принцип работы калькулятора Solver

Данный параграф будет посвящен описанию процесса работа калькулятора Solver, начиная от ввода данных и заканчивая обработкой полученного плана погрузки. При этом стоит отметить, что алгоритм работы был разработан таким образом, чтобы уменьшить «работу» для конечного пользователя.

Итак, общий алгоритм работы калькулятора выглядит следующим образом:

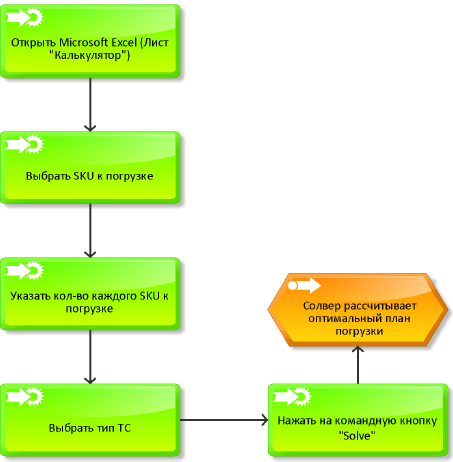


Рисунок 15. Алгоритм работы калькулятора Solver

Источник: составлено автором

Далее каждый из этапов данного алгоритма будет рассмотрен чуть более подробно.

### § 3.3.1. Ввод исходных данных

Ввод исходных данных предполагает выбор SKU и, при необходимости, указание необходимого количества каждого SKU к погрузке. На данный момент калькулятор предполагает выбор до десяти различных SKU, но данное количество может быть увеличено до 101 (это максимальное количество переменных, которое допускает Solver).



Таблица 15. Исходные данные

Источник: составлено автором

Выбрать SKU можно из выпадающего списка в ячейках D2:D12. Данный список содержит все наименования SKU, которые находятся в мастерданных калькулятора. При этом при добавлении новых SKU данный список автоматически обновляется. Также, в ячейки E2:E12 из мастерданных по материалам притягивается описание каждой SKU для ее распознавания пользователем, который осуществляет расчеты.

Далее для каждого SKU необходимо указать количество к погрузке, для чего соответствующие значения необходимо ввести в ячейки F3:F12, а ячейка F13 суммирует значения в данных ячейках. При необходимости, пользователь может не проставлять необходимое количество к погрузке для одного из SKU, если клиент просит загрузить данное наименование до максимальной вместимости. В таком случае калькулятор Solver сначала «погрузит» те SKU, где указано необходимое количество к погрузке, а затем по возможности догрузит максимально возможное количество SKU без ограничений.

На этом ввод исходных данных заканчивается, однако таблица «Исходные данные» включает два информационных столбца – Количество загруженных коробов и Количество недогруженных коробов. Первый показывает количество коробов каждого SKU, которые калькулятор распределил в транспортное средство, а второй показывает количесто коробов каждого SKU, которые по тем или иным причинам калькулятор не смог уместить в транспортное средство. Ячейки G13 и H13 суммируют значения в ячейках G2:G12 и H2:H12 соответственно. Если план погрузки был успешно сформирован, то значение в ячейке G13 должно совпадать со значением в ячейке F13, а ячейка H13 должна содержать нулевое значение.

### § 3.3.2. Выбор транспортного средства

Следующим этапом после ввода исходных данных и указания необходимых к погрузке SKU пользователю необходимо выбрать транспортное средство, в которое будет происходить погрузка, а также тип дороги, по которым будет следовать данное траспортное средство. В Microsoft Excel это выглядит следующим образом:



Таблица 16. Выбор транспортного средства

Источник: составлено автором

Чтобы выбрать транспортное средство, необходимо найти его в выпадающем списке в ячейке L4. Данные по выбранному транспортному средству будут автоматически притягиваться с листа «Мастерданные по ТС» (более подробно про это написано в параграфе [3.2.1.](#_§_3.2.1._Задаваемые).

Далее пользователю необходимо выбрать тип дороги в разрезе допустимой нагрузки на оси, которая допустима на данном типе дорог. Следует отметить, что для дорог с допустимой осевой нагрузкой 6 тонн/ось обеспечить выполнение требований транспортного законодательства достаточно сложно в силу того, что при данной нагрузке можно перевозить только полупустые транспортные средства. Федеральные трассы, предполагающие нагрузки на оси в 10 тонн/ось, являются наиболее популярными среди перевозчиков и как правило расчеты проводятся именно для них.

На данном этапе, после выбора транспортного средства и типа дороги, пользователю необходимо запустить Solver с помощью элемента управления макросами CommandButton. При нажатии на данную «кнопку» запускается расчетный алгоритм Solver и по результатам расчета пользователь получает уведомление о выполненном расчете или об ошибке, если таковая возникла.

### § 3.3.3. Обработка расчитанного плана погрузки

Расчитанный калькулятором Solver план погрузки представляет из себя таблицу следующего вида:

****

Таблица 17. План погрузки

Источник: составлено автором

Ячейки D19:D28 и ячейки E19:E28 автоматически подтягивают значения из ячеек D3:D12 и E3:E12 соответственно. Непосредственно распределение коробов (SKU) по секциям транспортного средства представлено в ячейках F19:F28 (секция 1) и G19:G28 (секция 2). При этом ячейки F29 и G29 суммируют значения в ячейках F19:F28 и G19:G28 соответственно.

Также таблица «План погрузки» содержит дополнительные ячейки, где отображается общая масса и объем загруженного в транспортное средство груза, а также масса и объем по секциям транспортного средства. Данная информация содержится в ячейках F16:H17.

После того, как пользователь получил заполненную таблицу «План погрузки», ее можно использовать как план погрузки в транспортное средство.

## § 3.4. Тестирование разработанного калькулятора Solver

Для оценки разработанного калькулятора на основе Solver необходимо провести его тестирование как с другими инструментами, так и в реальных условиях (с данными весов на пунктах весового контроля). Так как тестирование на весах предполагает загрузку транспортного средства, данный процесс является более сложным и прежде чем к нему приступить необходимо удостовериться в том, что инструмент является правильным по своей сути. Это можно сделать путем сравнения с инструментами, которые используют другие компании для проведения расчетов.

В рамках разработки были проведены сравнения с двумя калькуляторами: калькулятором ВДНК и программой Truckloader. Выбор первого связан с тем, что расчеты проводились на основе формул, выведенных данной компанией. Выбор второго связан с тем, что данная программа активно используется другими FMCG компаниями и, согласно их данным, расчеты данной программы являются очень близкими к тому, что показывают грузовые весы при взвешении транспортного средства.

### § 3.4.1. Сравнение результатов Solver c результатами калькулятора VDNK

В первую очередь было проведено сравнение расчетом калькулятора Solver с калькулятором, представленным компанией VDNK. Как уже было отмечено выше, выбор на данный калькулятор пал не случайно: представители данной компании представили подробнейший вывод формул по расчету нагрузок на оси транспортного средства.

Для начала было проведено сравнение результатов с пустым полуприцепом, то есть для системы тягач и полуприцеп без груза. При этом был взят двуосный тягач и трехосный полуприцеп со следующими параметрами:

|  |  |
| --- | --- |
| **Задаваемые параметры** | |
| Длина полуприцепа, мм | 13620 |
| Расстояние между осями полуприцепа (строенными/сдвоенными), мм | 1400 |
| Расстояние от начала полуприцепа до места сцепки с тягачом, мм | 1600 |
| LT – расстояние между осями тягача, мм | 3600 |
| L1 – расстояние от передней оси тягача до точки сцепки с полуприцепом, мм | 3060 |
| Lp.p. – расстояние от задней оси полуприцепа до места сцепки с тягачом, мм | 7700 |
| NT1,0 – нагрузка на переднюю ось тягача без прицепа, кг | 5726 |
| NT2,0 – нагрузка на заднюю ось тягача без прицепа, кг | 2454 |
| NT1,1 – нагрузка на переднюю ось тягача с пустым прицепом, кг | 5900 |
| NT2,1 – нагрузка на заднюю ось тягача с пустым прицепом, кг | 3560 |
| Mp.p. – масса полуприцепа, кг | 6400 |
| Mt – собственная масса тягача, кг | 8180 |

Таблица 18. Задаваемые параметры ТС

Источник: составлено автором

Полученные результаты сравнения представлены в Таблице 19 ниже:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | VDNK | Solver | Разница, % |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 5918 | 5918 | 0 |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 3542 | 3542 | 0 |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 5121 | 5120 | 0 |

Таблица 19. Сравнение результатов калькулятора VDNK и Solver при пустом ТС

Источник: составлено автором

Таким образом можно заметить, что при пустом полуприцепе нагрузка на оси транспортного средства совпадает как по результатам расчетом калькулятора VDNK, так и по расчетам калькулятора Solver. Это подтверждает правильность работы калькулятора.

Следующим этапом было проведено сравнение результатов для системы тягач и полуприцеп, когда в полуприцепе транспортного средства находится груз. При этом параметры транспортного средства были взяты такие же, как и для системы тягач и пустой полуприцеп (см. Таблицу 18). Что касается параметров груза, то был рассмотрен произвольный груз, который был равномерно загружен в транспортное средство так, что при разделении полуприцепа транспортного средства на необходимое количество равных частей, вес груза в каждой части будет примерно равным (необходимое условие серединного положения центра тяжести).

При этом изначально было проведено сравнение с учетом разделения транспортного средства на **4 равные части**, как это предполагает калькулятор VDNK. Полученные значения представлены в таблице ниже:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Расчет №1** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **15 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6663 | 6648 | 0.23% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 7764 | 7676 | 1.13% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 15153 | 15256 | 0.68% |
| **Расчет №2** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **10 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6415 | 6404 | 0.17% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 6357 | 6298 | 0.93% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 11808 | 11877 | 0.58% |
| **Расчет №3** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **5 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6166 | 6161 | 0.08% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 4949 | 4920 | 0.59% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 8463 | 8499 | 0.43% |

Таблица 20. Сравнение результатов калькулятора VDNK и Solver при загруженном ТС (4 секции)

Источник: составлено автором

Таким образом, из представленных расчетов видно, что между калькулятором VDNK и разработанным калькулятором Solver различия составляют примерно один процент, что может быть вызвано незначительными различиями в параметрах транспортного средства. При этом также можно заметить, что чем больше вес груза, тем это различие более значительное, что объясняется простой масштабируемостью получаемых значений.

Далее было проведено аналогичное сравнение полученных значений с учетом разделения транспортного средства **на 2 равные секции**, так как данный вариант распределения был принят в качестве основополагающего для разработанного инструмента:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Расчет №1** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **15 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6663 | 6649 | 0.21% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 7764 | 7682 | 1.06% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 15153 | 15250 | 0.64% |
| **Расчет №2** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **10 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6415 | 6405 | 0.16% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 6357 | 6302 | 0.87% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 11808 | 11873 | 0.55% |
| **Расчет №3** | | | |
| Общая масса груза, кг | VDNK | Solver | Разница, % |
| **5 000** |
| Общая нагрузка на первую ось тягача, кг | 6166 | 6162 | 0.06% |
| Общая нагрузка на первую ось полуприцепа, кг | 4949 | 4922 | 0.55% |
| Общая нагрузка на вторую ось полуприцепа, кг | 8463 | 8497 | 0.40% |

Таблица 21. Сравнение результатов калькулятора VDNK и Solver при загруженном ТС (2 секции)

Источник: составлено автором

По результатам сравнения можно сделать вывод о том, что разделение транспортного средства на две секции при таких параметрах транспортного средства позволяет незначительно, но приблизить получаемые значения к значениям калькулятора VDNK. При этом разница также составляет примерно один процент, что совсем незначительно при общем весе более 5000 килограмм.

По итогам проведенного сравнения можно сделать два вывода:

1. Значения калькулятора Solver с 99% точностью совпадают со значениями калькулятора VDNK. Это означает, что калькулятор Solver работает правильно.
2. Разделение транспортного средства не на 4, а на 2 секции не только не искажает значений, но и приближает их к идеальным. Это означает, что упрощение исходного предположения не сказалось на построенной моделе и калькулятор работает правильно.

# § 3.5. Преимущества от калькулятора Solver для ООО «Петро»

Для оценки полезности разработанного решения для компании был использован комплексный подход, который предполагает оценку не только экономической составляющей, но и других приобретаемых преимуществ. Таким образом, были выделены две основных выгоды от использования разработанного инструмента для компании:

* Экономические

Благодаря калькулятору Solver компания обеспечивает непревышение допустимых нагрузок на оси и избегает значительных штрафов. В связи с тем, что точную оценку экономической выгоды представить невозможно из-за того, что получения штрафов подчинено различной вероятности и необходимо делать определенные субъективные предположения. Тем не менее, для примерной оценки были взяти следующие данные исходя из данных, представленных компанией ООО «Петро»:

|  |  |
| --- | --- |
| Количество рейсов в месяц, шт | 100 |
| Вероятность получения штрафа, % | 20% |
| Размер одного штрафа, руб. | 250 000 |

Таблица 22. Расчет потенциальных штрафов за месяц

Источник: составлено автором, используя данные ООО «Петро»

В таком случае, размер потенциальной экономической выгоды в месяц может достигать пяти миллионов рублей. При этом данный расчет проведен примерно согласно статистике, предоставленной в ООО «Петро». В случае ужесточения мер контроля за транспортными средствами, вероятность получения штрафа может значительно возрасти, что повлечет за собой увелчение расходов для компании.

При этом еще одним важным экономическим факторов является и то, что калькулятор на основе Microsoft Excel является бесплатным к использованию и не предполагает покупку лицензий, интеграцию в информационную систему компании и оплату работы профессиональных консультантов.

* Репутационные

Как уже говорилось в самом начале работы, компания ООО «Петро» представляет собой одну из крупнейших фабрик международной компании Japan Tobacco International. Такой статус компании предполагает определенные социальные обязанности, которые, несомненно, включают в себя полное выполнение требований законодательства Российской Федерации. Компания ООО «Петро» заботится о своей репутации и поэтому стремится работать в рамках российского законодательства, в том числе и транспортного. Данный проект был направлен именно на то, чтобы пресечь любые потенциальные нарушения законодательства для поддержания статуса добросовестной компании.

Также, так как штрафы для превышение допустимых нагрузок на оси распространяются как на компанию-грузовладельца, так и на компанию-перевозчика, а компания ООО «Петро» считает недопустимым подвержение своих партнеров таким рискам. Таким образом, разработанный калькулятор позволяет компании поддерживать доверительные отношения со своими партнерами.

# Заключение

Настоящая выпускная квалификационная работа была посвящена работе над проектом для компании ООО «Петро», связанным с совершенствованием процесса загрузки грузового транспорта и контейнеров. Данный проект предполагал нахождение правильного инструментария, который бы позволил компании легко учитывать текущие законодательные ограничения по нагрузкам на оси транспортных средств при составлении планов погрузки. Реализация подобного проекта предполагает определенный выбор: использование уже существующих на рынке решений или разработку собственного инструмента. По результатам проведенного анализа было выявлено, что существующие решения не соответствуют требованиям компании и в итоге выбор пал на первый вариант – разработка простого в использовании инструмента, который компания могла бы использовать самостоятельно в любых условиях.

Результатом проделанной работы стал калькулятор, основанный на Solver Add-in к Microsoft Excel, который полностью соответствует требованиям компании и позволяет избегать штрафов за превышение допустимых нагрузок на оси. Для компании данный калькулятор представляет простой и очень действенный способ для расчета планов погрузки, которые будут учитывать текущие законодательные ограничения. Более того, данный калькулятор не требует никаких изменений текущего процесса погрузки в компании, так как был разработан под специфические особенности погрузки, принятые в ООО «Петро».

Однако по итогам совместной работы с ООО «Петро» над целевым проектом можно сделать еще несколько значимых выводов. Данные выводы затрагивают, в первую очередь, практические особенности использования разработанного инструмента, а также особенности применения дискретных моделей в логистике. Также в качестве выводов будут представлены общие особенности реализации логистических проектов на крупных производственных фабриках.

Во-первых, следует отметить, что разработанный инструмент был высоко оценен в компании ООО «Петро» и в ходе проведенного тестирования было принято решения использовать данный инструмент на постоянной основе. Также, в рамках тестирования стало понятно, что калькулятор Solver польностью соответствует требованию простоты в использовании, что отметили ключевые пользователи. Более того, была расширена первоначальная задача и было принято решение внедрить данный инструмент и на других фабриках компании, в частности, на фабрике в Ельце. Это говорит о том, что поставленная в рамках проекта управленческая задача была реализована в полном объеме.

Во-вторых, необходимо отметить, что реализация поставленной задачи через такой действенный инструмент не была бы возможна без правильной математической модели. В данном случае было принято правильное решение свести поставленную задачу к задаче дискретной оптимизации (так называемой «задаче о рюкзаке»), что позволило свести ее к задаче дискретного программирования и применить для решений Solver Add-in. Успех такого подхода говорит о том, что иногда сложные математические задачи (коей, несомненно, является «задача о ранце») можно значительным образом упростить для того, чтобы они могли быть применимы для решения практических задач.

Наконец, в-третьих, стоит отметить ценность в логистических проектах такого вида для крупных производственных комплексов, коим является фабрика «Петро». Данный проект является важным не только с точки зрения логистики, но и с точки зрения оптимизации процессов в компании. Это обусловлено тем, что совершенствование процесса укладки грузов, с одной стороны, снижает риск штрафов для компании, но с другой стороны обязывает компанию возить меньший объем грузов нежели при полной загрузке. В итоге, экономическая целесообразность данного проекта не всегда очевидна (тем не менее, она присутствует), однако избегая штрафов компания также поддерживает свою репутацию и может справедливо называться социально ответственной. Таким образом, компания обеспечивает себе долгосрочную выгоду за счет осведомленного подхода к выполнению требований транспортного законодательства и желанием всегда находить лучшие решения.

# Список использованной литературы

1. Постановление Правительства РФ от 15.04.2011 N 272 (ред. от 22.12.2016) "Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом" [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113363/>
2. КоАП РФ, Статья 12.21.1. Нарушение правил движения тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/f727c535f35518ba16c7d51b782a5f6ed67b76a3/>
3. Japan Tobacco Inc in Tobacco (Japan) Local Company Profile | 23 Aug 2016 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com)
4. Company Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com)
5. Japan Tobacco Inc in Tobacco (World) Global Company Profile | 22 Mar 2017 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com)
6. Global Flagship Brands [Электронный ресурс] // JTI International Tobacco and Cigarette Brands & Products. Режим доступа: <http://www.jti.com/about-tobacco/our-products/global-flagship-brands/>
7. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com)
8. JTI Россия [Электронный ресурс] // JTI Россия | Обзор. Режим доступа <http://www.jti.com/our-company/where-we-operate/europe/russia/russian/obzor/>
9. Japan Tobacco Inc in Tobacco (Russia) Local Company Profile | 16 Aug 2016 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com)
10. MarketLine Industry Profile: Tobacco in Russia | June 2016 [Электронный ресурс] // MarketLine. Режим доступа: <http://360.datamonitor.com/>

Philip Morris и Japan Tobacco покупают по 20% российского дистрибьютора [Электронный ресурс] // Philip Morris и Japan Tobacco покупают по 20% российского дистрибьютора. Режим доступа: <http://www.rbc.ru/economics/04/12/2013/570414159a794761c0ce4722>

1. Как считается нагрузка на ось грузового автомобиля и какие штрафы предусмотрены за перегруз [Электронный ресурс] // Нагрузка на ось грузового автомобиля: таблица 2017 и штрафы за перегруз. Режим доступа: <http://voditeliauto.ru/voditeli-i-gibdd/shtrafy/nagruzka-na-os-gruzovogo-avtomobilya.html>
2. Псиола, В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик. [Электронный ресурс] / В.В. Псиола // Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/sites/default/files/alg_art.pdf>
3. Ковалев, М.М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). – Мн., Изд-во БГУ, 1977. – 192 с.
4. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М.Гэри, Д.Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
5. Об алгоритме. [Электронный ресурс] // Об алгоритме | packer3d.ru. Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/packer3d-core>
6. Клиенты Пакер 3д [Электронный ресурс] // Клиенты Пакер 3д | packer3d.ru. Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/clients>
7. Packer3d Программы [Электронный ресурс] // Packer3d Программы | packer3d.ru. Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/clients>

TruckLoader [Электронный ресурс] // TruckLoader - размещение грузов в контейнере, фуре, ж/д вагоне. Расчет нагрузок на оси. Расчет загрузки труб с телескопированием и упаковка цилиндров. Режим доступа: <http://tlrun.com/ru/index.php>

Отзывы [Электронный ресурс] // TruckLoader - размещение грузов в контейнере, фуре, ж/д вагоне. Расчет нагрузок на оси. Расчет загрузки труб с телескопированием и упаковка цилиндров. Режим доступа: <http://tlrun.com/ru/clients.php>

Купить легко [Электронный ресурс] // TruckLoader - размещение грузов в контейнере, фуре, ж/д вагоне. Расчет нагрузок на оси. Расчет загрузки труб с

телескопированием и упаковка цилиндров. Режим доступа: <http://tlrun.com/ru/sales.php>

Как рассчитать нагрузки на оси грузового автопоезда? [Электронный ресурс] // Как можно посчитать нагрузки на ось грузового автомобиля с грузом и без груза. Теория и практика грузоперевозок: <http://www.vdnk.ru/site/ru/transport-articles/mechanics-freight>

Калькулятор нагрузки на оси седельного тягача с полуприцепом [Электронный ресурс] // Расчет нагрузки на ось автопоезда с грузом. Режим доступа: <http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload>

Типы и габаритные размеры кузовов грузового автотранспорта [Электронный ресурс] // Типы и габаритные размеры кузовов грузового автотранспорта. Режим доступа: <http://www.charoit.net/index.php?page=articles/tipi_gabaritnie_razmeri_gruzovih_kuzovov>

Типы и размеры контейнеров [Электронный ресурс] // Типы и размеры морских контейнеров. Режим доступа: <http://www.tnspb.ru/uslugi/morskie-perevozki/tipy-kontejjnerov.html>

# Приложение 1. Допустимые осевые нагрузки транспортных средств

|  | Расстояние между сближенными осями (метров) | Допустимые осевые нагрузки колесных транспортных средств в зависимости от нормативной (расчетной) осевой нагрузки (тонн) и числа колес на оси | | |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| для автомобильных дорог, рассчитанных на осевую нагрузку 6 тонн/ось (**\***) | для автомобильных дорог, рассчитанных на осевую нагрузку 10 тонн/ось | для автомобильных дорог, рассчитанных на осевую нагрузку 11,5 тонн/ось |
| Одиночные оси |  | 5,5 (6) | 9 (10) | 10,5 (11,5) |
| Сдвоенные оси прицепов, полуприцепов, грузовых автомобилей, автомобилей- тягачей, седельных тягачей при расстоянии между осями (нагрузка на тележку, сумма осевых масс) | до 1 (включительно) | 8 (9) | 10 (11) | 11,5 (12,5) |
| от 1 до 1,3 (включительно) | 9 (10) | 13 (14) | 14 (16) |
| от 1,3 до 1,8 (включительно) | 10 (11) | 15 (16) | 17 (18) |
| от 1,8 и более | 11 (12) | 17 (18) | 18 (20) |
| Строенные оси прицепов, полуприцепов, грузовых автомобилей, автомобилей- тягачей, седельных тягачей при расстоянии между осями (нагрузка на тележку, сумма осевых масс) | до 1 (включительно) | 11 (12) | 15 (16,5) | 17 (18) |
| до 1,3 (включительно) | 12 (13,5) | 18 (19,5) | 20 (21) |
| от 1,3 до 1,8 (включительно) | 13,5 (15) | 21 (22,5 **\*\***) | 23,5 (24) |
| от 1,8 и более | 15 (16) | 22 (23) | 25 (26) |
| Сближенные оси грузовых автомобилей, автомобилей-тягачей, седельных тягачей, прицепов и полуприцепов с количеством осей более трех при расстоянии между осями (нагрузка на одну ось) | до 1 (включительно) | 3,5 (4) | 5 (5,5) | 5,5 (6) |
| от 1 до 1,3 (включительно) | 4 (4,5) | 6 (6,5) | 6,5 (7) |
| от 1,3 до 1,8 (включительно) | 4,5 (5) | 6,5 (7) | 7,5 (8) |
| от 1,8 и более | 5 (5,5) | 7 (7,5) | 8,5 (9) |
| Сближенные оси транспортных средств, имеющих на каждой оси по восемь и более колес (нагрузка на одну ось) | до 1 (включительно) | 6 | 9,5 | 11 |
| от 1 до 1,3 (включительно) | 6,5 | 10,5 | 12 |
| от 1,3 до 1,8 (включительно) | 7,5 | 12 | 14 |
| от 1,8 и более | 8,5 | 13,5 | 16 |

Таблица 23. Допустимые осевые нагрузки транспортных средств

Источник: Постановление Правительства №272 в редакции от 22.12.2016 "Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом"

# Приложение 2. Размеры штрафов за превышение допустимой массы или нагрузки на ось, руб.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Величина выявленного превышения максимально допустимой массы или нагрузки на ось** | **Водитель** | **Ответственное лицо** | **Организация** | |
| От 2% до 10% (п. 1 ст. 12.21.1 КоАП РФ) | 1000 - 1500 | 10000 - 15000 | 100000 - 150000 | |
| От 10% до 20% (п. 2 ст. 12.21.1 КоАП РФ) | 3000 - 4000 | 25000 - 30000 | 250000 - 300000 | |
| От 20% до 50% (п. 3 ст. 12.21.1 КоАП РФ) | 5000 - 10000¹ | 35000 - 40000 | 350000 - 400000 | |
| Свыше 50% (п. 6 ст. 12.21.1 КоАП РФ) | 7000 - 10000² | 45000 - 50000 | 400000 - 500000 | |
| ¹ Штраф может быть заменён лишением прав на срок от 2 до 4 месяцев. |  |  |  |
| ² Штраф может быть заменён лишением прав на срок от 4 до 6 месяцев. |  |  |  |

Таблица 24. Штрафы за превышение допустимых нагрузок на оси  
Источник: https://gruzconsult.ru/articles/279344

# Приложение 3. 3D-модель плана погрузки в программе Packer3d

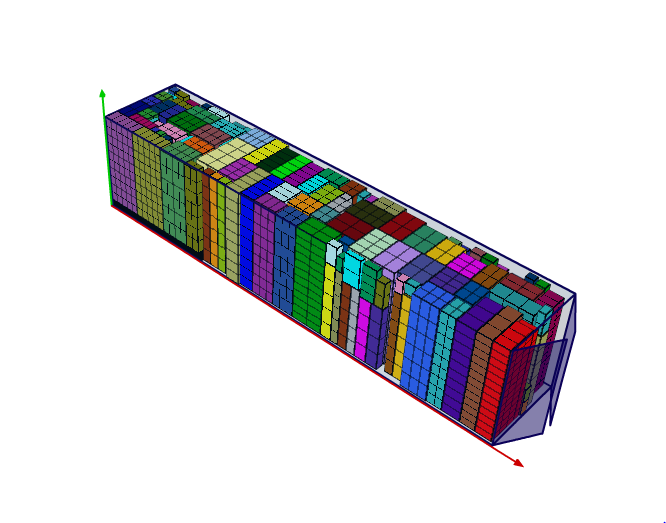


Рисунок 18. 3D-модель плана погрузки Packer3D

Источник: http://www.packer3d.ru/orders/samples

# Приложение 4. 3D-модель плана погрузки в программе Truckloader

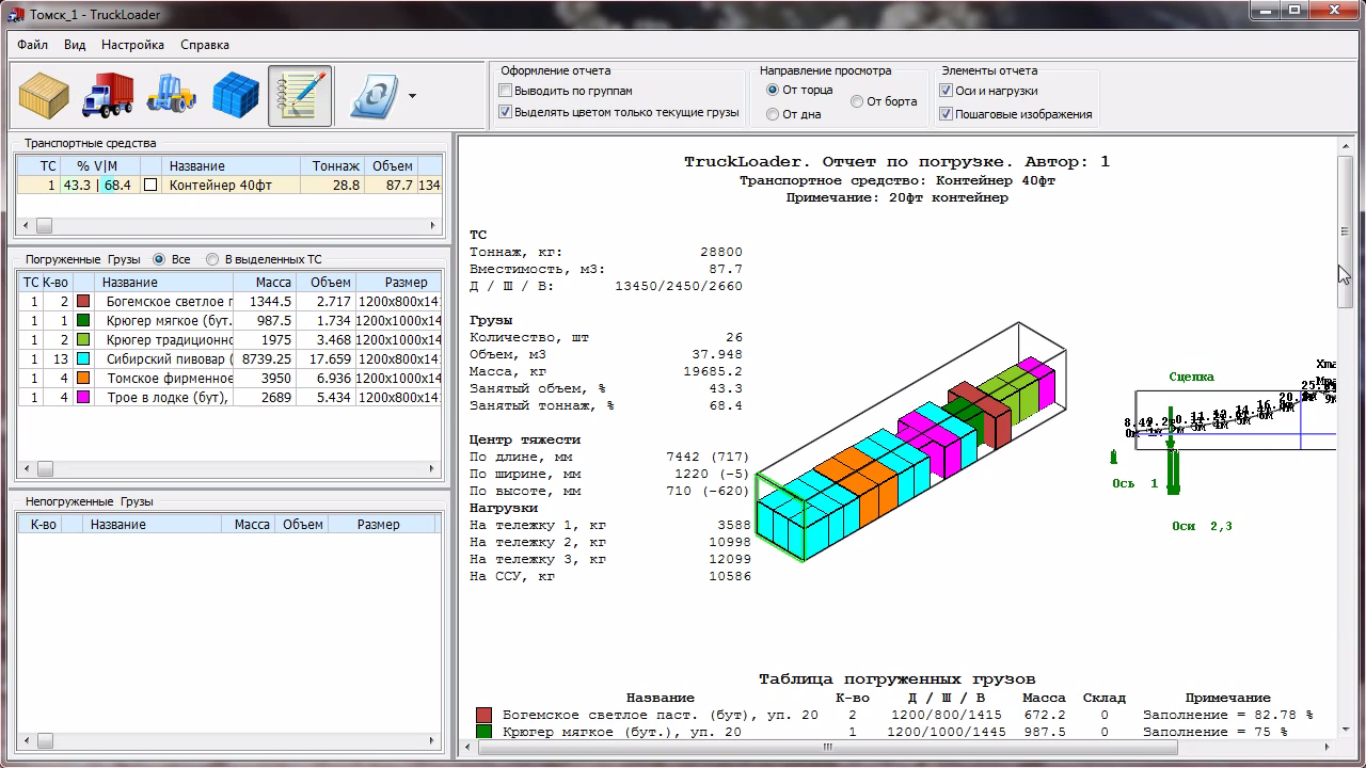


Рисунок 17. 3D-модель плана погрузки в Truckloader

Источник: <http://tlrun.com/ru/axis.php>

# Приложение 5. Диалоговое окно Solver при полном заполнении

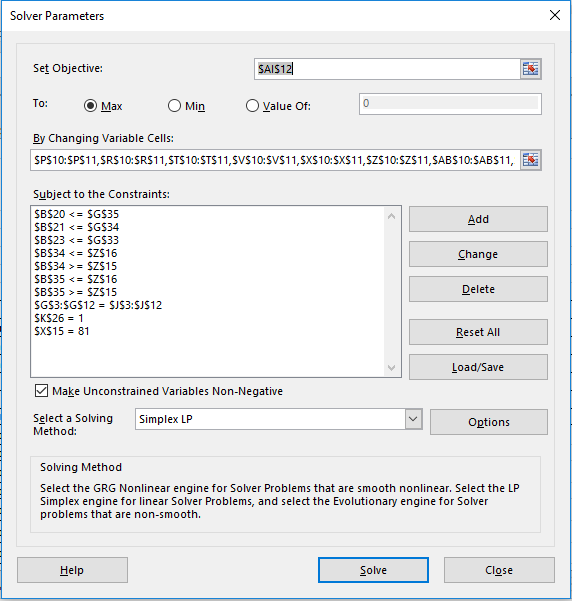


Рисунок 16. Диалоговое окно Solver

Источник: составлено автором

1. # Постановление Правительства РФ от 15.04.2011 N 272 (ред. от 22.12.2016) "Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом" [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_113363/> (дата обращения: 24.04.2017)

   [↑](#footnote-ref-1)
2. # КоАП РФ, Статья 12.21.1. Нарушение правил движения тяжеловесного и (или) крупногабаритного транспортного средства [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/f727c535f35518ba16c7d51b782a5f6ed67b76a3/> (дата обращения: 24.04.2017)

   [↑](#footnote-ref-2)
3. # Japan Tobacco Inc in Tobacco (Japan) Local Company Profile | 23 Aug 2016 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017)

   [↑](#footnote-ref-3)
4. # Company Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017)

   [↑](#footnote-ref-4)
5. # Japan Tobacco Inc in Tobacco (World) Global Company Profile | 22 Mar 2017 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017)

   [↑](#footnote-ref-5)
6. Global Flagship Brands [Электронный ресурс] // JTI International Tobacco and Cigarette Brands & Products. Режим доступа: <http://www.jti.com/about-tobacco/our-products/global-flagship-brands/> (дата обращения 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-6)
7. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-7)
8. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-8)
9. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-9)
10. JTI Россия [Электронный ресурс] // JTI Россия | Обзор. Режим доступа <http://www.jti.com/our-company/where-we-operate/europe/russia/russian/obzor/> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-10)
11. # Japan Tobacco Inc in Tobacco (Russia) Local Company Profile | 16 Aug 2016 [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Analysis. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017)

    [↑](#footnote-ref-11)
12. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-12)
13. Brand Shares (Global - Historical Owner) [Электронный ресурс] // Euromonitor International – Statistics. Режим доступа: [www.portal.euromonitor.com](http://www.portal.euromonitor.com) (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-13)
14. MarketLine Industry Profile: Tobacco in Russia | June 2016 [Электронный ресурс] // MarketLine. Режим доступа: <http://360.datamonitor.com/> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-14)
15. MarketLine Industry Profile: Tobacco in Russia | June 2016 [Электронный ресурс] // MarketLine. Режим доступа: <http://360.datamonitor.com/> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-15)
16. Philip Morris и Japan Tobacco покупают по 20% российского дистрибьютора [Электронный ресурс] // Philip Morris и Japan Tobacco покупают по 20% российского дистрибьютора :: Экономика :: РБК. Режим доступа: <http://www.rbc.ru/economics/04/12/2013/570414159a794761c0ce4722> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-16)
17. 17 Здесь и далее, оптимальные планы погрузки – рассчитываемые планы погрузки, обеспечивающие непревышение допустимых нагрузок на оси транспортных средств и соответствующие принципам погрузки, принятым в ООО «Петро» (см. Параграф [2.3.1.](#_Часть_2.4.1._Специфические)) [↑](#footnote-ref-17)
18. Как считается нагрузка на ось грузового автомобиля и какие штрафы предусмотрены за перегруз [Электронный ресурс] // Нагрузка на ось грузового автомобиля: таблица 2017 и штрафы за перегруз. Режим доступа: <http://voditeliauto.ru/voditeli-i-gibdd/shtrafy/nagruzka-na-os-gruzovogo-avtomobilya.html> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-18)
19. Псиола, В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик. [Электронный ресурс] / В.В. Псиола // Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/sites/default/files/alg_art.pdf> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-19)
20. Ковалев, М.М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). – Мн., Изд-во БГУ, 1977. – 192 с. [↑](#footnote-ref-20)
21. Ковалев, М.М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). – Мн., Изд-во БГУ, 1977. – 192 с. [↑](#footnote-ref-21)
22. Гэри, М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М.Гэри, Д.Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с. [↑](#footnote-ref-22)
23. Псиола, В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик. [Электронный ресурс] / В.В. Псиола // Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/sites/default/files/alg_art.pdf> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-23)
24. Псиола, В.В. О приближенном решении 3-х мерной задачи об упаковке на основе эвристик. [Электронный ресурс] / В.В. Псиола // Режим доступа: <http://www.packer3d.ru/sites/default/files/alg_art.pdf> (дата обращения: 24.04.2017) [↑](#footnote-ref-24)
25. Как рассчитать нагрузки на оси грузового автопоезда? [Электронный ресурс] // Как можно посчитать нагрузки на ось грузового автомобиля с грузом и без груза. Теория и практика грузоперевозок: <http://www.vdnk.ru/site/ru/transport-articles/mechanics-freight> (дата обращения: 24.04.2017). [↑](#footnote-ref-25)
26. Калькулятор нагрузки на оси седельного тягача с полуприцепом [Электронный ресурс] // Расчет нагрузки на ось автопоезда с грузом. Режим доступа: <http://www.vdnk.ru/site/ru/information/axleload> (дата обращения: 24.04.2017). [↑](#footnote-ref-26)
27. Типы и габаритные размеры кузовов грузового автотранспорта [Электронный ресурс] // Типы и габаритные размеры кузовов грузового автотранспорта. Режим доступа: <http://www.charoit.net/index.php?page=articles/tipi_gabaritnie_razmeri_gruzovih_kuzovov> (дата обращения: 24.04.2017). [↑](#footnote-ref-27)
28. Типы и размеры контейнеров [Электронный ресурс] // Типы и размеры морских контейнеров. Режим доступа: <http://www.tnspb.ru/uslugi/morskie-perevozki/tipy-kontejjnerov.html> (дата обращения: 24.04.2017). [↑](#footnote-ref-28)
29. Числа были взяты произвольно с учетом кратности двум и трем (где 2 и 3 – возможное количество осей у тягача/полуприцепа) [↑](#footnote-ref-29)
30. Данные ограничения представлены в Приложении 1. [↑](#footnote-ref-30)