

На правах рукописи

УДК 621.876.31

Гнездилов Сергей Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ
АВТОМОБИЛЬНОГО ПОДЪЁМНИКА ЭЛЕВАТОРНОГО
ТИПА ГАРАЖНОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъёмно-транспортные машины

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

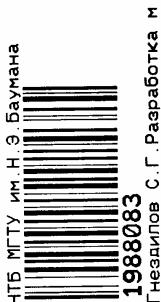
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Вершинский А. В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Кобзев А. П.;
кандидат технических наук,
Сивоглазов А. С.



Ведущее предприятие — ОАО «НПК «Уралвагонзавод».

Защита состоится «26» 12 201 г. в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному выше адресу.

Ознакомиться с диссертацией можно в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Дата рассылки автореферата: « » _____ 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Сарач Е. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительный рост автопарков крупных городов создаёт ряд проблем. Так, например, в Москве из-за интенсивного развития периферийных районов усиливается нагрузка на центр города, вызывая особый интерес горожан, поскольку здесь расположены важнейшие культурные, исторические, деловые, торговые центры и другие объекты. Ввиду преимущественного интереса населения к торговым центрам идёт процесс перераспределения парковочных мест возле объектов, не относящихся к торговле, в пользу торговых центров. В результате такого перераспределения происходит ухудшение условий работы исторически значимых объектов, учреждений и организаций культурного и делового профиля.

Решением указанной проблемы в каждом конкретном случае может быть установление контроля над территориями, прилегающими к такому объекту, перемещение объекта с удалением его от торговых центров либо строительство систем компактного хранения автомобилей вблизи него.

Для компактного и организованного хранения автомобилей за рубежом широкое распространение получили автомобильные накопители элеваторного типа (АНЭТ), относящиеся к классу роторных систем парковки автомобилей (РСПА) механизированных автостоянок (МАС). Для АНЭТ характерно наличие двух пар верхних и нижних цепных звёздочек, приводящих в движение две бесконечные цепи, на которых равноудалённо друг от друга консольно закреплены несущие платформы. Такие устройства впервые появились в США в 30-х годах прошлого века. Сегодня существует большое разнообразие конструктивных форм АНЭТ.

Кафедра подъёмно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана занимается созданием новых конструктивных форм механизированных автомобильных стоянок. За последние годы получен ряд патентов на автомобильные подъёмники элеваторного (АПЭТ) (рис. 1) и револьверного типов, соавтором которых является диссертант. В отличие от традиционных АНЭТ разработанные подъёмники не накапливают автомобили, а обеспечивают их кратковременное перемещение между уровнями гаражного комплекса (ГК).

Автомобильный подъёмник элеваторного типа эффективно использует парковочное пространство, работает без холостых ходов, способен одновременно выполнять операции загрузки и выгрузки автомобилей на различных несущих платформах. Его применение в ряде случаев позволяет уменьшить объём вредных выхлопов, снизить вероятность повреждения автомобилей от столкновений с элементами ГК.

На основе сравнения АПЭТ с подъёмниками лифтового типа по производительности определена область эффективного применения АПЭТ: их внедрение предпочтительно в ГК с числом уровней до 8–10 и малым значением разности уровней, а также в парковочных пространствах, для обеспечения требуемой производительности обслуживания которых недостаточно подъёмников лифтового типа при этом невозможно либо нерационально возведение рамповых заездов. Для АПЭТ наиболее благоприятны равномерно распределённые в течение дня (беспиковые) машинопотoki.

Одним из основных элементов АПЭТ является его несущая металлическая конструкция (НМК). Это наиболее металлоёмкий узел подъёмника, что вызывает первоочередную необходимость разработки алгоритма его оптимального проектирования.

В диссертации оптимальное проектирование НМК АПЭТ предлагается выполнять в последовательности, включающей 7 базовых этапов, на основе которой, опираясь на информацию о ГК и о подлежащих хранению в нём автомобилях, могут быть получены основные данные об оптимальной НМК АПЭТ для этого ГК.

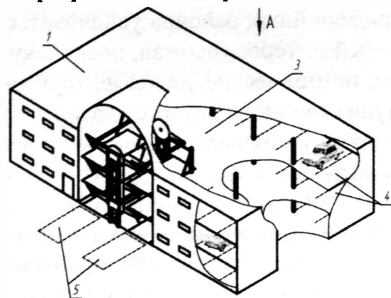
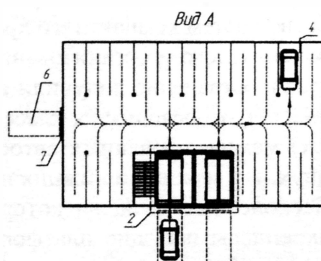


Рис. 1. Гаражный комплекс с АПЭТ конструкции МГТУ им. Н. Э. Баумана: 1 – здание гаражного комплекса, 2 – АПЭТ, 3 – проезжая часть, 4 – места хранения, 5, 6 – подъездные пути, 7 – ворота



Цель работы: разработать методику оптимального проектирования НМК АПЭТ, основанную на численных методах и учитывающую ряд ограничений по несущей способности, жёсткости, а также конструкторско-технологические ограничения.

Задачи работы.

Для достижения намеченной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать алгоритм оптимального проектирования НМК АПЭТ, включающий, в частности, определение действующих на НМК нагрузок, обоснование их расчётных сочетаний, построение расчётных схем, разработку вариантов НМК, определение для них наиболее неблагоприятных расчётных сочетаний нагрузок и параметрическую оптимизацию НМК с учётом обозначенных в формулировке цели работы ограничений.

2. Спроектировать оптимальные варианты НМК АПЭТ на основе разработанного алгоритма.

3. Подготовить рекомендации по практическому применению разработанного алгоритма на основе опыта проектирования вариантов НМК АПЭТ.

Методы исследования. В работе использованы известные методы строительной механики, аналитические и численные методы анализа напряжённо-деформированного состояния металлоконструкций, методы компьютерного моделирования в системе *Creo Elements/Pro* и методы оптимального проектирования.

Научная новизна:

– разработана комплексная методика оптимального проектирования несущей металлоконструкции (НМК) новой конструктивной формы роторной системы парковки автомобилей – автомобильного подъёмника элеваторного типа (АПЭТ), включающая алгоритм проектирования, примеры его реализации и сформированные на их основе практические рекомендации по применению алгоритма;

– обоснована геометрическая форма НМК АПЭТ, на её основе получены варианты НМК для АПЭТ, определена топология панелей их модулей;

– установлены неблагоприятные расчётные сочетания нагрузок на НМК АПЭТ, проведена их структуризация; создан алгоритм определения значений нагрузок на НМК для их различных сочетаний;

– получены зависимости наибольших эквивалентных напряжений от расположения подвижной нагрузки для групп элементов вариантов НМК и определены наиболее неблагоприятные расчётные случаи;

– выполнена параметрическая оптимизация вариантов НМК АПЭТ, определены наиболее нагруженные элементы их конечных исполнений.

Достоверность результатов работы подтверждается применением современных апробированных методов исследования, выполнением контрольных расчётов, а также сопоставлением результатов с известными данными.

Практическая ценность:

– разработанная методика позволяет на начальном этапе проектирования новых АПЭТ, а также при совершенствовании существующих АНЭТ и др. РСПА обоснованно генерировать новые конструктивные решения НМК пониженной металлоёмкости для различных эксплуатационных условий.

– сформулированные в работе рекомендации по разработке нормативной документации для РСПА применимы при совершенствовании российской нормативной базы для механизированных автомобильных стоянок.

Реализация работы. Разработанная методика используется на ОАО «НПК «Уралвагонзавод», ЗАО «НПГ ПАРСЕК», а также в учебном процессе кафедры «Подъёмно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Апробация работы. По теме работы делались регулярные доклады на кафедре «Подъёмно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также на 12-й (МГСУ, 2008 г.), 13-й (МАДИ, 2009 г.) и 14-й (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010 г.) Московских межвузовских научно-технических конференциях студентов и молодых учёных с международным участием; на 5-й международной выставке «Лифт Экспо Россия–2011» (ВВЦ, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

Объём работы. Диссертация включает в себя список основных терминов, введение, четыре главы основного текста, общие выводы, список литературы и приложение. Работа содержит 253 страницы машинописного текста, 26 таблиц, 95 рисунков, в том числе список литературы, в составе которого 138 источников отечественных и зарубежных авторов, а также 10 приложений на 58 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации и общую характеристику работы.

В разделе «Основные термины» дано определение 33 терминам, используемым в работе.

В первой главе представлены общие сведения об АНЭТ, предложена их классификация; рассмотрены вопросы оптимального проектирования РСПА, касающиеся, помимо прочего, снижения эксплуатационных затрат, металлоёмкости их элементов, повышения производительности; представлен обзор НМК различных АНЭТ, опираясь на который, с учётом области допустимого расположения элементов НМК, обоснована геометрическая форма НМК (рис. 2) разработанного на кафедре АПЭТ (рис. 1).

Как было отмечено выше, проектирование НМК АПЭТ предлагается выполнять последовательно в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 3, согласно которой на *начальном* этапе подготавливаются исходные данные: собираются сведения о ГК, определяются предельные габариты и масса автомобилей, допускаемых к перемещению в АПЭТ, прорабатываются геометрия трассы подъёмника, область допустимого расположения элементов его НМК и др.

Для реализации *второго* и *третьего* этапов последовательности (рис. 3) предложен подход (рис. 4), основанный на принципе декомпозиции исходной задачи, к обоснованию топологии панелей модулей НМК. Данный подход предполагает учёт многообразия вариантов конструктивного исполнения элементов НМК различных АНЭТ, в соответствии с которым осуществляется подготовка исходных данных (первый этап), обоснование компоновки модулей НМК (второй этап) и определение наилучшей топологии панелей её модулей (с третьего по седьмой этапы). При реализации шестого этапа применяются численные методы, рассмотренные во второй и третьей главах диссертационной работы. На основе данного подхода обоснована компоновка модулей НМК (её геометрическая форма) АПЭТ и выявлены наилучшие варианты панелей её модулей.

Несущая металлоконструкция (рис. 2) АПЭТ состоит из двух поперечных (фасадных) модулей *А*, обеспечивающих неизменяемость подъёмника в поперечном направлении и воспринимающих усилия от его подвижных элементов, одного продольного модуля связи в вертикальной плоскости *Б*, обеспечивающего совместность работы фасадных модулей, их параллельность и неизменность расстояния между ними, и двух модулей связи в горизонтальной плоскости *В*, воспринимающих усилия от перемещения автомобилей внутри АПЭТ.

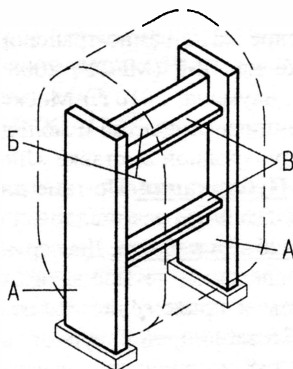
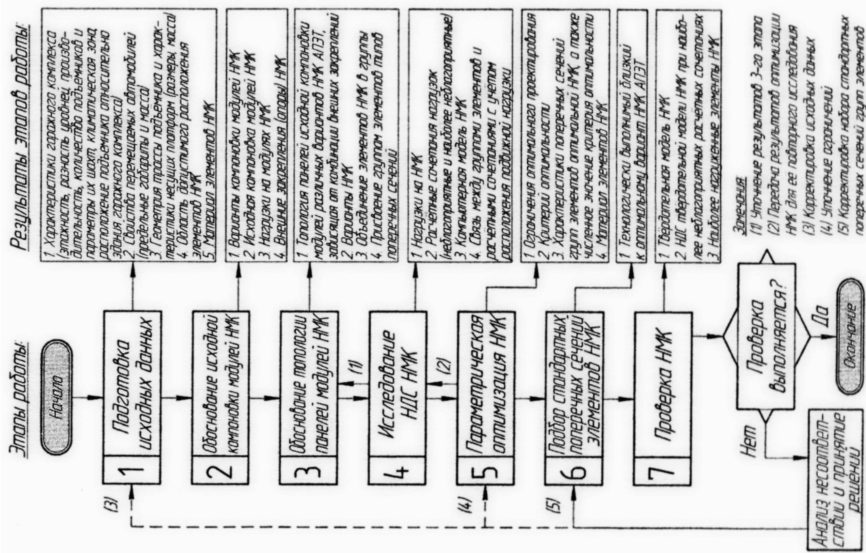
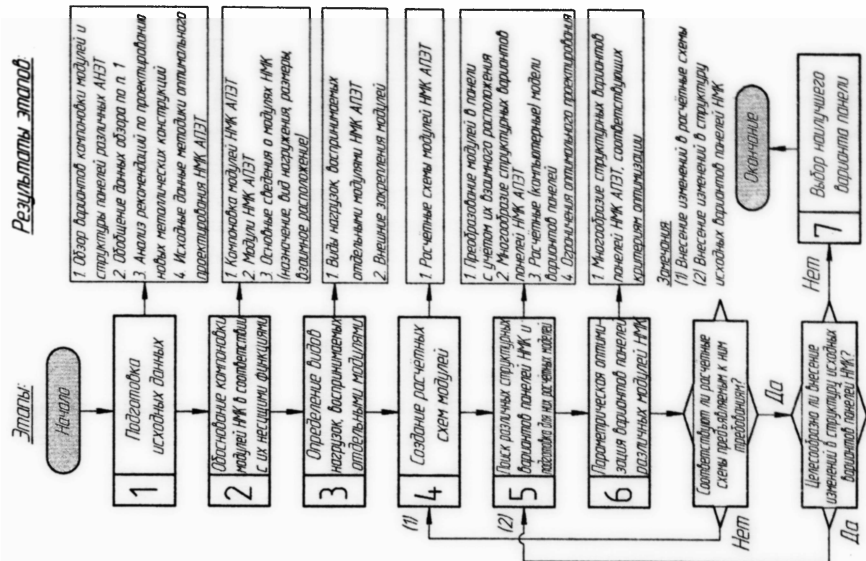


Рис. 2. Схема НМК АПЭТ



**Рис. 3. Блок-схема
последовательности
оптимального
проектирования
НМК АПЭТ**



Аналитическим и экспериментальным методам исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций подъёмно-транспортных машин, в том числе с применением систем автоматизации инженерных расчётов, посвящены работы Гохберга М. М., Соколова С. А., Вершинского А. В., Морозова Л. Ф., Леоновой О. В. и других авторов. Вопросы оптимизации металлических конструкций подъёмно-транспортных машин рассматриваются в трудах Виноградова А. И., Демокритова В. Н., Кобзева А. П., Тимашова С. П., Сивоглазова А. С., Курганбекова А. М., Берадзе А. А., Шубина А. Н., Нгуена К. К., Колокольцева В. А. и др.

Вопросы проектирования механизированных автостоянок затронуты в следующих нормативных документах: СНиП 21-02-99 «Стоянки автомобилей»; МГСН 5.01-01 «Стоянки легковых автомобилей»; ДБН В.2.3-15:2007 «Автостоянки и гаражи для легковых автомобилей» (Украина); ТКП 45-3.02-25-2006 (02250) «Гаражи-стоянки и стоянки автомобилей. Нормы проектирования» (Республика Беларусь); *VDI 4466 Blatt 1. Automatische Parksysteme – Grundlagen* (Германия); *EN 14010:2003+A1:2009. Sicherheit von Maschinen – Kraftbetriebene Parkeinrichtungen für Kraftfahrzeuge – Sicherheits- und EMV-Anforderungen an Gestaltung* (Европейский союз).

На основе материалов первой главы в выводах, в частности, отмечены существенные различия между автомобильными подъёмниками и накопителями элеваторного типа как конструктивного, так и эксплуатационного характера, например, при нормальной работе устройств в режимах загрузки/выгрузки автомобилей и движения тягового органа. Отсутствуют методики расчёта и оптимального проектирования НМК как РСПА, так и АНЭТ и АПЭТ, учитывающие особенности их эксплуатации. Неизвестна нормативная документация, которая регламентировала бы нормы расчёта РСПА.

Во второй главе рассмотрены вопросы, связанные с исследованием и оценкой напряжённого состояния НМК АПЭТ (*четвёртый* этап на рис. 3).

При проектировании НМК АПЭТ учитывались нагрузки, возникающие при нормальной работе подъёмника, возможных аварийных ситуациях и его испытаниях. Для наглядности взаимодействия основных элементов АПЭТ предложена блок-схема (рис. 5), в соответствии с которой, например, автомобиль вместе с водителем располагается на несущей платформе, подвешенной на консолях тягового органа, которые, в свою очередь, опираются на основные направляющие НМК. В то же время несущая платформа опирается на направляющие против её продольного и поперечного раскачивания, закреплённые на НМК, а в режиме загрузки/выгрузки продольное перемещение автомобилей внутри АПЭТ приводит к появлению усилий взаимодействия несущих платформ с НМК.

В части определения нагрузок на НМК АПЭТ в рамках диссертационной работы рассмотрены следующие вопросы: расположение консоли на прямолинейном участке трассы тягового органа; взаимодействие несущей платформы с её направляющими; взаимодействие несущей платформы с НМК в режиме загрузки/выгрузки автомобилей; тяговый расчёт трассы тягового органа; взаимодействие НМК с тяговыми звёздочками; взаимодействие НМК с

промежуточным валом; взаимодействие НМК с приводом (двигатель, редуктор) и элементами натяжного устройства.

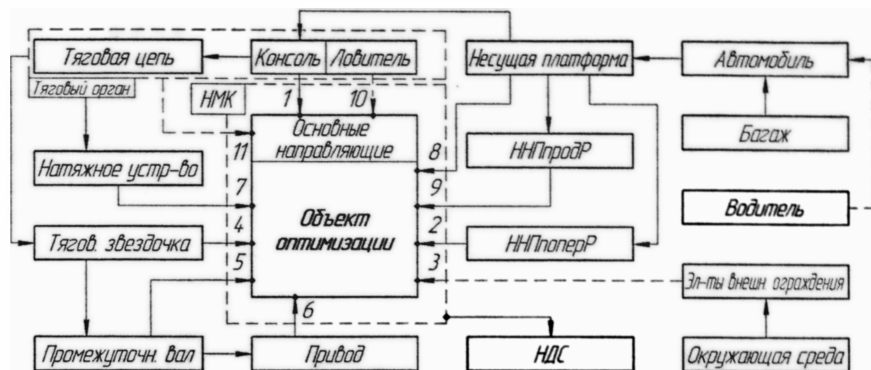


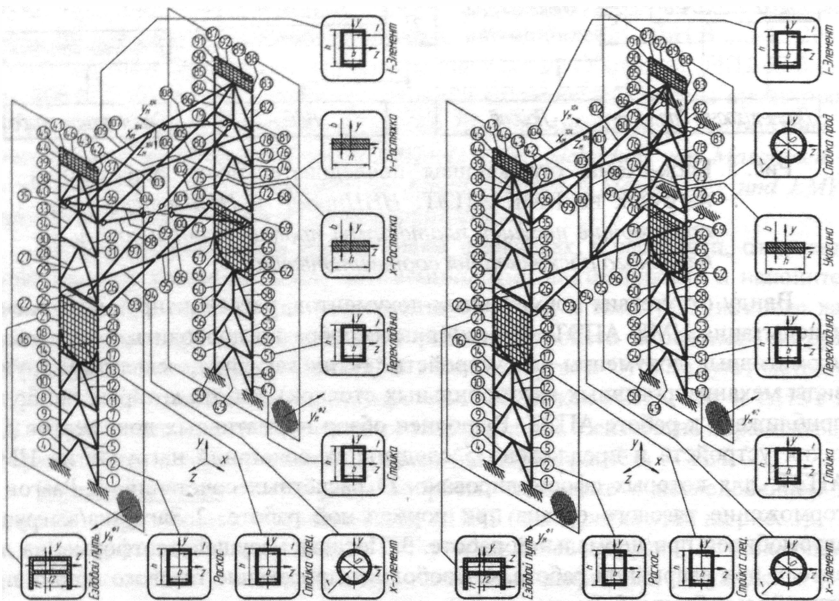
Рис. 5. Блок-схема, отражающая последовательность образования нагрузок на НМК АПЭТ: *ННПпродР* и *ННПперР* – направляющие несущей платформы против продольного и поперечного раскачивания соответственно

Ввиду отсутствия нормативных документов, регламентирующих расчёт и испытания НМК АПЭТ, её расчёт целесообразно проводить, опираясь на нормативные документы для устройств (таких как лифт, эскалатор, другие виды механизированных автомобильных стоянок), работа которых наиболее приближена к работе АПЭТ. Выполнен обзор нормативных документов для таких устройств и предложено 5 следующих сочетаний нагрузок на НМК АПЭТ, для которых сформулировано 29 расчётных сочетаний: 1. Разгон и торможение тягового органа при нормальной работе. 2. Загрузка/выгрузка автомобилей при нормальной работе. 3. Посадка несущей платформы на ловители при аварийной работе. 4. Свободное проседание тягового органа при аварийном обрыве. 5. Режим статических испытаний.

Статический расчёт НМК ведётся по методу допускаемых напряжений. С учётом вероятности работы АПЭТ в том или ином режиме приняты следующие значения коэффициента запаса прочности: 1,65 – режимы нормальной работы; 1,15 – аварийные режимы; 1,30 – статические испытания.

Для учёта влияния динамики подвижных элементов АПЭТ при определении нагрузок приняты следующие значения коэффициентов динамичности: $k_d = 1 + a/g$ – для подвижных элементов и перемещаемых автомобилей в период разгона/торможения тягового органа, где a – ускорение разгона/торможения подвижных элементов; k_d равен от 1,0 до 4,0 – для подвижных элементов в момент обрыва в тяговом органе (пропорционально расстоянию от нижней точки трассы тягового органа до рассматриваемого элемента АПЭТ). Предполагается, что обрыв в тяговом органе произойдёт на участке с наибольшим натяжением. Горизонтальное усилие, образующееся в результате разгона/торможения автомобиля, передаваемое на несущую плат-

Методика оптимального проектирования НМК АПЭТ (рис. 3) апробирована на двух вариантах НМК (рис. 6), отличающихся комбинацией внешних закреплений и видом продольной части (модули Б и В на рис. 2): один вариант (рис. 6, а) имеет внешние закрепления лишь в основании, другой (рис. 6, б) – в основании и в четырёх узлах одного из фасадов. Элементы НМК объединены в группы элементов, поперечные сечения которых имеют одинаковые типы и размеры. Материал ездовых путей НМК 14Г2, остальных элементов – ВСт3сп5.



Выполнено исследование НДС (четвёртый этап на рис. 3) вариантов НМК (рис. 6) в зависимости от расположения подвижной нагрузки, в результате которого выявлены наиболее неблагоприятные расчётные сочетания, при коих образуются наибольшие эквивалентные напряжения в группах элементов НМК. На рис. 7 показаны расчётные схемы варианта НМК «с опиранием» для различных сочетаний нагрузок со следующими типами опор: абсолютное защемление – А, Б, В, Г; шарнирно-подвижная опора – Д, Е, Ж, З.

8

няты на основе обзора АНЭТ. На этапе исследования НМК и последующем этапе её оптимизации для экономии времени целесообразно применение в модели балочных элементов, на заключительном этапе контроля – объёмных конечных элементов (КЭ). Численные значения параметров моделей определены в расчётном модуле *Pro/Mechanica* системы *Creo Elements/Pro* (известна как *Pro/Engineer*) версии *WildFire 3.0 EE*.

Поскольку модель НМК АПЭТ должна учитывать все наиболее существенные факторы реальной конструкции, но в то же время не должна быть слишком перегруженной, в целях сокращения времени, необходимого для расчёта моделей НМК, а также для автоматизации работы с ними, в моделях применен ряд специальных приёмов. К специальным приёмам относятся: параметризация моделей, позволяющая при изменении управляющих параметров посредством специальных уравнений автоматически изменять зависимые параметры, участвующие в вычислениях; применение модуля *Pro/Table* для сведения в одну таблицу всех численных данных о нагрузках в различных сочетаниях; дополнительное разбиение КЭ моделей для учёта нагрузок приложенных вне узлов; передача усилия на НМК от несущих платформ с использованием специального инструмента *Weighted Link* расчётного модуля *Pro/Mechanica*, сбалансированно распределяющего передаваемые усилия на набор узлов модели; идеализация пластин балочными элементами; моделирование растяжек равнопрочными канатами, тонкими пластинами и пр. Модели вариантов НМК обеспечивают построение зависимостей ряда параметров (напряжения, перемещения) от расположения подвижной нагрузки для расчётных сочетаний с движением тягового органа; минимальный шаг перемещения подвижной нагрузки принят равным 40 мм.

Для расчётных сочетаний с движением тягового органа построены линии влияния (пример на рис. 8). Перемещение точек приложения подвижных нагрузок вместе с тяговым органом выполнялось с постоянным шагом. На каждом шаге вычислялось НДС НМК. Данные о наибольших эквивалентных напряжениях в группах элементов вариантов НМК при различных расчётных сочетаниях сведены в таблицы, по которым затем определены наиболее неблагоприятные расчётные сочетания (табл. 1). Для расчётных сочетаний с перемещением тягового органа АПЭТ найдены значения смещений его несущих платформ относительно загрузочных позиций, при которых образуются наибольшие эквивалентные напряжения в определенных группах элементов НМК. Установлено, что элементы фасадов вариантов НМК наиболее нагружены в аварийных режимах работы АПЭТ; элементы продольной части вариантов НМК максимально нагружены при работе АПЭТ в режиме загрузки/выгрузки автомобилей; элементы группы элементов «специальная стойка» наиболее нагружены в режиме статических испытаний АПЭТ.

В табл. 1 для обозначения расчётных сочетаний нагрузок используются следующие индексы: случаи аварийной работы АПЭТ 1.1.3 – подъём одного автомобиля, 1.2.4.1, 1.2.4.2, 1.2.4.3 – перемещение двух автомобилей; случаи нормальной работы АПЭТ в режиме загрузки/выгрузки автомобилей 2.1.1.2, 2.1.1.6, 2.1.1.8 и случай 2.2.1 выполнения статических испытаний АПЭТ.

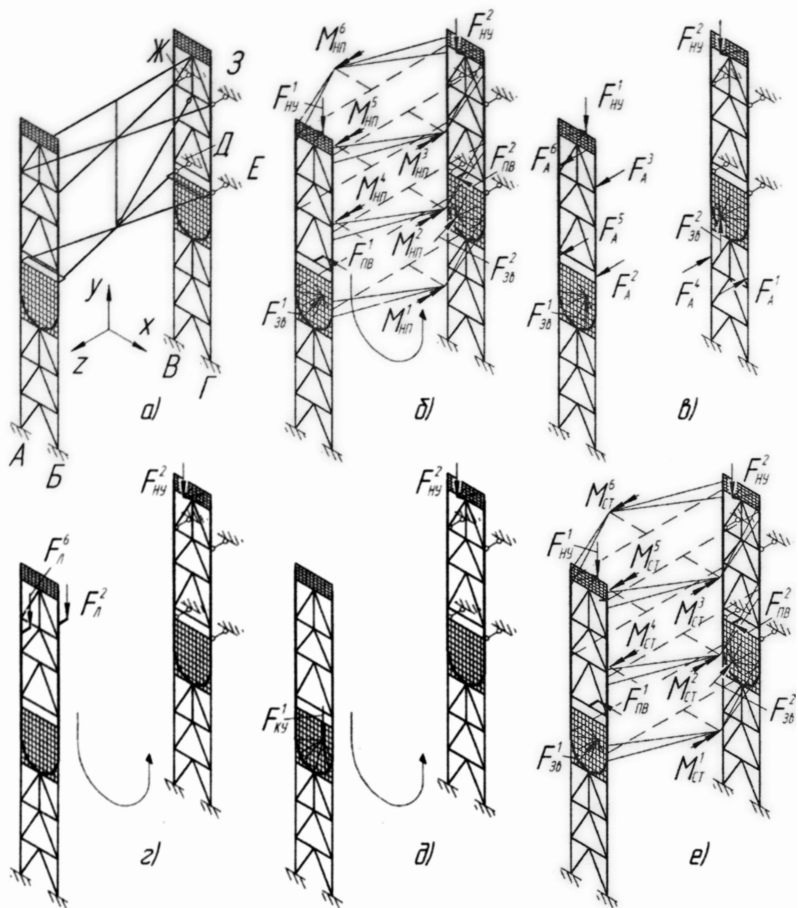
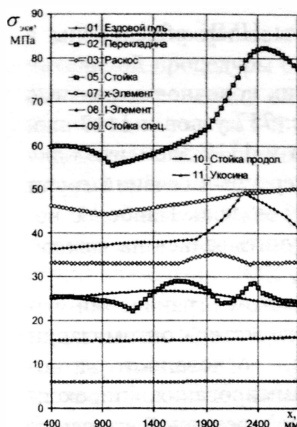


Рис. 7. Расчётные схемы НМК АПЭТ: а – без приложения нагрузок; б – рабочий режим с перемещением автомобилей; в – рабочий режим загрузки/выгрузки автомобилей; г – аварийный режим обрыва цепи тягового органа и посадки несущих платформ на ловители; д – аварийный режим обрыва цепи тягового органа и его проседания в нижней части направляющих трассы подъёмника; е – режим статических испытаний. На схемах б–е продольная часть НМК не показана. На схемах в–д не показаны нагрузки от несущих платформ с автомобилями



Установлено также, что важным направлением развития темы оптимального проектирования НМК АПЭТ является экспериментальное

исследование возможных аварийных ситуаций в АПЭТ. Подчеркнута необходимость в разработке норм и правил проведения испытаний РСПА.

В третьей главе изложены вопросы параметрической оптимизации НМК АПЭТ (пятый этап работы, рис. 3). На данном этапе прорабатываются основные составляющие оптимизационной модели: целевая функция, независимые переменные и ограничения; выполняется поиск наилучших сочетаний значений независимых переменных вариантов (рис. 6) НМК АПЭТ.

В качестве критерия параметрической оптимизации НМК принята её масса. Независимыми переменными являются размеры поперечных сечений групп элементов НМК. В общем виде целевая функция критерия имеет вид

$$M = \sum_{i=1}^N (\rho_i A_i l_i), \quad (1)$$

где ρ_i – плотность материала i -го элемента; A_i – площадь поперечного сечения i -го элемента; l_i – длина i -го элемента; N – общее число элементов в НМК.

Оптимизацию НМК АПЭТ предлагается выполнять с учётом следующих ограничений: 1. Ограничения по прочности (напряжения в элементах НМК при наиболее неблагоприятных расчётных сочетаниях, не должны превышать предельно допустимых значений). 2. Ограничения по устойчивости. (Разработан подход к выборочной проверке внецентренно-сжатых стержневых элементов на устойчивость в соответствии со СНиП II-23-81* в *Creo Elements/Pro*, его действенность подтверждена решением тестовых задач) 3. Ограничения гибкости стержневых элементов. 4. Ограничения по жёсткости (в ряде случаев ограничивается перемещение узлов НМК). 5. Конструктивные ограничения (типоразмеры стандартных сортовентов ог-

Рис. 8. Зависимости наибольших эквивалентных напряжений в группах элементов варианта НМК «с опиранием» от смещения x подвижной нагрузки для расчётного сочетания «одновременный подъём и спуск двух автомобилей со второго уровня»

Табл. 1. Соответствие расчётных сочетаний нагрузок группам элементов НМК

Порядк. номер	Группа элементов	Вариант НМК			
		«без опирания»		«с опиранием»	
		Расч. сочет.	Смещ. НП, м	Расч. сочет.	Смещ. НП, м
01	Ездовой путь	1.2.4.2	0,72	1.2.4.2	0,72
02	Перекладина	1.2.4.3	2,32	1.2.4.3	2,32
03	Раскос	1.2.4.3	2,16	2.2.1	0
04	х-Растяжка	2.1.1.2	0	–	–
05	Стойка	1.2.4.2	0,76	1.2.4.1	0,80
06	л-Растяжка	1.2.4.3	0,40	–	–
07	х-Элемент	2.1.1.8	0	2.1.1.6	0
08	л-Элемент	1.1.3	2,28	2.2.1	0
09	Спец. стойка	2.2.1	0	2.2.1	0
10	Прод. стойка	–	–	1.2.4.1	3,20
11	Укосина	–	–	2.1.1.8	0

раничивают область допустимых решений; элементы НМК объединены в группы) и др.

Для оптимизации вариантов НМК разработаны их конечно-элементные модели на основе балочных элементов, включающие: 757 узлов и 1117 элементов для варианта НМК «опиранием», и 762 узла и 1119 элементов для другого варианта НМК. Варьировались размеры поперечных сечений групп элементов с числом переменных равным 20 в каждой модели. Наиболее неблагоприятные расчётные сочетания автоматически учитывались на каждой основной итерации процедуры оптимизации.

Поиск минимумов масс (1) вариантов НМК с учётом ограничений выполнялся с применением универсального итеративного метода оптимизации – последовательное квадратичное программирование, – основанного на последовательном решении задач квадратичного программирования, аппроксимирующих исходную задачу оптимизации. На каждой основной итерации посредством модифицированного квазиньютоновского метода аппроксимируется Гессиан для функций Лагранжа. Такой подход необходим для постановки подзадачи квадратичного программирования, решение которой используется в процедуре линейного поиска при задании его направления.

Задача оптимизации с ограничениями в общем виде записывается

$$f(x) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $x \in D$, $D = \{x \in R^n \mid F_i(x) = 0, i \in \varepsilon, G_j(x) \leq 0, j \in I\}$; $F_i(x)$, $G_j(x)$ – функции линейных и нелинейных ограничений соответственно.

Задача (2) на k -й итерации вблизи приближения x_k к искомой стационарной точке $\bar{x}$ аппроксимируется задачей квадратичного программирования

$$1/2 d^T B_k d + \nabla f(x_k)^T d \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $d = (x - x_k) \in D_k$, $D_k = \{d \in R^n \mid \nabla F_i(x_k)^T d + F_i(x_k) = 0, \nabla G_j(x_k)^T d + G_j(x_k) \leq 0, i \in \varepsilon, j \in I\}$; $B_k \in R(n, n)$ – некоторая симметрическая матрица.

Задача (3) решается на основе метода квадратичного программирования.

С целью достижения глобального минимума процедура оптимизации выполнялась для различных начальных значений переменных параметров. Решение задачи (2) для функции (1) массы НМК дало оптимальные значения параметров вариантов НМК (рис. 6) (масса НМК вариантов «с...» и «без опирания» равна 5586 и 5814 кг, соответственно), на основе которых приняты стандартные профили для поперечных сечений групп элементов.

Выполнение параметрической оптимизации НМК показало, что не все группы её элементов загружены на 100%. В варианте НМК «без опирания» полностью загружены: группа элементов «х-Элемент» при рабочем сочетании нагрузок «Загрузка/выгрузка автомобилей», группа элементов «v-Растяжка» – при аварийном сочетании нагрузок «Проседание тягового органа». Это связано с выполнением для них иных ограничений, а также с тем, что их удельный вес в НМК невелик. Приложение дополнительных связей к НМК АПЭТ в варианте НМК «с опиранием», по сравнению с вариантом НМК «без опирания», не дало существенного эффекта.

Анализ графиков изменения массы вариантов НМК на итерациях заключительной процедуры оптимизации (рис. 9) показывает, что сокращение разрыва в массе между оптимальными и исходными вариантами НМК на 90% происходит уже на 8-й итерации для варианта «без опирания» и на 9-й – для варианта «с опиранием», что свидетельствует о высокой скорости поиска оптимума используемого метода оптимизации.

На *шестом* этапе работы (рис. 3) подбираются стандартные поперечные сечения для групп элементов НМК и создаётся её твердотельная модель (*седьмой* этап работы), анализируется её НДС. Кратко изложен порядок конструирования узлов НМК с учетом расчета ее на усталость. Обобщены данные о наиболее нагруженных элементах вариантов НМК при различных расчётных сочетаниях.

При нормальной работе АПЭТ наиболее нагружены элементы (рис. 6): 1, 17, 18 – вариант НМК «без опирания»; 43, 47, 57, 88, 91, 92 – вариант НМК «с опиранием». После испытаний АПЭТ контролю подлежат элементы: 17 – вариант НМК «без опирания»; 43, 47, 63, 87 – вариант НМК «с опиранием».

В четвёртой главе даются рекомендации по практическому применению методики оптимального проектирования НМК АПЭТ, которые поделены на три раздела: обоснование геометрической формы НМК АПЭТ, исследование НДС НМК АПЭТ и оптимизация параметров НМК АПЭТ.

Порядок выполнения пятого этапа (рис. 3) работы – параметрической оптимизации НМК, представлен на соответствующей блок-схеме (рис. 10).

На основе результатов работы отмечены некоторые особенности конструирования НМК АПЭТ, а также сформулированы рекомендации по разработке нормативной документации для РСПА, включающие следующие разделы: основные параметры и нагрузки РСПА, испытания РСПА, а также дан ряд ссылок на зарубежные нормативные документы для МАС.

Отмечено, что методика, ориентированная на инженеров, обладающих основными навыками в работе с программой *Creo Elements/Pro*, и, нацеленная главным образом на АПЭТ, применима к различным РСПА, а также частично к другим типам механизированных систем парковки автомобилей.

В приложении к диссертации: дано экономическое обоснование внедрения АПЭТ; представлены релевантная информация о НМК различных АНЭТ, тяговый расчет трассы тягового органа, результаты тестовых задач для подхода к проверке сжато-изгибаемых элементов НМК на устойчивость и способа идеализации пластин балочными элементами; дана оценка пригодности моделей на основе стержневых КЭ и метода последовательного квадратичного программирования для решения требуемых задач; приведён сравнительный анализ по производительности АПЭТ с лифтовыми подъемниками, программный код (на языке *Creo Elements/Pro*) для автоматизированного вычисления нагрузок на НМК; отражены результаты (20 графиков) исследования вариантов НМК АПЭТ; вложены копии патентов.

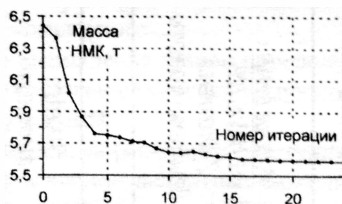


Рис. 9. Изменение целевой функции при оптимизации варианта НМК «с опиранием»

Рис. 10. Блок-схема последовательности выполнения параметрической оптимизации ИМК АПЭТ

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснована новая конструктивная форма роторной системы парковки автомобилей – автомобильный подъёмник элеваторного типа и разработана комплексная методика оптимального проектирования его НМК (далее – методика), включающая алгоритм проектирования, примеры его реализации и сформированные на их основе практические рекомендации.

2. В соответствии с последовательностью выполнения этапов определения наилучшей компоновки модулей НМК и топологии её панелей получены варианты НМК АПЭТ «с опиранием» и «без опирания».

3. Обоснованы нагрузки на НМК и предложены их расчётные сочетания, созданы расчётные схемы вариантов НМК, их конечно-элементные модели, отражающие взаимодействие НМК с подвижными элементами АПЭТ и учитывающие их различное расположение.

4. С использованием разработанных конечно-элементных моделей вариантов НМК АПЭТ на основе исследования их напряжённо-деформированного состояния выявлены наиболее неблагоприятные расчётные сочетания нагрузок (для случаев с движением тягового органа получены зависимости наибольших эквивалентных напряжений в группах элементов НМК от расположения подвижной нагрузки относительно загрузочных позиций). Установлено, что элементы фасадов НМК наиболее нагружены в аварийных режимах, а элементы продольной части НМК – при работе АПЭТ в режиме загрузки/выгрузки автомобилей.

5. В результате параметрической оптимизации вариантов НМК («с опиранием» и «без опирания») АПЭТ по металлоёмкости с учётом ограничений по несущей способности и конструктивных ограничений определены наилучшие сочетания значений их независимых переменных (размеры поперечных сечений групп элементов) и приняты соответствующие стандартные профили элементов. В частности, показано, что масса оптимизированного варианта НМК «без опирания» превышает массу другого варианта на 4,1%.

6. В результате анализа напряжённого состояния оптимизированных вариантов НМК (со стандартными профилями) АПЭТ выявлены их наиболее нагруженные элементы, которые принадлежат фасадам НМК и главным образом сосредоточены в её основании, а также возле криволинейных участков траектории тягового органа.

7. В дальнейшем при совершенствовании алгоритмов проектирования АПЭТ целесообразно экспериментальное исследование возможных аварийных ситуаций в АПЭТ, а также уточнение порядка выбора сочетания внешних связей НМК в зависимости от конфигурации ближайших к подъёмнику объектов (в частности, неподвижных элементов здания ГК).

8. Предложены рекомендации к подготовке норм проектирования роторных систем парковки автомобилей, касающиеся вопросов определения нагрузок и проведения испытаний.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Патент № 53341 (РФ). Многоэтажная автостоянка / С. Г. Гнездилов [и др.] // Б.И. 2006. № 13.
2. Патент № 2297502 (C2) (РФ). Механизированный гараж / С. Г. Гнездилов [и др.] // Б. И. 2007. № 11.
3. Определение оптимальных геометрических параметров автомобильных подъёмников элеваторного типа / С. Г. Гнездилов [и др.] // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Матер. XII Моск. межвуз. научно-техн. конф. студ., аспи. и мол. учёных (с междунар. участ.). М., 2008. С. 28–29.
4. Принципы оптимального проектирования несущих металлоконструкций автомобильного подъёмника / С. Г. Гнездилов [и др.] // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Матер. XIII Моск. межвуз. научно-техн. конф. студ., аспи. и мол. учёных (с междунар. участ.). М., 2009. С. 30–31.
5. Патент № 2354792 (C1) (РФ). Способ компоновки модулей механизированных автостоянок элеваторного типа / С. Г. Гнездилов [и др.] // Б. И. 2009. № 13.
6. Гнездилов С. Г. Совершенствование конструктивных форм автомобильных подъёмников элеваторного типа // Подъёмно-транспортное дело. 2009. №4. С. 2–5.
7. Развитие классификации и терминологии в области механизированных автомобильных стоянок / С. Г. Гнездилов [и др.] // Подъёмно-транспортное дело. 2009. №5–6. С. 12–14.
8. Оптимальное проектирование несущей металлоконструкции автомобильного подъёмника элеваторного типа / С. Г. Гнездилов [и др.] // Подъёмно-транспортные, строит., дорож., пут. машины и робототехнические комплексы: Матер. XIV Моск. междунар. межвуз. научно-техн. конф. студ., аспи. и мол. учёных. М., 2010. С. 30–32.
9. Положения оптимального проектирования роторных систем парковки автомобилей / С. Г. Гнездилов [и др.] // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: Матер. 71-й междунар. научно-техн. конф. Нижний Новгород, 2010. С. 16–17.
10. Методика обоснования структуры панелей несущей металлоконструкции автомобильного подъёмника элеваторного типа / С. Г. Гнездилов [и др.] // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: Матер. XV Моск. междунар. межвуз. научно-техн. конф. студ., аспи. и мол. учёных. М., 2011. С. 48–50.
11. Гнездилов С. Г. Напряжённо-деформированное состояние металлоконструкции автомобильного подъёмника элеваторного типа при различных сочетаниях нагрузок // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 6. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/192130.html>.