

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

КОСТРИЦА СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

УДК 621.869.8

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КРУПНО-  
ТОННАЖНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и  
тяга поездов

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Днепропетровск  
1987

НТБ  
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина.

Научный руководитель - Заслуженный работник высшей школы УССР, доктор технических наук, профессор Е. П. Блохин.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент И. Г. Барбас.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Л. А. Манашкин

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник Д. В. Демян

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Защита диссертации состоится "26" июня 1987 г.  
в 13 ч. 00 мин. на заседании специализированного Совета  
К II4.07.01 в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени  
институте инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина  
по адресу: 320700, ГСП, Днепропетровск, ул. Академика Лазаряна, 2,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "25" мая 1987 г.

НТБ  
ДНУЖТ

Актуальность темы. Новые рубежи развития нашей страны, намеченные XXVI съездом КПСС и нашедшие отражение в "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года", ставят перед железнодорожным транспортом ряд важных задач, к числу которых относится увеличение грузооборота, провозной и пропускной способности дорог. Большая роль в решении поставленных задач отводится контейнерным перевозкам, в частности, перевозкам с применением крупнотоннажных контейнеров.

В условиях общей интенсификации транспортного процесса на грузки, действующие на крупнотоннажные контейнеры в процессе эксплуатации, возросли. Это привело к тому, что участились случаи выхода из строя контейнеров из-за значительных повреждений некоторых элементов их конструкции.

По данным МПС СССР число крупнотоннажных контейнеров, не выдерживающих нормативных сроков эксплуатации и поступающих во внеплановый ремонт по техническому состоянию, неуклонно растет, причем наиболее часто встречаются повреждения конструкции контейнеров вследствие соударений контейнерных платформ с другими вагонами при проведении маневровых операций. Имеют место также повреждения, полученные контейнерами при перегрузке их с одного вида транспорта на другой, штабелировании, проведении погрузочно-разгрузочных и других операций. Поэтому наряду с решением организационных вопросов, направленных на увеличение численности крупнотоннажных контейнеров и расширение перевозок с их применением, возникает необходимость в решении задач по совершенствованию конструкции контейнеров, а также исследованию факторов, оказывающих наибольшее влияние на их напряженно-деформированное состояние в условиях эксплуатации.

В связи с этим, задача, состоящая в разработке методики и проведении теоретических исследований напряженно-деформированного состояния крупнотоннажных контейнеров при действии различных эксплуатационных нагрузок, представляется актуальной.

Цель настоящей работы состоит в создании методики для исследования напряженно-деформированного состояния крупнотоннажных контейнеров в условиях эксплуатации. Основными направлениями исследования являются:

- разработка методики теоретического исследования напряженно-де-

формированного состояния крупнотоннажного контейнера при статических нагрузках;

теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния контейнера повышенной грузоподъемности от действия нагрузок, предусмотренных Правилами типовых испытаний крупнотоннажных контейнеров;

- разработка математической модели движения системы "железнодорожная платформа-контейнер-груз" и методики исследования нагруженности крупнотоннажного контейнера при продольном ударе;

- оценка напряжений, возникающих в элементах конструкции крупнотоннажных контейнеров при соударениях вагонов, в зависимости от условий загрузки контейнеров и платформы и способа крепления контейнеров к платформе.

Методы исследования. В работе применен метод конечных элементов в форме метода перемещений. Для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение системы "железнодорожная платформа-контейнер-груз" при продольном ударе, использован метод Ньюмарка, относящийся к методам прямого интегрирования.

Результаты теоретических исследований сопоставлены с результатами натурных испытаний.

#### Научная новизна:

- применен метод конечных элементов к исследованию нагруженности крупнотоннажного контейнера, представленного в виде пространственной пластинчато-стержневой системы;

- проведен анализ различных расчетных схем для оценки нагруженности элементов конструкции крупнотоннажного контейнера. Показано какие расчетные схемы целесообразно применять для оценки прочности контейнера при конкретном режиме эксплуатации;

- разработан способ определения динамической нагруженности крупнотоннажного контейнера при продольном ударе. Расчетная схема системы "железнодорожная платформа-контейнер-груз" выбрана в виде пространственной стержневой системы с нелинейными связями.

При решении задачи нелинейная механическая система представляется в виде нескольких линейных, связанных между собой силами взаимодействия, имитирующих нелинейные связи.

- приведен анализ динамических напряжений, возникающих в элементах конструкции крупнотоннажного контейнера в зависимости от условий загрузки грузов в контейнеры и размещения контейнеров на платформе.

Практическое значение. Разработанная методика позволяет на стадии проектирования и доработки опытных образцов, прогнозировать напряжения в элементах конструкции крупнотоннажных контейнеров при различных эксплуатационных нагрузках. На основании результатов теоретических исследований даны рекомендации по выбору рациональных параметров некоторых элементов конструкции крупнотоннажных контейнеров и способу их крепления к железнодорожной платформе.

Приведенная в работе методика может быть использована для исследования влияния подвижности твердых грузов на напряженно-деформированное состояние вагонов при продольном ударе.

Внедрение результатов. Предлагаемая в работе методика прогнозирования напряжений, возникающих в элементах конструкции крупнотоннажных контейнеров при проведении типовых испытаний (согласно ГОСТ 20259-80), внедрена на контейнерном производстве Ильичевского судоремонтного завода (ИСРЗ). По данной методике проведено исследование прочности крупнотоннажного контейнера типа ИСС повышенной грузоподъемности.

Результаты исследования нагруженности крупнотоннажных контейнеров при продольном ударе использованы в Главном управлении вагонного хозяйства Министерства Путей сообщения СССР для выработки рекомендаций по способам крепления крупнотоннажных контейнеров к железнодорожной платформе.

Алгоритмы и программы для ЕС ЭВМ, полученные в работе, применяются в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта для исследования напряженно-деформированного состояния некоторых типов транспортных экипажей при продольном ударе.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (г. Днепропетровск, 1980), научно-технической конференции молодых ученых и специалистов железнодорожного транспорта, посвященной 63-летию ВЛКСМ (г. Днепропетровск, 1981), У1 тематической конференции "Практическая реализация численных методов расчета инженерных конструкций" (г. Ленинград, 1983), Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (г. Днепропетровск, 1984), тематической конференции "Проблемы численного моделирования и автоматизации проектирования инженерных конструкций" (г. Ленинград, 1986) городском семинаре по общей механике (г. Днепропетровск, 1987 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура работы. Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения и списка литературы. Работа содержит 103 страницы машинописного текста, 48 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения, списка литературы из 117 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность поставленной задачи, сформулированы цели исследования. Изложены новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведена общая характеристика крупнотоннажных контейнеров, дано описание их конструкции и условий эксплуатации на железнодорожном транспорте. Приведен краткий обзор литературы, характеризующий современные исследования нагруженности крупнотоннажных контейнеров в условиях эксплуатации.

В настоящее время контейнерные перевозки, являющиеся одним из наиболее современных и экономичных способов транспортировки многих видов грузов, нашли широкое применение как во внутренних, так и в международных сообщениях. В общем объеме контейнерных перевозок в нашей стране и за рубежом неуклонно повышается роль крупнотоннажных контейнеров (грузоподъемностью 10 т и более). Параметры, размеры и конструкция этих контейнеров унифицированы и находятся в соответствии с требованиями Международной Организации по Стандартизации (ИСО). Большую часть мирового контейнерного парка составляют универсальные крупнотоннажные контейнеры серии ИСО. Основными элементами их конструкции являются: каркас, обшивка, двухстворчатая дверь и деревянный настил пола. Каркас состоит из базовой (нижней) рамы, верхних и нижних поперечных балок дверного проема и торцевой стенки, верхних продольных балок и угловых стоек. По его углам расположены фитинги для подъема контейнера и крепления при транспортировке. Обшивка изготавливается из гофрированных листовых панелей, пол из клееных досок или фанеры.

Отечественный парк крупнотоннажных контейнеров состоит, в основном, из контейнеров серии ИСО типов IC и ICC, имеющих массу брутто 20,32 т, внешние размеры соответственно 6058x2438x2438 и 6058x2438x2591 мм. В последнее время в мировом контейнеростроении наблюдается тенденция создания контейнеров типа ICC с увеличенной

до 24 т массой брутто. В СССР серийное производство таких контейнеров начато с 1985 года и в перспективе они должны стать основой контейнерного парка страны.

Исследования по разработке теоретических основ, определению эффективности и рациональных областей использования крупнотоннажных контейнеров нашли отражение в трудах Э.К.Блинова, Г.П.Гриневица, А.Т.Дерибаса, К.Н.Клименко, Л.А.Когана, Х.А.Локшина, В.Т.Осипова, Ф.А.Пладиса, Н.В.Сотского, Г.Э.Сурмаева, В.А.Шкурина и др. авторов.

В процессе эксплуатации крупнотоннажных контейнеров на железнодорожном транспорте наибольшее повреждающее воздействие на элементы их конструкции оказывают ударные нагрузки, возникающие во время маневровых работ и переходных режимах движения поезда. Исследованию динамической нагруженности вагонов при переходных режимах движения поездов и соударениях посвящены работы В.А.Лазаряна, Б.П.Блохина, Д.П.Бороненко, С.В.Вершинского, Л.А.Манашкина, Л.Н.Никольского, Н.А.Панькина, В.Д.Хусидова, Ю.М.Черкашина и др.

Вопросам теоретического исследования динамической нагруженности платформ для перевозки крупнотоннажных контейнеров при продольном ударе посвящены работы Е.П.Блохина, Л.А.Манашкина, А.В.Юрченко и др. исследователей. Экспериментальные исследования динамики контейнерных платформ при соударениях проводились в ЛИИЖТе и ВНИИВе. Однако напряженно-деформированное состояние самих крупнотоннажных контейнеров в этих работах не рассматривалось.

Исследования напряженно-деформированного состояния крупнотоннажных контейнеров при статических нагрузках, соответствующих различным режимам их эксплуатации, проводились, в основном, экспериментальным путем. Методика проведения стендовых испытаний крупнотоннажных контейнеров разработана во ВНИИВе. Для теоретических расчетов применялись упрощенные расчетные схемы, недостаточно точно отражающие особенности работы конструкции контейнера при том или ином виде нагружения.

Таким образом, проблема теоретических исследований напряженно-деформированного состояния конструкции крупнотоннажных контейнеров, как при статических, так и при динамических нагрузках представляется актуальной.

В заключении главы для решения поставленной задачи обоснована целесообразность применения метода конечных элементов. Приведен

краткий обзор литературы по его применению.

Во второй главе изложены основные положения методики (би ирующейся на применении МКЭ) исследования напряженно-деформированного состояния крупнотоннажных контейнеров при статических нагрузках.

Здесь отмечается, что при внесении изменений в конструкцию серийно выпускаемых контейнеров и при проектировании новых, изготавливаются опытные образцы и проводятся их испытания. Во время проведения испытаний контейнер подвергается воздействию статических нагрузок (согласно ГОСТ 20259-80), имитирующих следующие эксплуатационные режимы:

- штабелирование;
- подъем за верхние и нижние угловые фитинги;
- подъем вилами погрузчика;
- продольное сжатие и растяжение основания;
- нагружение торцевой и боковых стенок;
- нагружение пола (въезд автопогрузчика внутрь контейнера);
- нагружение крыши;
- поперечный и продольный перекося конструкции.

Однако проведение самих испытаний и изготовление опытных образцов требует больших затрат материальных и временных ресурсов. Поэтому при проектировании новых и модернизации существующих контейнеров целесообразно проводить теоретические исследования напряженно-деформированного состояния их конструкции при действии статических нагрузок, соответствующих различным режимам эксплуатации.

Крупнотоннажный контейнер представляет собой сложную пространственную механическую систему, деформация одного из элементов которой вызывает изменение напряженного состояния многих других. Для исследования его напряженно-деформированного состояния практически при всех нагрузках, предусмотренных действующими стандартами можно использовать универсальную (полную) расчетную схему, представляющую собой пространственную пластинчато-стержневую систему, содержащую все основные элементы конструкции крупнотоннажного контейнера. Однако использование такой расчетной схемы на практике затруднено, т.к. это приводит к решению систем уравнений высокого порядка (число уравнений более 6000), а иногда просто невозможно из-за ограничений на размерность задачи, обусловленных возможностями используемой ЭВМ.

Основным элементом конструкции контейнера, усложняющим ее расчет, является гофрированная обшивка крыши, боковых и торцевых стенок контейнера. В работе предлагается прием, позволяющий значительно понизить порядок разрешающей системы МКЭ путем замены гофрированных пластин ортотропными и стержневыми системами. Упругие постоянные ортотропной пластины находятся из условия равенства потенциальной энергии деформации гофрированной и ортотропной пластин. Для определения жесткостных характеристик стержней потенциальная энергия деформации стержневой системы принимается равной потенциальной энергии ортотропной пластины.

Анализ результатов расчета полученных с использованием универсальных расчетных схем показал, что при большинстве видов нагружения в работу включается не вся конструкция, а только ее часть. Поэтому, на практике, более целесообразно рассматривать специальные расчетные схемы, используемые для оценки нагруженности какой-либо части контейнера при конкретном виде нагружения. Это приводит, в итоге, к значительному сокращению времени подготовки информации и счета на ЭВМ, дает возможность получить более достоверные результаты, оценить влияние изменений, вносимых в конструкцию контейнера, на нагруженность отдельных элементов и провести детальный анализ напряженно-деформированного состояния исследуемой части конструкции.

Таким образом, расчет на прочность крупнотоннажного контейнера необходимо начинать с анализа, который может быть выполнен с применением полной расчетной схемы либо с использованием экспериментальных данных, работы конструкции при рассматриваемых видах нагружения. На основе проведенного анализа выбираются расчетные схемы, с применением которых производится расчет по МКЭ наиболее нагруженной (при данном виде нагружения) части конструкции контейнера. Значительный эффект от использования предлагаемой методики достигается в случае проведения многовариантных расчетов, связанных с выбором рациональных параметров какого-либо отдельного элемента конструкции крупнотоннажного контейнера.

В третьей главе проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния крупнотоннажного контейнера типа ИСС повышенной грузоподъемности при различных эксплуатационных нагрузках. Показано применение разработанной методики к выбору рациональных параметров некоторых элементов конструкции контейнера. Дано сопоставление результатов расчета с эксперименталь-

ными данными.

Основными элементами конструкции крупнотоннажного контейнера, определяющими его прочность и жесткость в условиях эксплуатации, являются базовая рама, угловые стойки, боковые и торцевые стенки. Исследование напряженно-деформированного состояния этих и некоторых других элементов проводится с использованием специальных расчетных схем, описание которых приведено выше. Граничные условия выбираются в зависимости от условий работы конструкции при рассматриваемом нагружении.

Базовая рама крупнотоннажного контейнера представляет собой цельнометаллическую (сталь 09Г2С,  $[\sigma] = 310 \text{ МПа}$ ) сварную конструкцию и состоит из продольных и поперечных элементов, к которым крепится деревянный настил пола. Расчетная схема для исследования ее нагруженности выбирается в виде пространственной пластинчато-стержневой системы.

Проведенные расчеты показали, что наибольшие нормальные напряжения в поперечных элементах базовой рамы возникают при действии на пол контейнера сосредоточенных сил, вызванных колесами автопогрузчика, а также при подъеме контейнера за верхние или нижние угловые фитинги (соответственно 260 и 210 МПа). При подъеме контейнера вилами погрузчика наибольшие напряжения (290 МПа) имеют место в поперечных балках, имитирующих вилочные карманы. Наибольшие нормальные напряжения в нижней продольной балке (220 МПа) возникают при продольном растяжении (сжатии) основания.

Исследование напряженно-деформированного состояния угловых стоек проводится при нагрузках, действующих на контейнер в режиме штабелирования. Расчетная схема угловой стойки дверного проема выбирается в виде пространственной пластинчато-стержневой системы, угловой стойки торцевой стенки - в виде пространственной пластинчатой системы. При составлении расчетных схем принималось во внимание, что в режиме штабелирования, кроме угловых стоек, в работу включаются и другие элементы конструкции контейнера (поперечные балки дверного проема и торцевой стенки, обшивка боковых и торцевой стенок, боковые продольные балки, запорные штанги). Проведенные расчеты показали, что при штабелировании в угловых стойках возникают напряжения, близкие к  $[\sigma]$  для сталей, из которых они изготавливаются (дверная стойка - сталь 09Г2С, угловая стойка торцевой стенки - сталь 09Г2,  $[\sigma] = 290 \text{ МПа}$ ). Причем уровень напряжений в дверной стойке (290-310 МПа) выше, чем в угловой стойке

торцевой стенки (270–290 МПа).

Расчет на прочность боковой стенки (сталь Ст3,  $[\sigma] = 225$  МПа) при нагружении ее равномерно-распределенной нагрузкой проводится с учетом верхней и нижней продольных балок. Расчетная схема выбирается в виде пространственной пластинчатой системы. В силу симметрии конструкции и нагрузки рассматривается половина стенки. Выполненные расчеты показали, что наибольшие напряжения (190 МПа) имеют место в центральной части боковой стенки, а также то, что несколько центральных гофров имеют практически одинаковые прогибы и напряжения. Поэтому для определения максимальных прогибов и напряжений в центральной части боковой стенки, предлагается использовать упрощенную расчетную схему, которая включает один центральный гофр и примыкающие к нему элементы верхней и нижней продольных балок. С использованием указанной расчетной схемы проведено исследование напряженно-деформированного состояния боковой стенки при различных вариантах конструкции гофров, позволяющих увеличить внутренний объем контейнера с одновременной экономией металла. Результаты расчетов использованы технологическим отделом контейнерного производства ИСРЗ при выборе рациональных параметров гофрированной обшивки боковой стенки.

Расчетная схема для исследования напряженно-деформированного состояния торцевой стенки, в основном, идентична расчетной схеме боковой стенки, т.к. они (торцевая и боковая стенки) изготавливаются из одних и тех же гофрированных панелей. Максимальные напряжения в торцевой стенке (270 МПа) возникают в центральном гофре при действии равномерно-распределенной нагрузки, перпендикулярной к поверхности стенки.

Расчет на прочность крыши (сталь Ст3) контейнера проводится при нагружении ее грузом 3 кН. Расчетная схема выбирается в виде пространственной пластинчатой системы и включает в себя, кроме гофрированной обшивки, также верхние продольные балки. Максимальные нормальные напряжения в центре крыши составили 180 МПа.

В заключении данной главы приводится сравнение результатов теоретического расчета с экспериментальными данными, полученными ВНИИВом при проведении тензометрических испытаний контейнеров на ИСРЗ. Сравнение показало удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

В четвертой главе приводится математическая модель движения системы "железнодорожная платформа-контейнер-груз" при продольном

ударе, дается описание алгоритма расчета и программы для ЭВМ.

Во время эксплуатации крупнотоннажных контейнеров на железнодорожном транспорте, в частности, при проведении маневровых операций, нагрузки действующие на некоторые элементы их конструкции (фитинги, боковые продольные балки, торцевые стенки и др.) могут значительно превышать нормативные. В связи с этим возникла необходимость в проведении специальных исследований динамической нагруженности конструкции крупнотоннажных контейнеров при продольном ударе.

Расчетная схема для решения поставленной задачи выбирается в виде пространственной системы, состоящей из нескольких тел (железнодорожная платформа, контейнеры и находящиеся в них грузы), между которыми действуют силы взаимодействия, при этом каждое из рассматриваемых тел представляется в виде ансамбля конечных элементов.

Движение исследуемой системы при продольном ударе описывается дифференциальными уравнениями (рассеяние энергии учитывается только в поглощающих аппаратах и устройствах крепления контейнеров к платформе) следующего вида;

$$\left. \begin{aligned} M_1 \ddot{\bar{U}} + K_1 \bar{U} &= B_1 P + \sum_{k=1}^{N_k} B_{2k} \bar{R}_k^{nk} \\ M_{2i} \ddot{\bar{V}}_i + K_{2i} \bar{V}_i &= -B_{3i} \bar{R}_i^{ni} + B_{4i} \bar{R}_i^{nr} \\ M_{3i} \ddot{\bar{W}}_i + K_{3i} \bar{W}_i &= -B_{5i} \bar{R}_i^{nr} \end{aligned} \right\} (i = \overline{1, N_k}), \quad (I)$$

с начальными условиями

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}(0) &= \bar{U}_0; & \dot{\bar{U}}(0) &= \dot{\bar{U}}_0; \\ \bar{V}_i(0) &= \bar{V}_{0i}; & \dot{\bar{V}}_i(0) &= \dot{\bar{V}}_{0i}; \\ \bar{W}_i(0) &= \bar{W}_{0i}; & \dot{\bar{W}}_i(0) &= \dot{\bar{W}}_{0i}; \end{aligned} \right\} (i = \overline{1, N_k}), \quad (2)$$

где  $N_k$  — число контейнеров на платформе;  
 $M_1, M_{2i}, M_{3i}$  — матрицы масс ансамбля конечных элементов соответственно платформы,  $i$ -го контейнера и находящегося в нем груза;

$K_1, K_{2i}, K_{3i}$  — общие матрицы жесткости тех же ансамблей конечных элементов;

$\bar{U}, \bar{V}_i, \bar{W}_i$  — векторы узловых перемещений платформы,  $i$ -го контейнера и находящегося в нем груза;

$P$  - сила, действующая на платформу со стороны автосцепного устройства;

$\vec{R}_i^{nk}$  - вектор сил взаимодействия между платформой и  $i$ -м контейнером;

$\vec{R}_i^{kr}$  - вектор сил взаимодействия между  $i$ -м контейнером и находящимся в нем грузом;

$B_1, B_{2i}, B_{3i}$  - матрицы, учитывающие места приложения сил  $P$ ,  $\vec{R}_i^{nk}$  и  $\vec{R}_i^{kr}$ ;

Для численного интегрирования матричных дифференциальных уравнений (1) с начальными условиями (2) применяется метод прямого интегрирования Ньюмарка. Согласно этому методу решение исходных дифференциальных уравнений сводится к решению на каждом шаге интегрирования систем линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} K_1^* \vec{U}(t+\Delta t) &= B_1 P(t+\Delta t) + \sum_{k=1}^{N_k} B_{2k} \vec{R}_k^{nk}(t+\Delta t) + \vec{\Phi}_1(t); \\ K_{2i}^* \vec{V}_i(t+\Delta t) &= -B_{3i} \vec{R}_i^{kn}(t+\Delta t) + B_{4i} \vec{R}_i^{kr}(t+\Delta t) + \vec{\Phi}_{2i}(t); \\ K_{3i}^* \vec{W}_i(t+\Delta t) &= -B_{5i} \vec{R}_i^{kr}(t+\Delta t) + \vec{\Phi}_{3i}(t); \end{aligned} \right\} (i=1, N_k), \quad (3)$$

где  $K_1^*, K_{2i}^*, K_{3i}^*$  - так называемые эффективные матрицы жесткости;

$\vec{\Phi}_1(t), \vec{\Phi}_{2i}(t), \vec{\Phi}_{3i}(t)$  - векторы, зависящие от значений перемещений, скоростей и ускорений тел на предыдущем шаге интегрирования.

Численные значения матриц  $K_1^*, K_{2i}^*, K_{3i}^*$  и векторов  $\vec{\Phi}_1(t), \vec{\Phi}_{2i}(t), \vec{\Phi}_{3i}(t)$  находятся согласно процедуре метода Ньюмарка.

Из приведенных соотношений видно, что для определения искомого перемещения в момент времени  $(t + \Delta t)$  необходимо знать значения силы  $P$  и векторов сил взаимодействия  $\vec{R}^{nk}$  и  $\vec{R}^{kr}$  в тот же момент времени. Зависимость этих сил от времени в общем случае, неизвестна. Поэтому для определения  $P(t + \Delta t)$ ,  $\vec{R}^{nk}(t + \Delta t)$  и  $\vec{R}^{kr}(t + \Delta t)$  применяются дополнительные уравнения связи, описывающие зависимость этих сил от взаимных перемещений тел, участвующих в процессе соударения. Сила  $P$  рассматривается, как функция перемещения  $q_a$  точки платформы, соответствующей месту крепления автосцепки, относительно другого вагона или преграды. При этом считается, что контейнерная платформы и вагон, с которым происходит соударение, оборудованы поглощающими аппаратами упругофрикционного типа. Вектор сил взаимодействия  $\vec{R}_i^{nk}$  рассматри-

вается как функция взаимных перемещений  $\vec{q}_i^{nk}$  платформы и  $i$ -го контейнера в точках контакта. Здесь принимается во внимание, что в устройствах крепления контейнера к платформе имеют место зазоры. Их наличие приводит к тому, что при продольном ударе контейнер может перемещаться относительно платформы до тех пор, пока фитинги контейнера не достигнут упора платформы. После этого происходит удар контейнера об упор платформы. Аналогичные явления имеют место при наличии зазора между торцевой стенкой контейнера и находящимся в нем грузом ( $\vec{q}_i^{kr}$  - вектор относительных перемещений их узловых точек). С использованием аналитических зависимостей  $P(q_a)$ ,  $\vec{R}_i^{nk}(\vec{q}_i^{nk})$ ,  $\vec{R}_i^{kr}(\vec{q}_i^{kr})$  получены соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \vec{R}_i^{nk}(t+\Delta t) &= \vec{R}_i^{nk}(t) + \vec{F}_{zi}(\vec{q}_i^{nk}(t+\Delta t), \vec{q}_i^{nk}(t)); \\ \vec{R}_i^{kr}(t+\Delta t) &= \vec{R}_i^{kr}(t) + \vec{F}_{zi}(\vec{q}_i^{kr}(t+\Delta t), \vec{q}_i^{kr}(t)); \\ P(t+\Delta t) &= P(t) + f(q_a(t+\Delta t), q_a(t)); \end{aligned} \right\} (i=1, N_k).$$

После подстановки в эти выражения зависимостей векторов  $\vec{q}_i^{nk}(t+\Delta t)$ ,  $\vec{q}_i^{kr}(t+\Delta t)$  и перемещения  $q_a(t+\Delta t)$  от векторов  $\vec{R}_i^{nk}(t+\Delta t)$ ,  $\vec{R}_i^{kr}(t+\Delta t)$  и силы  $P(t+\Delta t)$ , найденных из (3), записываются уравнения для определения значений искомых сил в момент времени  $(t+\Delta t)$ . При этом компоненты векторов  $\vec{q}_i^{nk}$  и  $\vec{q}_i^{kr}$  находятся как разность соответствующих компонентов векторов  $\vec{U}$  и  $\vec{V}_i$  или  $\vec{V}_i$  и  $\vec{W}_i$ .

По найденным значениям  $P(t+\Delta t)$ ,  $\vec{R}_i^{nk}(t+\Delta t)$  и  $\vec{R}_i^{kr}(t+\Delta t)$  отыскиваются перемещения узловых точек платформы, контейнеров и грузов в момент времени  $(t+\Delta t)$ . Скорости и ускорения определяются с использованием соотношений метода Ньюмарка. Для вычисления напряжений, в заданных элементах конструкции крупнотоннажных контейнеров и платформы, по найденным перемещениям узловых точек, применяется процедура МКЭ.

В пятой главе приведено исследование нагруженности крупнотоннажных контейнеров при продольных ударах, возникающих в процессе их эксплуатации на железнодорожном транспорте.

Анализ повреждений получаемых крупнотоннажными контейнерами в процессе их эксплуатации на железнодорожном транспорте показал, что наибольшее количество повреждений происходит вследствие воздействия инерционных сил при продольных ударах, которые имеют место при проведении маневровых операций с контейнерными платфор-

мами. Основными видами повреждений являются: выпучивание торцевой стенки или двери, отрыв нижней продольной балки контейнера от угловых фитингов, а также разрушение самих фитингов. Для исследования факторов, оказывающих наибольшее влияние на нагруженность этих и других элементов конструкции крупнотоннажных контейнеров, в работе рассматривается удар контейнерной платформы о преграду, оборудованную автосцепным устройством. При этом считается, что платформа и преграда оборудованы поглощающими аппаратами Ш-I-ТМ.

Расчетная схема исследуемой системы выбирается в виде пространственной стержневой системы с массами, сосредоточенными в узлах. При проведении расчетов варьируются следующие величины: скорость соударения платформы о преграду (рассматриваются случаи соударения со скоростями от 1 до 3 м/с), число контейнеров на платформе (от 1-го до 2-х), зазоры в устройствах крепления контейнеров к железнодорожной платформе (принимаются равными от 0 до 15 мм). Груз считается жестко закрепленным в контейнерах.

Расчеты выполнены с применением разработанного автором математического и программного обеспечения. Основные результаты (максимальные значения сил взаимодействия между контейнером и платформой в точках контакта -  $R^{nk}$ , напряжений в нижней продольной балке -  $\sigma_{д.пр}$  и торцевой стенке -  $\sigma_{торц.}$ ) при скорости соударения 2 м/с и различном числе контейнеров на платформе ( $N_k$ ) приведены в таблице.

№ пп	Величина зазора, мм	$R^{nk}$ , кН		$\sigma_{д.пр}$ , МПа		$\sigma_{торц.}$ , МПа	
		$N_k = 1$	$N_k = 3$	$N_k = 1$	$N_k = 3$	$N_k = 1$	$N_k = 3$
1	0	510	390	240	180	290	240
2	2	575	440	270	220	330	280
3	5	830	640	320	260	ж	350
4	10	910	700	ж	310	ж	ж
5	15	1020	850	ж	ж	ж	ж

Знак ж означает, что напряжения в рассматриваемом элементе превышают 350 МПа.

Из приведенных результатов видно, что такие факторы, как степень загрузки платформы контейнерами и величина зазора существенно влияют на нагруженность контейнера. Поэтому для обеспе-

чения нормальных эксплуатационных условий крупнотоннажных контейнеров на железнодорожном транспорте необходимы загрузка контейнеров и платформ до полной их грузоподъемности, а также надежное крепление грузов внутри контейнеров. В связи с тем, что требование МПС оборудовать контейнерные платформы более энергоемкими поглощающими аппаратами не выполняется, целесообразно изменить конструкцию устройств крепления контейнеров к платформе так, чтобы зазоры не проявлялись, или оборудовать упоры платформы специальными амортизирующими устройствами.

Результаты приведенных исследований внедрены в Главном управлении вагонного хозяйства МПС СССР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования напряженно-деформированного состояния конструкции крупнотоннажных контейнеров при нагрузках, предусмотренных действующими стандартами (ГОСТ 20259-80). Приведены расчетные схемы, позволяющие провести уточненный анализ напряженного состояния основных несущих элементов.

2. Проведено сопоставление аналитических исследований с экспериментами, подтверждающее возможность использования разработанной методики для оценки прочности конструкции при нагрузках, предусмотренных Правилами колитаний крупнотоннажных контейнеров.

3. На основании проведенных исследований разработаны (совместно с технологическим отделом контейнерного производства ИСРЗ) рекомендации по совершенствованию конструкции контейнера. Годовой экономический эффект от внедрения в производство новых экономических конструкций в соответствии с разработанными рекомендациями составляет 180 тыс. руб.

4. Разработана математическая модель, алгоритм и программа для исследования движения системы "железнодорожная платформа - контейнер-груз" при продольном ударе.

5. Проведено исследование динамической нагруженности крупнотоннажных контейнеров, при продольных ударах, возникающих в процессе их эксплуатации на железнодорожном транспорте. Рассмотрено влияние степени загрузки платформы контейнерами, величины зазоров в устройствах крепления контейнеров к платформе, способа загрузки контейнеров на напряженно-деформированное состояние торцевой стенки и боковой продольной бабки нижней рамы.

6. Результаты исследования динамических напряжений, возникающих

в элементах конструкции крупнотоннажных контейнеров при соударениях вагонов, использованы Главным управлением вагонного хозяйства МПС СССР для выработки рекомендаций по способам крепления крупнотоннажных контейнеров к железнодорожной платформе.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Львов А.А., Барбас И.Г., Кострица С.А. Контейнеры ; Учебное пособие. - М. : МИИТ, 1982. - С. 105-114.
2. Радзиховский Ю.А., Кострица С.А., Мороз В.В. Применение метода конечных элементов к расчету на прочность крупнотоннажного контейнера // Проблемы динамики и прочности подвижного состава: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск, ДИИТ, 1984. - С. 62-67.
3. Радзиховский Ю.А., Кострица С.А., Закс М.Н. Оценка прочности большегрузных контейнеров в условиях эксплуатации на железнодорожном транспорте // Проблемы механики железнодорожного транспорта (тезисы докл. Всес. конф.) - Днепропетровск, 1984. - С. 43-44.
4. Львов А.А., Коган Л.А., Кострица С.А. Расчет на прочность гофрированной стенки контейнера. - Вестник ВНИИЖТ, 1985. - №2. - С. 12-14.
5. Кострица С.А. Исследование напряженно-деформированного состояния нижней рамы универсального крупнотоннажного контейнера с исследованием метода конечных элементов // Динамика, нагруженность и надежность подвижного состава: Межвузовский сборник научных трудов. - Днепропетровск: ДИИТ, 1985. - С. 115-119.
6. Кострица С.А. Математическая модель движения системы "железнодорожная платформа-контейнер-груз" при продольном ударе // Проблемы динамики, прочности и устойчивости движения железнодорожного подвижного состава: Межвуз. сб. научн. тр. - Днепропетровск: ДИИТ, 1986. - С. 52-56.
7. Львов А.А., Барбас И.Г., Кострица С.А. Определение деформации нижней рамы большегрузных контейнеров // Современные методы расчета вагонов на прочность, надежность и устойчивость: Сборник научных трудов. - М. : Транспорт, 1986. - С. 154-157.



НТБ  
ДНУЖТ

Кострица Сергей Анатольевич

"Напряженно-деформированное состояние крупнотоннажных контейнеров  
в условиях эксплуатации"

05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Подписано к печати 15.05.87. БТ 70211 формат 60x84 1/16. Бумага  
для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л. I. Уч.-изд.л. I.  
Тираж 100 экз. Заказ 1048. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа  
320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. Лазаряна, 2

Сканировала Юнаковская В. В.