

Ф 394

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ФЕЛЬЗЕНШТЕИН Владимир Симхович

УДК 629.114.3

РАСЧЕТ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИЦЕПОВ
КАК ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
СИСТЕМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 01.02.06 - "Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

1983

Работа выполнена на кафедре "Строительная механика" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Соломин В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший научный сотрудник Дмитриченко С.С.; кандидат технических наук, доцент Павлюк Ю.С.

Ведущее предприятие - Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (г.Москва).

Защита диссертации состоится 27 октября 1983 года, в 15 часов, на заседании специализированного совета Д053.13.01 Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола по адресу: 454044, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять ученому секретарю совета по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан "___" сентября 1983 года.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

Данилова —

К.М.Кононов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основные направления развития народного хозяйства СССР на 1981-1985 годы, принятые XXVI съездом КПСС, предусматривают дальнейшее увеличение производства автоприцепов, причем особенно остро ставится вопрос о создании конструкций пониженной металлоемкости, но с долговечностью и другими эксплуатационными параметрами, находящимися на уровне мировых стандартов.

Наиболее металлоемкой частью прицепа является несущая конструкция, подверженная во время эксплуатации как статическим, так и динамическим воздействиям. Прогнозирование уровня прочности несущих конструкций на стадии их проектирования требует применения расчетных схем с высокой степенью детализации, раскрывающих перед проектировщиком реальную картину напряженно-деформированного состояния конструкции. Но расчетные схемы и методики, которыми сегодня пользуются в конструкторских бюро, не способны удовлетворительно оценивать уровень напряжений в несущих конструкциях прицепов на стадии проектирования. Поэтому, часто путевку в жизнь получает проект конструкции далекий от оптимального по металлоемкости и долговечности, что совершенно недопустимо в условиях массового нарастающего производства прицепов. Следовательно, создание расчетных схем и методик более детально описывающих напряженно-деформированное состояние несущих конструкций прицепов является важным этапом в проектировании конструкций пониженной металлоемкости и актуальной народнохозяйственной задачей.

Работа выполнялась по плану НИР и ОКР Минавтопрома СССР (тема 3.1.12 проблемы "Исследования и конструкторско-экспериментальные работы по снижению массы автомобилей и экономии конструкционных материалов"). Одним из объектов применения полученных результатов было проектирование прицепа контейнеровоза, согласно программе работ ГКНТ СССР на 1981-1985 годы, включенных в отраслевой план ОКР Минавтопрома (шифр задания 0.54.12.02.12).

Цель работы - создание метода расчета напряжений в несущих конструкциях прицепов как тонкостенных пространственных системах, с учетом динамики автопоезда.

Методика выполнения работы. Для достижения поставленной цели применены: 1) аппарат метода конечных элементов (МКЭ); 2) схематизация автопоезда системой дискретных масс связанных упругой конструкцией; 3) теория случайных колебаний дискретных систем.

Научная новизна. Предложен способ представления динамических напряжений через произведения перемещений колеблющихся дискретных

масс на элементы матрицы влияния, полученной из статического расчета напряженного состояния упругой конструкции.

В рамках указанного подхода построена методика определения статистических характеристик динамических напряжений в несущих конструкциях прицепов-тяжеловозов, перевозящих жесткий, крупногабаритный, неделимый груз. Методика связывает задачу о случайных колебаниях дискретной динамической системы эквивалентной автопоезду с задачей статики несущей конструкции прицепа, решаемой МКЭ с основными элементами в виде тонких треугольных пластинок.

Для повышения эффективности МКЭ предложен вариант его численной реализации, включающий:

- алгоритм диагностики, основанный на понятии топологической связности поверхности и позволяющий выявлять в потоке исходных данных наличие конечных элементов (КЭ) не соответствующих схеме разбиения конструкции;

- алгоритм формирования разрешающих уравнений использующий свойство линейности упругих систем и учитывающий степень регулярности триангуляционной сети разбиения конструкции.

Практическая ценность. Разработанная методика позволяет на стадии проектирования получать детальную информацию о напряженно-деформированном состоянии несущих конструкций прицепов. Данная информация является исходной для оценки как статической, так и усталостной прочности конструкции.

Результаты работы в виде руководящих документов РТМ 37.265.020-78, РТМ 37.265.024-80, РД 37.265.029-82 с пакетом прикладных программ для ЕС ЭВМ введены в действие на Челябинском машиностроительном заводе автомобильных и тракторных прицепов (ЧМЗАП). Проведенный анализ нагруженности позволил предложить и обосновать несущие конструкции пониженной металлоемкости, внедренные на ЧМЗАП в серийное производство.

Апробация работы. Результаты работы доказывались на семинаре "Методы обеспечения надежности и снижения веса машин на этапе конструирования" (Челябинск, 1982 г.); на конференции "Совершенствование методов прогнозирования надежности и долговечности машин" (Свердловск, 1981 г.); на конференции "Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов" (секция применения программ МКЭ, Калининград, 1981 г.); в отраслевой лаборатории расчетного анализа динамики и прочности конструкций автомобилей и двигателей НАМИ (Москва, 1983 г.); на заседании технического совета ЧМЗАП (1983 г.); на XXXI-XXXX научно-технических конференциях ЧПИ (1979-1982 г.г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в девяти научно-технических статьях.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и приложения; содержит 116 страниц машинописного текста, 34 рисунка и 39 таблиц, список литературы из 93 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Критический анализ работ, посвященных расчетам несущих конструкций колесных транспортных средств, постановка и обоснование задач исследования

Несущие конструкции транспортных средств с позиций строительной механики представляют собой упругие пространственные тонкостенные пластинчатые системы, подверженные как статическим, так и случайному динамическим воздействиям.

Вопросы, связанные с расчетами таких систем, применительно к несущим конструкциям автомобилей и железнодорожного подвижного состава, рассматривались в работах Белокурова В.Н., Бочарова Н.Ф., Воронцовой Н.И., Гельфата Д.В., Горбунова Б.Н., Гусева А.С., Закса М.Н., Захарова А.А., Иванова А.А., Ошнокова В.А., Павлюка Ю.С., Стрельбицкой А.И., Черного А.Н., Яценко Н.Н., *Weertman H. J., Megson T.H., Alade G. A.* и др.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям несущих конструкций прицепов посвящены работы Дмитриченко С.С., Иванова А.А., Илинича И.М., *Witt D.* и др. Несущие конструкции прицепов-тяжеловозов исследовались в работах Копрова В.П. и Мельчакова А.П.

Анализ рассмотренных работ позволяет заключить, что на данном этапе развития расчетных методов доминирует стержневая схематизация несущих конструкций. Введение регулярных элементов в виде стержней неизбежно приводит к понятию узла, как места закрепления или сочленения стержней. Используемые модели узлов неудовлетворительно отражают влияние их конструктивных особенностей на работу тонкостенной стержневой системы в целом. Не разработан достаточно универсальный метод статического расчета узлов тонкостенных стержневых систем, а также несущих конструкций прицепов полузакрытого и закрытого типов.

Не разработана методика для определения статистических характеристик компонент плоского поля динамических напряжений от воздействия случайного микропрофиля дороги в тонкостенных пространственных пластинчатых системах, описываемых несущими конструкциями прицепов.

Данные характеристики (математические ожидания, корреляционные моменты) являются исходной информацией для получения сравнительной оценки усталостной долговечности конструкций на стадии проектирования.

Таким образом, проблема проектирования прицепов пониженной металлоемкости требует дальнейшего развития расчетных методов, что приводит к решению следующих основных задач:

- разработки методики расчета напряженно-деформированного состояния несущих конструкций прицепов на основе выбранной универсальной модели (расчетной схемы);
- оценки погрешности модели на частных примерах несущих конструкций;
- анализа напряженного состояния несущих конструкций прицепов с помощью разработанной методики.

Во время эксплуатации прицепа его несущая конструкция нагружается в двух основных режимах: статическом и динамическом, являющимся следствием взаимодействия колес со случайным микропрофилем дороги. Случайный процесс изменения динамических напряжений обладает свойствами стационарности и эргодичности, что подтверждено многочисленными экспериментами.

Груз обычно контактирует с несущей конструкцией прицепа по площадкам, число и место расположения которых определяется опорными поверхностями груза или же инструкцией по эксплуатации прицепа. Следовательно, в статическом режиме не трудно установить схему нагружения несущей конструкции, а напряженное состояние в ней можно непосредственно получить, решая задачу статики. Сложнее дело обстоит при динамическом режиме нагружения, т.к. груз, в зависимости от своих динамических характеристик, может по разному взаимодействовать с несущей конструкцией. Для широкого класса прицепов, а именно прицепов-тяжеловозов, перевозящих жесткий, крупногабаритный, неделимый груз, определение динамических напряжений в несущих конструкциях можно также свести к решению задачи статики.

Как известно, случайные стационарные процессы имеют постоянные во времени характеристики. Следовательно, если предположить, что автопоезд совершает установившиеся колебания относительно своего статического положения равновесия, то статические напряжения (постоянные во времени) можно принять за математические ожидания динамических напряжений. Расчетные зависимости для определения других характеристик (корреляционных моментов) случайного процесса

изменения динамических напряжений, применительно к прицепам-тяжеловозам, можно получить, если воспользоваться специфическими свойствами груза и идеей представления этих характеристик через матрицу влияния напряжений и результат решения задачи о случайных колебаниях транспортного средства, как системы дискретных масс, связанных упругой конструкцией. Причем матрица влияния строится опять же из статического расчета напряженно-деформированного состояния несущей конструкции прицепа. Такой подход вызван стремлением получить решение сложной задачи (статистической динамики упругой континуальной системы: груз + несущая конструкция) более простыми средствами, учитывая лишь главные параметры задачи. Правомерность подобного упрощения определяется тем, что масса груза в 15-25 раз, а жесткость в 30-100 раз больше массы и жесткости несущей конструкции, к тому же скорость автопоезда и спектр дорожного воздействия обычно таковы, что при движении не возникает резонанс несущей конструкции.

Для решения задачи о случайных колебаниях системы связанных дискретных масс можно воспользоваться методами описанными в работах Ю.Ю.Беленьского, Р.В.Ротенберга, В.А.Светлицкого и др., следовательно, на передний план выдвигается задача получения расчетных зависимостей, согласно предложенному подходу и решение задачи статики несущих конструкций прицепов как тонкостенных пространственных систем.

Для описания напряженно-деформированного состояния несущих конструкций прицепов можно использовать различные расчетные схемы: континуальные; тонкостенные стержневые системы; тонкостенные пластинчатые системы и их комбинации. Опыт использования континуальных расчетных схем (тонкостенного стержня, пластинки) выявил их основные недостатки: с их помощью затруднительно описать объект сложной формы, учесть нерегулярные граничные условия, а также влияние местных особенностей конструкции на распределение напряжений в ней. Схематизация совокупностью тонкостенных стержней позволяет довольно полно (за исключением узловых зон) описать деформацию несущих конструкций открытого типа. Однако, поиски в направлении увеличения долговечности узлов приводят к более сложному их конструктивному оформлению, а это, существенно отдаляет такой узел от классического определения узла тонкостенной стержневой системы и значительно понижает ее эффективность при анализе напряженного состояния несущих конструкций прицепов. Требованиям высокой степени детализации и универсальности применения отвечает расчетная схема, состоящая из совокупности тонких треугольных пластинок. Очевидно, что триангуляционной сетью можно без разрывов и изломов покрыть срединные

поверхности подавляющего большинства несущих конструкций прицепов, образованных, как правило, плоскими поверхностями. Отсюда, естественно, вытекает и метод решения задачи - МКЭ (в перемещениях) с основными КЭ в виде треугольных пластинок.

Особенностям численной реализации МКЭ посвящены работы Городецкого А.С., Морозова Е.М., Никишова Г.П., Постнова В.А., Розина Л.А., Шапошникова Н.Н. и др., в которых приводятся алгоритмы характерные для всех этапов решения задач МКЭ, за исключением алгоритмов диагностики исходной информации о КЭ и алгоритмов, использующих регулярность сети разбиения при формировании системы уравнений, хотя подобные алгоритмы могут значительно повысить эффективность решения.

Созданию таких алгоритмов посвящены разделы данной работы.

2. Определение статистических характеристик динамических напряжений на основе конечноэлементной модели несущих конструкций прицепов

Используется традиционное представление микропрофиля поверхности дороги как случайной стационарной функции и вводится следующая система основных гипотез, характерных для описанного подхода:

- несущая конструкция прицепа считается упругой линейно-деформируемой тонкостенной пространственной безмассовой системой;
- в точках контакта груза с несущей конструкцией прицепа осуществляется силовое взаимодействие только вдоль вертикальной оси, причем контакт неразрывен;
- автопоезд при установленном движении по дороге со случаем микропрофилем совершает колебания в продольной и поперечной плоскостях относительно статического положения равновесия как система дискретных масс, связанных упругой конструкцией, при этом контакт шин с поверхностью дороги неразрывен.

Пусть тонкостенная пространственная пластинчатая система, описывающая несущую конструкцию, разбита триангуляционной сетью на КЭ (рис. I). В этом случае компоненты σ_{xj} , σ_{yj} , τ_{xyj} плоского поля динамических напряжений в j -м КЭ в местной системе отсчета определяются по формулам

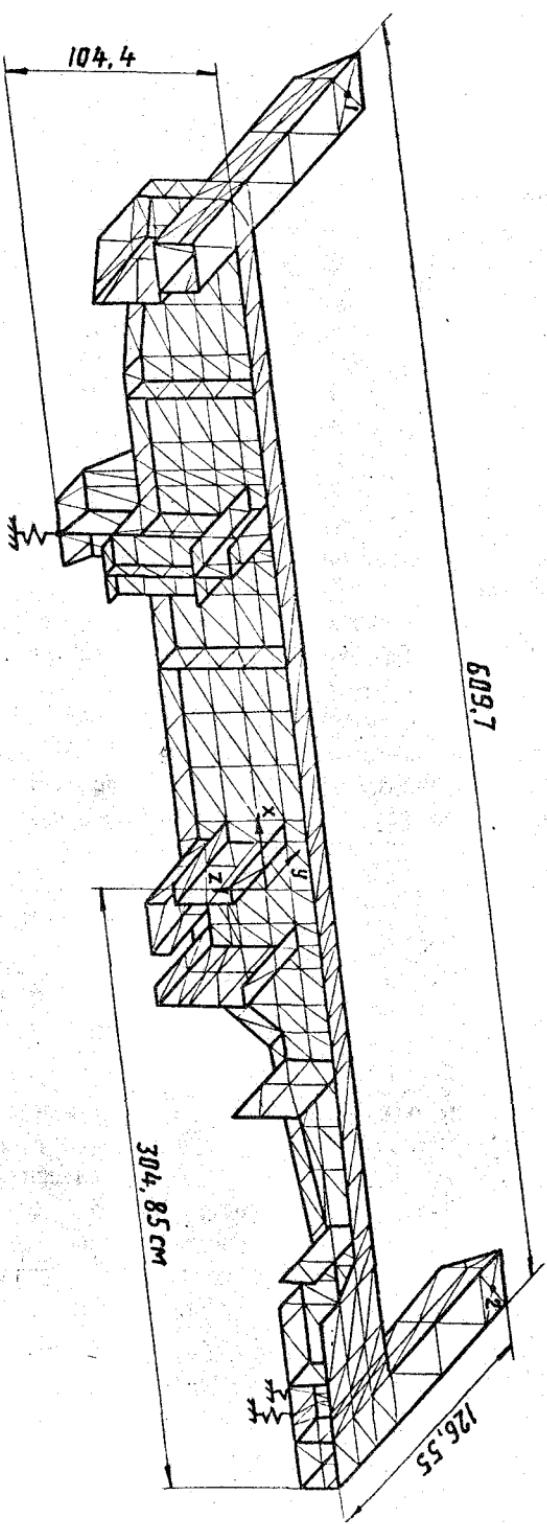


Рис.1. Левая, симметричная часть рамы полуприцепа контейнеровоза
(контейнер опирается на точки I,2)

$$\sigma_{xj} = \sigma_{xj}^k \varphi_k, \quad \sigma_{yj} = \sigma_{yj}^k \varphi_k, \quad \tau_{xyj} = \tau_{xyj}^k \varphi_k, \quad (1)$$

здесь (и ниже) суммирование происходит по повторяющимся индексам, $k=1,2,3$; $\sigma_{xj}^k, \sigma_{yj}^k, \tau_{xyj}^k$ – элементы матрицы влияния, представляющие собой соответствующие компоненты поля напряжений в статике при $\varphi_k = 1$; φ_k – перемещения центра подрессоренной массы прицепа. Значения индексов I, 2, 3 условны, т.е. они определяют не номера, а порядок следования степеней свободы. Перемещения φ_k вызывают вертикальные смещения δ_i точек (X_i, Y_i, Z_i) рамы прицепа контактирующих с грунтом, вследствие чего рама деформируется, при этом

$$\delta_i = (\varphi_1 + X_i \varphi_2 + Y_i \varphi_3) / (1 + \Delta_i^r / \Delta_i), \quad (2)$$

где Δ_i^r и Δ_i – смещения точек контакта груза и рамы от единичной вертикальной силы.

Пусть φ_k – случайные, стационарные, центрированные функции с известными значениями корреляционных моментов $K_{\varphi_\ell}^{(v)} \varphi_p^{(v)}$, здесь $v=0,1,2$ – символ производной по времени; $\ell, p=1,2,3$. Тогда, представив корреляционные моменты компонент поля напряжений как математические ожидания их взаимных произведений (для одного и того же момента времени) с учетом формул (1), можно получить корреляционную матрицу компонент плоского поля напряжений в центре тяжести j -го КЭ:

$$K_j^{(v)} = \begin{vmatrix} \sigma_{xj}^{\ell} \sigma_{xj}^p & \sigma_{xj}^{\ell} \sigma_{yj}^p & \sigma_{xj}^{\ell} \tau_{xyj}^p \\ \sigma_{yj}^{\ell} \sigma_{xj}^p & \sigma_{yj}^{\ell} \sigma_{yj}^p & \sigma_{yj}^{\ell} \tau_{xyj}^p \\ \tau_{xyj}^{\ell} \sigma_{xj}^p & \tau_{xyj}^{\ell} \sigma_{yj}^p & \tau_{xyj}^{\ell} \tau_{xyj}^p \end{vmatrix} \times K_{\varphi_\ell}^{(v)} \varphi_p^{(v)} \quad (3)$$

Симметрично

Математические ожидания $\bar{\sigma}_{xj}, \bar{\sigma}_{yj}, \bar{\tau}_{xyj}$ описывают статическое напряженное состояние рамы под нагрузкой, относительно которого, при движении прицепа, происходят случайные колебания поля напряжений в j -м КЭ со стандартами, соответствующими полученной корреляционной матрице. Значения математических ожиданий вычисляются также по формулам (1), в которые вместо случайных функций φ_k , вводятся математические ожидания $\bar{\varphi}_k$, относительно которых центрируются указанные случайные функции. Величины $\bar{\varphi}_k$ определяются из условия равновесия подрессоренной массы прицепа.

Элементы матрицы влияния строятся по решению соответствующей задачи статики несущей конструкции прицепа с использованием формулы (2), а корреляционные моменты перемещений центров масс получаются из решения задачи о случайных колебаниях автопоезда. Причем, применение МКЭ позволяет учитывать потенциальную энергию деформации, накопленную несущей конструкцией при вычислении жесткостных коэффициентов динамической системы.

3. Конечноэлементная модель несущих конструкций прицепов и особенности ее численной реализации

За неизвестное задачи принимается вектор \bar{X}_n перемещений узлов триангуляционной сети в общей системе координат. Перемещения узлов в местной системе координат выражаются через компоненты вектора \bar{X}_n с помощью блочной квазидиагональной матрицы порядка 6x6.

При деформации КЭ к ним применимы обычные гипотезы теории тонких пластинок и сплошных стержней. Каждый КЭ содержит узлы в угловых точках, каждый узел имеет шесть степеней свободы. Функция формы для нормального прогиба треугольной пластиинки выбрана в виде полинома 3-й степени, а функция формы при деформации ее в своей плоскости в виде полных полиномов I-й степени. Функции формы для стержня подбираются в виде полиномов, являющихся решениями соответствующих однородных дифференциальных уравнений, описывающих деформацию стержня.

Деформация конечноэлементной модели при статической нагрузке и заданных узловых граничных условиях подчиняется вариационному принципу Лагранжа; следствием которого является равенство

$$\frac{\partial [U(\bar{X}_n) - \Pi(\bar{X}_n)]}{\partial \bar{X}_n} = 0. \quad (4)$$

Здесь $U(\bar{X}_n)$ - потенциальная энергия деформации конечноэлементной модели, складывающаяся из потенциальной энергии деформации каждого КЭ и упруго-податливых опор, введенных для имитации подвески прицепа или действия отброшенной части конструкции; $\Pi(\bar{X}_n)$ - потенциал внешней узловой нагрузки. Таким образом, решение поставленной задачи сводится к решению системы (4) из n линейных алгебраических уравнений.

Для данной конечноэлементной модели выражение $U(\bar{X}_n)$ будет представлять собой квадратичную форму, а выражение $\Pi(\bar{X}_n)$ линейную форму вектора узловых перемещений. При этих условиях можно

сконструировать формулы для определения коэффициентов при неизвестных A_{ij} и свободных членов b_i системы разрешающих уравнений (4). Эти формулы приведены в табл., в которой приняты следующие обозначения: \bar{X}_t – вектор известных, отличных от нуля перемещений; q – ширина полосы ленточной матрицы. Если в ходе вычислений получается, что $q > n$, то принимается $q = n$, т.е. в этом случае матрица коэффициентов при неизвестных не ленточная.

Таблица

Формула	Макс. число вычислений
$a_{ii} = 2U(x_i)$	n
$a_{ij} = U(x_i; x_j) - \frac{1}{2}(a_{ii} + a_{jj})$	$\frac{1}{2}(2n - q)(q - 1)$
$C = U(\bar{X}_t)$	1
$b_i = \Pi(x_i) - U(x_i; \bar{X}_t) + \frac{1}{2}a_{ii} + C$	n

При вычислении коэффициентов предполагается, что выражения $U(\bar{X}_n)$ и $\Pi(\bar{X}_n)$ известны и определены в виде суммы по всем КЭ, сходящимся в узлах, содержащих компоненты X_i и X_j вектора \bar{X}_n . Эти компоненты равны единице, а остальные компоненты этого вектора равны нулю, причем если X_i и X_j не коммутируют друг с другом, то $a_{ij} \neq 0$ и вычисления опускаются. Таким образом, приведенная процедура сравнительно просто учитывает внешние кинематические воздействия и освобождает от матричных преобразований, что приводит к определенной экономии оперативной памяти ЭВМ.

Для ускорения сборки матрицы разрешающей системы уравнений в диссертации предложен алгоритм, суть которого иллюстрирует следующий пример. На рис.2 изображена пластинка, разбитая на КЭ регулярной триангуляционной сетью 9x9 и деформируемая из своей плоскости. Число степеней свободы в каждом узле $\Delta = 3$. Блочная матрица коэффициентов разрешающей системы уравнений для пластинки состоит лишь из $g_1 = 3$ различных "диагональных" матриц A, C, F и $g_2 = 9$ различных "кодиагональных" матриц $B, D, E, G, H, K, L, M, N$ размерностью $\Delta \times \Delta$. Нетрудно заметить, что каждой матрице из числа g_2 "кодиагональных" матриц соответствует своя конфигурация КЭ, подобно тем, которые выделены на рис.2. Коэффициенты этих матриц физически означают реакции во внутреннем узле k по направлению степеней свободы в общей системе отсчета при сообщении узлу r единичных перемещений, при этом все граничные узлы конфигурации защемляются. Каждой матрице из

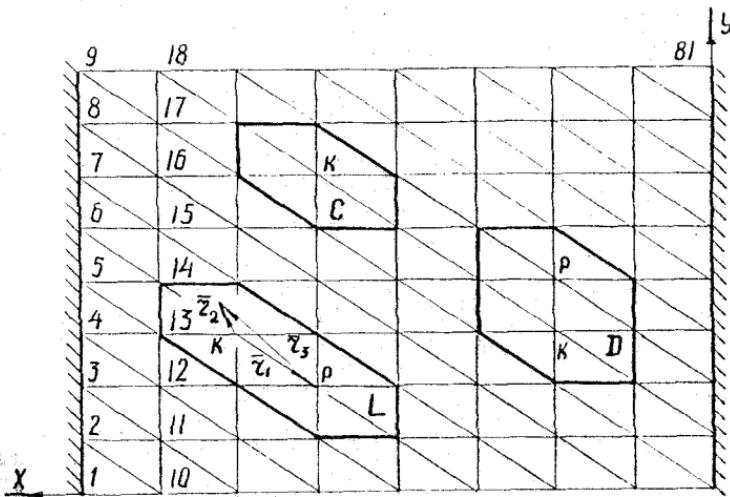


Рис.2. Пластина с триангуляционной сетью и выделенными на ней конфигурациями

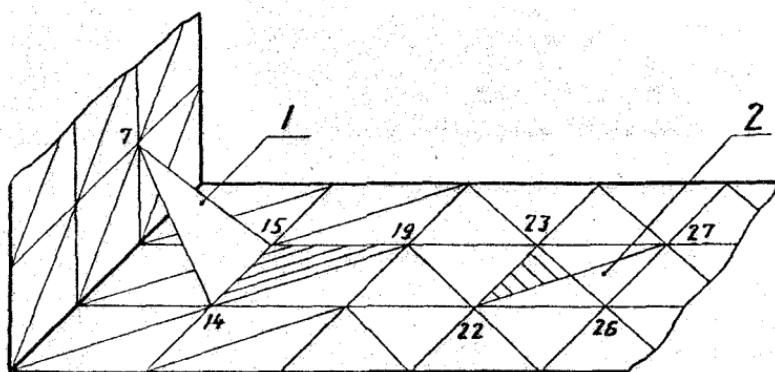


Рис.3. Фрагмент триангуляционной сети, построенный по исходным данным, содержащим ошибки, полученные при этом "дырки" в поверхности обозначены штриховкой

числа g_1 , "диагональных" матриц также соответствует своя конфигурация КЭ, подобной той, которая выделена на рис.2 и включающая в себя только узел K . Коэффициенты этих матриц также означают реакции в узле K по направлению степеней свободы в общей системе отсчета, но при сообщении самому этому узлу единичных перемещений и при защемлении граничных узлов конфигурации. Очевидно, что каждая конфигурация КЭ при ее поступательном движении по поверхности пластинки образует свою группу конгруэнтных конфигураций.

Каждая i -я конфигурация для изотропной тонкостенной пространственной пластинчатой системы однозначно определяется набором следующих параметров:

$$m_i, \bar{\tau}_{1i}, \bar{\tau}_{2j}, \bar{\tau}_{3j}, t_j, \quad \text{где } j = 1, 2, 3, \dots, m_i. \quad (5)$$

Здесь m_i - число КЭ в конфигурации; $\bar{\tau}_{1i}$ - вектор, направленный из т. К в т. Р; $\bar{\tau}_{2j}, \bar{\tau}_{3j}$ - векторы, направленные соответственно из т. т. К и Р в центр тяжести j -го КЭ; t_j - толщина j -го КЭ. Для "диагональных" конфигураций $\bar{\tau}_{1i} \equiv 0$.

Общее число конфигураций равно сумме всех элементов матрицы взаимосвязи узлов триангуляционной сети. Из общего числа конфигураций, сравнением на совпадение последовательно параметров (5) выделяются группы конгруэнтных конфигураций, для каждой группы вычисляются и запоминаются коэффициенты матрицы. Общее число коэффициентов, с учетом симметрии системы уравнений определяется формулой

$$N = 0,5 \Delta (\Delta + 1) g_1 + \Delta^2 g_2, \quad (6)$$

и не зависит от густоты триангуляционной сети, а зависит от степени ее регулярности и, обычно, много меньше числа коэффициентов, вычисляемых при сборке матрицы способами, не учитывающими регулярность сети разбиения.

Анализ правильности исходной информации программ МКЭ позволяет сократить непроизводительные затраты машинного времени при решении задач, а также увеличить степень достоверности решения.

При задании информации о треугольных КЭ возникающие ошибки можно разделить на две категории:

- противоречие логике вычислительной программы;
- и не противоречие ей.

Ошибки первой категории довольно просто обнаружить во время выполнения вычислительной программой арифметических операций,

например: невозможность построения треугольника при коллинеарно расположенных узлах КЭ.

Ошибки второй категории свободно проходят через вычислительную программу и могут быть обнаружены только с помощью специального алгоритма. На рис.3 изображен фрагмент поверхности, разбитой триангуляционной сетью на конечные элементы и содержащий ошибки второй категории: при описании первого КЭ вместо узла 19 введен узел 7, при описании второго КЭ вместо узла 23 введен узел 27.

Т.е. вместо заданной по чертежу конструкции фактически рассчитывается иная конструкция (с отверстиями).

Для обнаружения подобных ошибок ниже приводится алгоритм, основанный на понятии топологической связности исследуемой поверхности. Порядок связности исследуемой поверхности определяется формулой

$$S = 2 - \chi, \quad (7)$$

где χ – эйлерова характеристика, являющаяся инвариантом комбинаторно эквивалентных двумерных многообразий (поверхностей).

Эйлерова характеристика определяется через параметры триангуляционной сети на поверхности следующим образом:

$$\chi = U - R + E, \quad (8)$$

здесь U, R, E – число узлов, ребер, элементов соответственно.

Очевидно, что ошибки второй категории, подобные изображенным на рис.3, увеличивают число ребер триангуляционной сети, и, согласно приведенным формулам, порядок связности исследуемой поверхности.

Следовательно, определяя в процессе работы с помощью диагностической подпрограммы порядок связности поверхности по формулам (8), (7) и сравнивая ее с заданной, можно установить в потоке исходных данных наличие КЭ, номера узлов которых не соответствуют схеме разбиения поверхности.

Эйлерова характеристика поверхности до работы программ МКЭ определяется тривиально, согласно чертежу исследуемой поверхности и формуле

$$\chi = \begin{cases} I - K & - \text{для плоскости,} \\ 2 - 2P - K & - \text{для поверхности.} \end{cases} \quad (9)$$

здесь K – число "дырок" на поверхности.

P - число "ручек", т.е. изогнутых цилиндрических поверхностей, границы которых отождествлены с границами соответствующих пар "дырок".

Если же по каким либо причинам эйлерову характеристику затруднительно определить по формуле (9), то ее можно вычислить по формуле (8), нанеся на исследуемую поверхность простейшую триангуляционную сеть.

Описанные выше алгоритмы используются в программах МКЭ, предназначенных для расчета на ЭВМ тонкостенных стержневых и пластинчатых систем, которыми описываются несущие конструкции прицепов.

Далее приводится анализ степени адекватности разработанной конечноэлементной модели несущим конструкциям прицепов на основании как априорных, так и апостериорных оценок точности решения данного варианта МКЭ.

Степень адекватности конечноэлементной модели реальной конструкции зависит от различных погрешностей, которые складываются, как из неточностей в выполнении гипотез, заложенных в основание модели, так и из погрешностей решения самого МКЭ, присущих ему как приближенному численному методу. Анализ возможных погрешностей решения МКЭ показал, что основные погрешности порождаются нарушением вариационного принципа задачи. Для данного варианта МКЭ это нарушение заключается в применении несогласованных КЭ, на границах между которыми могут иметь место разрывы (скачки) непрерывности углов наклона и перемещений кромок треугольников. Таким образом, суммарная потенциальная энергия деформации, накапливаемая в разрывах между КЭ, вносит определенную погрешность в вычисление функционала Лагранжа. Однако, коллективный опыт решения задач МКЭ показывает, что для многих типов несогласованных КЭ накопленная в разрывах потенциальная энергия деформации может стремиться к нулю, при неограниченном сгущении сети разбиения, тогда функционал задачи будет приближаться к своему точному значению. Следовательно, модель с несогласованными КЭ нуждается в проверке сходимости решения.

Сравнение решений данного варианта МКЭ (при последовательном сгущении сети разбиения) с точными (аналитическими) для ряда примеров позволило выявить асимптотический характер сходимости решений и дать априорную оценку максимальной относительной погрешности метода, которая по всем компонентам решений не превышает 6%.

В ходе выполнения работы проводились экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния модернизированной

платформы прицепа ЧМЗАП-5530 и типового узла рамы экспериментального прицепа ПТС-II. При нагружении фиксировались как перемещения, так и деформация в некоторых точках конструкции. Перемещения замерились прогибомерами Аистова с ценой шкалы 0,01 мм. Деформация с помощью тензодатчиков с базой 20 и 5 мм, для регистрации и преобразования сигнала использовался прибор ЦТМ-5. Данные эксперименты моделировались на ЕС ЭВМ с помощью программы, реализующей описанный вариант МКЭ. Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволило дать апостериорную оценку средней относительной погрешности метода, которая для доминирующих компонент напряженно-деформированного состояния лежит в пределах: 9–13% для перемещений и 13–19% для напряжений, причем верхняя граница соответствует исследованиям концентрации напряжений в узлах. Это можно объяснить тем, что выбранные в данной работе функции формы КЭ несколько хуже приспособлены для описания тонкостенных пространственных систем со значительными градиентами изменения компонент напряженно-деформированного состояния.

На основании полученных оценок погрешностей степень адекватности конечноэлементной модели реальной конструкции можно считать удовлетворительной. Следовательно, можно использовать данную модель и основанную на ней программу МКЭ для проведения расчетов при проектировании несущих конструкций прицепов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлена теоретическая зависимость между перемещениями дискретных масс и динамическими напряжениями в упругой конструкции. Использование данной зависимости позволило создать методику определения статистических характеристик динамических напряжений в несущих конструкциях прицепов-тяжеловозов, перевозящих жесткий, крупногабаритный, неделимый груз. Методика может быть распространена и на другие объекты, в которые входят габаритные дискретные массы, совершающие низкочастотные случайные колебания. Методика связывает решение задачи о случайных колебаниях дискретной динамической системы с решением задачи статики несущей конструкции.

2. Для решения задачи о случайных колебаниях дискретной динамической системы разработана численная процедура, положенная в основу программы для ЕС ЭВМ, результатом работы которой являются значения корреляционных моментов перемещений (и их производных по времени) центров дискретных масс.

3. Показано, что для решения задачи статики несущих конструкций прицепов, как упругих пространственных тонкостенных систем, наиболее универсальным методом является МКЭ с основными КЭ в виде тонких треугольных пластинок.

4. Установлено, что предложенное: алгоритм диагностики исходной информации о КЭ и алгоритм формирования разрешающих уравнений повышают эффективность решения МКЭ путем сокращения непроизводительных затрат машинного времени, а также путем экономии оперативной памяти и времени формирования разрешающих уравнений.

5. Проведена проверка степени адекватности конечноэлементной модели несущим конструкциям прицепов. Сравнение решений данного варианта МКЭ (при последовательном ступении сети разбиения) с точными (аналитическими) для ряда примеров позволило выявить асимптотический характер сходимости решений и дать априорную оценку максимальной относительной погрешности метода, которая по всем компонентам решений не превышает 6%. Сравнение экспериментальных исследований (на примерах платформы прицепа ЧМЗАП-5530 и типового узла рамы ПТС-II) позволило дать апостериорную оценку средней относительной погрешности решения, которая для доминирующих компонент напряженно-деформированного состояния конструкций не превышает 19%. На основании полученных оценок погрешностей степень адекватности конечноэлементной модели несущим конструкциям прицепов можно считать удовлетворительной и, следовательно, можно рекомендовать данный вариант МКЭ для проведения расчетов при проектировании несущих конструкций прицепов.

6. С помощью созданных программы МКЭ и методики, на стадии проектирования, определялась нагруженность несущих конструкций прицепов (ЧМЗАП-5530, -9985, - 99858; ПТС и др.). Целенаправленное регулирование уровня напряжений позволило внедрить в производство конструкции пониженной металлоемкости и увеличить пробег прицепов до капитального ремонта.

Суммарный народнохозяйственный экономический эффект от внедрения составил 253 тыс.руб. в год.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Фельзенштейн В.С., Семенов Ю.Б. Расчет прямоугольных конструктивно-ортотропных пластин на ЭВМ. В сб.: Исследования по строительной механике и механике грунтов.-Труды ЧИИ № 225, Челябинск, 1979, с.77-82.
2. Фельзенштейн В.С., Мельчаков А.П. Расчет на ЭВМ рам прицепов открытого типа.-Конструкции автомобилей. Экспресс-информация, 1979, № II, с.5-9. (НИИАвтопром).
3. Мельчаков А.П., Фельзенштейн В.С. Расчет плоскопространственных рам из тонкостенных стержней. В сб.: Исследования по строительной механике и механике грунтов.-Труды ЧИИ № 225, Челябинск, 1979, с.69-77.
4. Фельзенштейн В.С., Мельчаков А.П. Об одном способе формирования системы разрешающих уравнений для задач строительной механики. В кн.: Пространственные конструкции в Красноярском крае. Межвузовский сборник. Красноярск, КИИ, 1980, с.152-156.
5. Мельчаков А.П., Фельзенштейн В.С., Пономарев Ю.И. Снижение металлоемкости рам транспортных средств.-Автомобильная промышленность, 1981, № 10, с.15-16.
6. Фельзенштейн В.С. Расчет тонкостенных пространственных пластинчатых систем методом кинематических элементов. В кн.: Пространственные конструкции в Красноярском крае. Межвузовский сборник. Красноярск, КИИ, 1981, с.III-II7.
7. Пискунов А.А., Нионтов С.С., Зисман Л.М., Фельзенштейн В.С. Высокопрочная сталь в конструкции прицепа-тяжеловоза.-Автомобильная промышленность, 1982, № 3, с.23.
8. Фельзенштейн В.С. Диагностика исходной информации об элементах в программах МКЭ. В кн.: Пространственные конструкции в Красноярском крае. Межвузовский сборник. Красноярск, КИИ, 1982, с.18-21.
9. Мельчаков А.П., Фельзенштейн В.С. Определение статистических характеристик динамических напряжений в рамках прицепов от воздействия случайного микропрофиля дороги.-Информационный листок о научно-техническом достижении. Челябинск, ЦТИ, 1983, № 83-26 НТД.

В.Феду