

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ КОТЛОВ ЦИСТЕРН НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ



К.А. Сергеев



М.Н. Пинт

В статье приведены методы расчетов котлов цистерн на динамические нагрузки. Проанализированы научные работы, учебники и учебные пособия в области динамики вагонов. Выявлено, что на современном этапе метод конечных элементов применяется чаще всего и реализован в программных комплексах для решения сложных задач.

Ключевые слова: подвижной состав, котел цистерны, динамические нагрузки, метод конечных элементов, аналитическая механика

От железнодорожных грузоперевозок страны зависят многие структуры, такие как экономика, промышленность, что позволяет сделать вывод о том, что транспорт является важным фактором жизнеобеспечения общества всеми необходимыми благами.

В настоящее время является актуальной проблема обеспечения безопасности движения поездов при перевозке опасных грузов. К опасным грузам относятся кислоты, сжиженные и растворенные газы, спирты, красители, лаки, легковоспламеняющиеся жидкости.

Совершенствование конструкции вагона позволит повысить безопасность движения поездов. Совершенствование осуществляется за счет изготовления котлов повышенной прочности, применения

конструкционных материалов, устойчивых к агрессивным средам. Для того чтобы подойти к вопросу об изменении конструкции вагона, необходимо произвести расчет вагона на динамические нагрузки.

Существуют работы, посвященные методам расчетов динамических нагрузок, однако, необходимо изучить эту тему на примере котлов цистерн. В этом заключается научная новизна исследования.

Целью данной работы является теоретическое исследование методов расчетов котлов цистерн на динамические нагрузки.

Динамические нагрузки имеют свойство быстро изменяться во времени. При возрастающей нагрузке учитываются силы инерции, появляющиеся в результате деформирования системы. Расчет на динамические нагрузки производится для того, чтобы обеспе-

Сергеев Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технологическая подготовка производства вагоноремонтных предприятий. Автор 134 научных работ, в том числе двух монографий.

Пинт Марина Николаевна, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамическая нагруженность вагонов, внедрение технологий в вагоноремонтное производство, реконструкция вагоноремонтного депо, технология «интернет вещей» в вагоноремонтном производстве, применение программных комплексов для решения задач методом конечных элементов, обеспечение безопасности перевозок в цистернах для опасных грузов. Автор трех научных работ.

Мироненко Олег Игоревич, старший преподаватель кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика систем, организация вагонной отрасли, дистанционные образовательные технологии. Автор 23 научных работ, в том числе четырех учебных пособий.

чить прочность конструкции и не допустить ее существенных деформаций.

Исследования динамики вагонов базируются на технической теории колебаний, в основе которой лежат общие принципы аналитической механики, которые используются в форме закона Ньютона и записываются как уравнения Даламбера или уравнения Лагранжа второго рода. Любой элемент конструкции рассматривается как находящийся в равновесии под действием внешних сил, усилий, представляющих собой действие соседних элементов, и сил инерции.

В учебнике «Динамика вагона» под редакцией С.В. Вершинского [3] изложены общие методы изучения динамики вагона, которые базируются на принципах аналитической механики:

1. Методы оценки устойчивости по А.М. Ляпунову;
2. Методы электронного моделирования и цифрового моделирования;
3. Аналитические методы интегрирования дифференциальных уравнений;
4. Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, которые изображены в таблице.

Интегрирование сложных систем нелинейных дифференциальных уравнений возможно при помощи численных методов. Одним из удобных и простых методов для реализации в программных комплексах является разностно-итерационный метод интегрирования нелинейных систем дифференциальных уравнений второго порядка, разработанный в МИИТе профессором В.Д. Хусидовым [5].

Ю.М. Черкашин проводит исследование динамики груженой цистерны по расчетной схеме, разработанной для грузовых вагонов (рисунок).

Жидкость заменяется равнозначным твердым телом. Инерционные характеристики твердого тела высчитываются по формулам Н.Е. Жуковского. Ю.Н. Черкашин в своей работе [6] утверждает, что рас-

четная схема для исследования динамики частично заполненной цистерны может быть представлена в виде динамической системы «твердое тело+жидкость» с бесконечным числом степеней свободы. По этой расчетной схеме движение частично заполненной цистерны описывается бесконечной системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Исследование влияния колеблющейся жидкости на динамику цистерны сводится к определению влияния жидкости на вращательное колебание надрессорного строения вагона относительно горизонтальной продольной оси, проходящей через его центр тяжести.

С.В. Беспалько изучил нагруженность конструкции цистерны для перевозки опасных грузов по разработанной математической модели [1] с учетом жидкого груза на основе теории мелкой воды. Решение задач проводилось с применением численных методов: вариационных методов, включая метод конечных элементов, методов численного интегрирования систем дифференциальных уравнений.

Методика расчета сил, действующих на котел при гидроударе, приведена в работе В.И. Богачева [2]. Математическая модель гидроудара внедряется в математическую модель колебаний вагона-цистерны с учетом колебаний жидкого груза. Это позволило установить связь между уравнениями колебаний жидкости и уравнениями движения твердых частей вагона.

В.Н. Котуранов в работе [4] проанализировал известные методы расчета оболочек вращения. Оболочкой вращения называется тело, у которого толщина намного меньше его других измерений. Автор разработал рекомендации по их применению к расчету котлов цистерн в соответствии с конструктивными особенностями и видами нагружения. При расчетах рассматриваются такие виды нагрузок, как нагружение внутренним давлением, вакуум внутри котла, нагрузки при подъеме груженого вагона, соударение (аварийное) в груженом состоянии, сжатие и растяжение при дви-

Таблица

Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений

Численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений	Численные методы интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных
1. Метод Рунге-Кутты	1. Метод сеток
2. Итерационные методы Эйлера-Коши	2. Метод Канторовича (метод прямых)
3. Разностные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений	

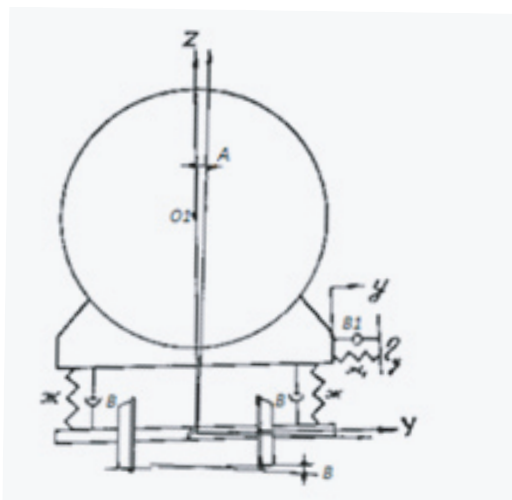


Рисунок. Расчетная схема вагона-цистерны:

A – угол боковой качки; z – подпрыгивание центра масс системы; y – боковое перемещение надрессорной балки вместе со шкворнем котла; $ж$ – вертикальная жесткость половины рессорных комплектов; $ж_г$ – горизонтальная жесткость всех рессорных комплектов тележек

жении. Базируясь на данной работе, ученые переходят к дальнейшему совершенствованию методик расчета.

Г.Ф. Чугунов применил методы строительной механики (метод перемещений, метод сил, смешанный

метод) к расчету котлов цистерн [7], подкрепленных шпангоутами. Решение задачи выполняется методом конечных элементов. Известно, что при этом исходные дифференциальные уравнения могут быть непосредственно получены путем минимизации выражения для потенциальной энергии деформации. Это позволило избежать математических затруднений, связанных с интегрированием дифференциальных уравнений.

М.П. Козловым разработана конечно-элементная модель определения напряжений в цилиндрических частях котлов [4]. Проведены расчеты оболочки котла цистерны с применением подхода полубезмоментной теории оболочек. Получена система интегро-дифференциальных уравнений, отражающих уравнения равновесия бесконечно малого элемента оболочки. Доказано, что результаты, полученные с помощью метода конечных элементов, сходятся с результатами, с применением полубезмоментной теории оболочек.

Рассмотрев основные методы расчета котлов цистерн на динамические нагрузки, необходимо сказать, что специализированные программные комплексы, такие как SolidWorks, Nastran, Femap базируются на методе конечных элементов. Главным его преимуществом является то, что области любой формы можно разбить на конечные элементы и рассчитать напряжения и деформации в реальных деталях с учетом их конструктивных нерегулярностей.



Литература

1. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / С.В. Беспалько. – М., 2000. – 427 с.
2. Богачев, В.И. Моделирование процесса развития внутреннего давления в котле цистерны и напряженного состояния днища при маневровом соударении: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В.И. Богачев. – М., 2014. – 173 с.
3. Вершинский, С.В. Динамика вагона: учебник для вузов ж.-д. трансп. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; под ред. С.В. Вершинского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
4. Котуранов, В.Н. Определение напряжений в оболочках цилиндрических частей и днищ котлов цистерн: учебное пособие / В.Н. Котуранов, Б.Н. Покровский, М.П. Козлов. – Москва: РОАТ, 2009. – 38 с.
5. Нагруженность элементов конструкции вагона / В.Д. Хусидов [и др.] ; Под ред. В.Н. Котуранова. – Москва: Транспорт, 1991. – 238 с.
6. Черкашин, Ю.М. Динамика наливного транспорта / Ю.М. Черкашин. – М.: Транспорт, 1975. – 135 с. (Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта; Вып. 543).
7. Чугунов, Г.Ф. Теоретическое и экспериментальное исследование напряженного состояния котла безрамной цистерны, подкрепленного кольцевыми элементами жесткости : дис. ... канд. техн. наук: 05.182 / Г.Ф. Чугунов. – М., 1971. – 163 с.