

**Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский
институт вагоностроения»
(ГП «УкрНИИВ»)**

**Ю.Я. Водяников, С.Д. Речкалов, В.С. Речкалов, М.И. Соляник,
В.В. Ильчишин**

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ
НАГРУЖЕННОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
ЦИСТЕРН НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ**

Монография

Кременчуг 2018

УДК 625.1.03

*Рекомендовано к печати научно-техническим советом
Украинского научно-исследовательского института вагоностроения
(протокол № 3 от 26.04.2018 г.)*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Ушкалов В.Ф.

д-р техн. наук, проф. Мартынов И.Э.

ДП «УкрНДІВ»

Оценка динамической нагруженности железнодорожных цистерн на стадии проектирования при стохастическом воздействии рельсового пути на колесные пары /Ю.Я. Водяников, С.Д.Речкалов, В.С.Речкалов, М.И.Соляник, В.В.Ильчишин/

ISBN

На основе обобщенной расчетной схемы разработана методика оценки динамической нагруженности железнодорожных цистерн при воздействии случайных неровностей рельсового пути на колесные пары, при этом учитываются конструктивные особенности котла (шпангоуты со ступенчато-изменяющимся по дуге окружности поперечным сечением и ступенчато-изменяющейся толщине обечайке оболочки котла), конечная жесткость соединительных балок и тележек, существенные нелинейности гасителей колебания в рессорном подвешивании. Приведены математические модели колебаний восьмиосной и четырехосной цистерн с учетом жидкого груза и стохастического воздействия рельсового пути на колесные пары, а также расчетные зависимости для определения амплитудно-частотных характеристик, спектральных плотностей, среднеквадратических параметров, характеризующих динамическое состояние цистерны. Приведены результаты исследования для восьмиосной (модель 15-1500) и четырехосной (модель 15-1547) цистерн. Предназначена для инженерно-технических работников, связанных с расчетными и экспериментальными исследованиями единиц подвижного состава железных дорог, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 625.1.03

© ДП «УкрНДІВ», 2018

ISBN 978-966-97716-2-9

Оглавление

	стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
Раздел 1. ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ	7
Раздел 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦИСТЕРНЫ С УЧЕТОМ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НАДРЕССОРНОГО СТРОЕНИЯ И УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ ПУТИ	13
Раздел 3. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ	24
3.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ ДЛЯ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ	25
3.2 ВЫВОД РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ	26
Раздел 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМУЩЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ СО СТОРОНЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ	34
Раздел 5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПЛОТНОСТИ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ	37
Раздел 6. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ	40
Раздел 7. АЛГОРИТМ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ	44
7.1 АЛГОРИТМ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ	44
7.2 НЕКОТОРЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В АЛГОРИТМАХ	45
Раздел 8. ПРИНЯТЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАГОНОВ ЦИСТЕРН ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО РЕЛЬСОВОМУ ПУТИ	46
Раздел 9. ПОКАЗАТЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ВОСЬМИОСНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СО СТОРОНЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ	51
9.1 ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ КОТЛА	51
9.2 ДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ БАЛКИ И ТЕЛЕЖКИ	56
Раздел 10. ПОКАЗАТЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЧЕТЫРЕХОСНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СО СТОРОНЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ	58
Раздел 11. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН	60
11.1 НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «SIS»	60
11.2 НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «STDIN»	61
11.3 НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «SPECTR»	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	65
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	66
Приложение А. ТИПЫ И МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПАРКА	69
Приложение Б. ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАГОНА ЦИСТЕРНЫ МОДЕЛИ 15-1500 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СО СТОРОНЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ	74
Приложение В. ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАГОНА ЦИСТЕРНЫ МОДЕЛИ 15-1547 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СО СТОРОНЫ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ НА КОЛЕСНЫЕ ПАРЫ	92

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дальнейший этап развития железнодорожного транспорта будет характеризоваться увеличением массы и скорости движения поездов, а значит значительным повышением требований к прочностным и динамическим качествам вагонов.

Развитие энергоемких отраслей народного хозяйства вызывает значительное увеличение перевозок наливных и газообразных грузов железнодорожным транспортом. Так, в настоящее время более 350 видов народнохозяйственных грузов перевозятся в вагонах-цистернах (далее цистерны). Все это требует дальнейшего расширения и совершенствования подвижного состава для перевозки указанных грузов.

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные рядом научно-исследовательских институтов железнодорожного транспорта, показали, что динамика и прочность цистерн, котлы которых представляют собой достаточно гибкие несущие оболочки, во многом отличны от вагонов других типов.

В процессе эксплуатации котлы цистерн подвергаются весьма интенсивным и сложным воздействиям, приводящим к появлению трещин в отдельных элементах. Основной причиной этих разрушений, как показано в работе Осипова Т.А., являются интенсивные изгибные колебания котла. Очевидно, при проектировании таких конструкций необходим предварительный тщательный динамико-прочностной анализ. Вместе с тем испытания натурных образцов требуют уникального исследовательского оборудования больших материальных затрат и времени и часто не позволяют изменять параметры в широких пределах. Это вызывает необходимость в проведении более детальных теоретических исследований, создании более полных расчетных схем, учитывающих различные особенности конструкции, разработке углубленных математических моделей, находящихся в условиях динамического стохастического воздействия и требующих применения методов статистической динамики. Поэтому в последние годы получили дальнейшее развитие методы расчета конструкций, основанных на применении теории вероятностей и теории случайных процессов, что позволило более точно описать реальные внешние воздействия. При этом большой вклад в разработку современных методов по оценке динамической нагруженности конструкций подвижного состава внесли труды таких ученых как М. Ф. Вериге, В. Ф. Ушкалов, В. Д. Хусидов, А. А. Камаев, И. И. Челноков, В. Н. Данилов, А. А. Львов, Е. Н. Никольский, Л. Н. Никольский, М. М. Соколов, Л. А. Кальницкий, В. А. Лазарян, И. К. Казаков и др.

Характерной чертой большинства последних работ в области статистической динамики рельсовых экипажей является представление надрессорного строения экипажа в виде абсолютно твердых тел, либо в виде упругой балки. В этом случае из теоретического расчета полностью исключаются изгибные колебания надрессорного строения как упругой пространственной конструкции. В результате на этапе проектирования невозможно оценить уровни, частотный состав и распределение по конструкции динамических напряжений, что необходимо при расчете элементов кузова на усталостную прочность и надежность.

Решение вопроса оценки работоспособности надрессорного строения экипажа и, в частности, котла цистерны в условиях стохастического нагружения позволяет на стадии проектирования установить такие окончательные параметры несущих элементов котла, при которых будут обеспечены надлежащая усталостная прочность и, следовательно, надежность.

Использование традиционных подходов, сводящихся к введению динамических коэффициентов, не дает возможности учесть специфику поведения конструкции при различных условиях нагружения.

Рельсовый экипаж и железнодорожный путь представляют единую динамическую систему, состоящую из упругих тел и полубесконечной среды, соединенных деформируемыми элементами. Теоретические исследования динамических процессов для такой системы, которая совершает пространственные колебания, связаны с определенными математическими трудностями вследствие высокого порядка математической модели, наличия существенных нелинейных элементов. Поэтому при решении каждой конкретной задачи или класса задач, требуется предварительная оценка необходимой степени детализации определенных элементов конструкции с учетом ее особенности, а также с точки зрения необходимости изучения некоторых ее динамических характеристик. Так, например, для учета изгибной жесткости кузова, надрессорное строение может моделироваться в виде упругой балки с распределенной массой или с дискретно расположенными сосредоточенными массами, системой перекрестных балок с массами, сосредоточенными в узлах, пластинчато-стержневой и пространственной стержневой системой со сосредоточенными массами.

Для вагонов с несущим кузовом в виде подкрепленной оболочки использование балочной расчетной схемы дает возможность достаточно точно определить лишь низшие частоты собственных колебаний. Вместе с тем, заметные деформации оболочки котла цистерны проявляются при частотах, превышающих низшие частоты, что обуславливает необходимость их исследования с применением пространственных оболочечных расчетных схем.

Большинство работ, появившихся за последнее время по динамике ребристых оболочек, посвящено разработке методов определения собственных частот колебаний. В настоящее время определены и подробно изучены собственные частоты колебаний шарнирно опертых по торцам круговых замкнутых цилиндрических оболочек, усиленных продольными либо кольцевыми ребрами [1-7 и др.].

Наиболее полные исследования проведены на основе решений, представленных в виде двойных тригонометрических рядов. В работах [5, 8] для решения задач о собственных колебаниях цилиндрических и конических шарнирно опертых оболочек использован энергетический метод при одночленной аппроксимации перемещений.

В ряде работ [7, 9] на основе асимптотического метода, аналогично развитому в работе [10], получены приближенные частотные уравнения и весьма простые расчетные формулы, позволяющие находить значения минимальных собственных частот колебаний с достаточно высокой точностью.

К наиболее фундаментальным работам по динамике оболочек следует отнести монографию [11], в которой автор использует техническую моментную теорию В. З. Власова, решение осуществляется на основе применения вариационных методов Бубнова-Галеркина. Идея применения вариационных методов нашла отражение в большинстве работ [12-16], что объясняется сравнительной простотой и достаточной для практики точностью получения решения.

Применительно к колебаниям котлов железнодорожных цистерн посвящены работы [17-26]. В этой связи следует отметить работы [25, 26], в которых разработана методика расчета котлов цистерн, базирующаяся на гипотезах полубезмоментной теории оболочек, расчетные зависимости выводятся на основе метода Ритца, которые получены на основе реализации вариационных принципов в форме метода перемещений с использованием классических формул метода конечных элементов.

Сложность расчета вынужденных колебаний цистерн определяется наличием жидкого груза. Исследования, проведенные ВНИИЖТом [19, 21, 27] и МИИТом [17, 25] показали, что динамика вагонов с жидким грузом представляет сложный процесс, во многом отличающийся от колебаний вагонов с неподвижным грузом. При этом волновые процессы на свободной поверхности жидкого груза могут воздействовать на процесс колебаний вагона [28].

Известно, что реальное нагружение рельсового экипажа является случайным. Несмотря на это долгое время подход к решению задачи взаимодействия экипажа и пути оставался детерменистическим, ввиду сложности решения задач динамики в статистической постановке и необходимости переработки при этом большого объема информации.

Общие методы исследования стохастических процессов созданы А. Н. Колмогоровым [29, 30], А. Я. Хинчиным [31]. Дальнейшую разработку они получили в трудах В. В. Солодовникова [32, 33], В. С. Пугачева [34], Е. С. Вентцель [13], Н. А. Лифшица [35], Дж. Х. Лэнинга и Р. Г. Бэтина [36], В. В. Болотина [37], Г. Дженкинса и Л. Ваттса [38], В. А. Светлицкого [39], А. А. Свешникова [40] и др.

Решающим шагом в области применения статистических методов к вопросам динамики рельсовых экипажей явился труд М. Ф. Вериги [41], в котором он дает теоретико-вероятностный метод расчета вертикальных сил, возникающих при воздействии рельса на колесо. При рассмотрении колебаний надрессорного строения М. Ф. Вериги приходит к выводу, что вероятностный закон распределения мгновенных значений амплитуд колебаний надрессорного строения экипажа является распределением Гаусса.

В работе [42] обосновывается вероятностный метод подхода к решению задач о колебаниях надрессорного строения при стохастическом задании возмущающей силы и показывает, что зная спектральную плотность воздействия (как характеристику) пути и амплитудно-фазовую характеристику экипажа (как характеристику динамической системы), вопрос о колебаниях надрессорного строения при стохастическом воздействии становится вполне разрешимым.

Следует отметить работу М. Ф. Вериги и А. Я. Когана [27], в которой на основании многолетних исследований авторами обобщены фундаментальные исследования взаимодействия пути и подвижного состава. Показано, что процессы взаимодействия сводятся к взаимосвязанным случайным колебаниям различных элементов пути и транспортного средства, которые необходимо рассматривать как единую механическую систему «экипаж-путь».

Обобщая изложенный материал, можно сделать следующие выводы:

- традиционные методы оценки динамической нагруженности котлов цистерн с помощью динамических коэффициентов не позволяют учесть специфику поведения конструкции при воздействии динамических нагрузок;
- при определенных условиях на изгибные колебания котла могут оказывать влияние волновые процессы на поверхности жидкости;
- воздействие со стороны рельсового пути на экипаж является случайным, что требует применения статистических методов решения задач динамики;

Существенной особенностью грузовых вагонов является наличие фрикционных демпферов колебаний, которые имеют ярко выраженную нелинейную характеристику сухого трения. Для описания сухого трения в этих демпферах, как правило, используется закон Кулона [43]:

$$H(\dot{q}) = H \cdot \text{sign}(\dot{q}),$$

где H - величина силы сухого трения;

$\dot{q}$ - относительная скорость трущихся поверхностей.

Следовательно, реальная математическая модель вертикальных колебаний вагона будет описываться системой нелинейных дифференциальных уравнений.

Постановка решения задачи по исследованию нагруженности котлов железнодорожных цистерн в условиях стохастического динамического воздействия на стадии проектирования может быть сформулирована следующим образом: разработать математическую модель и алгоритм оценки динамических напряжений в котле цистерны с учетом ее конструктивных особенностей, рассматривая колебания объединенной системы «экипаж-путь», на вход которой подаются случайные возмущения, обусловленные неровностями железнодорожного пути, энергетический спектр которых считается известным при этом учесть существенную нелинейность динамической системы.