

УДК 629.4.015

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, А. В. ПУТЯТО, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ОСОБЕННОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ

Приведены результаты реализации алгоритма моделирования продольной динамики 4-осного железнодорожного вагона-цистерны с учетом возможного недолива котла. Установлено, что наиболее влияющим на динамические характеристики, а также на гидродинамическую нагруженность является уровень заполнения котла на 50–80 %. Предложено использовать рассмотренный подход для анализа поперечной динамики вагона, а также динамики наливного поезда.

**Н**аливной подвижной состав относится к наиболее стратегически важному для Республики Беларусь. Вагоны-цистерны составляют более 25 % от общего числа грузовых вагонов и обеспечение стабильной работоспособности имеющегося парка путем повышения надежности их элементов конструкций и недопущения аварийных ситуаций при эксплуатации наливного состава – важная практическая задача железнодорожного транспорта.

Основное отличие эксплуатации наливного подвижного состава заключается в особенностях, связанных с возможностью относительного движения жидкого груза в котле. Вопросам динамики железнодорожных цистерн, в том числе и с учетом подвижности жидкого груза, посвящено большое количество работ. Подходы к моделированию перетекания жидкости в котле цистерны можно разделить на два направления: представление жидкого груза как эквивалентного твердого тела (системы тел) и рассмотрение груза как сплошной среды. Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, для представления жидкого груза в виде эквивалентного твердого тела, как правило, исследователи предварительно проводят большой объем экспериментальных исследований для определения параметров, определяющих затухание колебаний жидкости [1, 6]. При моделировании жидкости сплошной средой только для рассмотрения перетекания груза в одной цистерне требуются существенные машинные ресурсы [2, 5], и рассмотрение динамики сцепа вагонов может быть затруднительно.

Учитывая дороговизну экспериментальных исследований в рассматриваемой области, возникает необходимость разработки методов, позволяющих выполнять виртуальный мониторинг динамики наливного подвижного состава при различных эксплуатационных ситуациях.

В работе [4] приведены результаты разработки способа компьютерного моделирования продольной динамики наливного подвижного с учетом возможного частичного заполнения кузова жидким грузом и алгоритм его реализации. Воспользовавшись предложенным алгоритмом, можно для любого типа жидкого груза (варьируя соответствующими физико-механическими характеристиками при создании гидродинамической модели), любого налива котла цистерны, а также любой формы резервуара и его объема опреде-

лить необходимые входные параметры для моделирования жидкого груза (траекторию центра масс жидкости и силу вязкого сопротивления ее перетекания в котле) для последующего анализа продольной динамики вагона.

В общем виде вектор силы сопротивления перетеканию жидкости в котле цистерны вычисляется по формуле

$$\underline{F}^{\text{сопр}} = -\underline{\alpha} \underline{v}^{\text{отн}},$$

где  $\underline{\alpha}$  – коэффициент удельного сопротивления,  $\underline{\alpha} = (\alpha_x \alpha_y \alpha_z)^T = (2m_{ж}n_x 2m_{ж}n_y 2m_{ж}n_z)^T$ ;  $m_{ж}$  – масса жидкости;  $n_x, n_y, n_z$  – составляющие коэффициента затухания колебаний жидкого груза;  $\underline{v}^{\text{отн}}$  – скорость центра масс жидкого тела относительно котла,  $\underline{v}^{\text{отн}} = (v_x^{\text{отн}} \ v_y^{\text{отн}} \ v_z^{\text{отн}})^T$ . Нижнее подчеркивание здесь обозначает матрицу.

Для моделирования динамики вагона с различным типом наливных грузов необходимо создать базу данных коэффициентов затухания колебательного процесса. В связи с этим рассмотрим влияние типа жидкого груза на процесс затухания при перетекании его в котле цистерны. На рисунке 1 приведены результаты определения коэффициента затухания для случаев заполнения котла спиртом, дизельным топливом, серной кислотой и мазутом. Видно, что существенного изменения коэффициента затухания при изменении типа жидкого груза не обнаружено, но при увеличении налива зафиксировано его снижение.

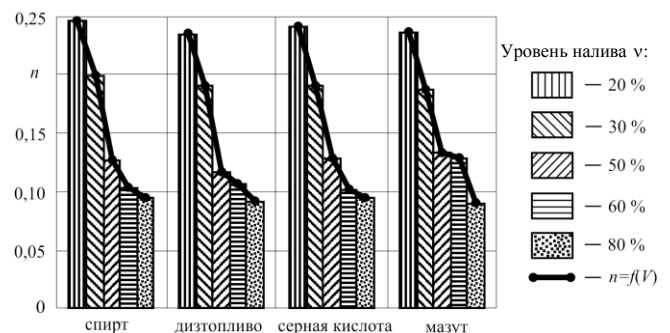


Рисунок 1 – Изменение коэффициента затухания колебательных процессов в зависимости от типа жидкого груза для различных уровней заполнения котла

Выполним серию расчетов перетекания жидкости при изменении ее вязкости для определения «порога чувствительности» этого показателя на степень затухания колебаний. Установлено, что принципиальные изменения коэффициент затухания претерпевает в трех интервалах значений динамической вязкости: 0–0,1; 0,1–0,6 и 0,6–10 кг·с<sup>-1</sup>/м. Так, учитывая, что в пределах одного *i*-го интервала зависимость весьма тесно аппроксимируется прямой, интервальные градиенты можно определить следующим образом:  $\Delta_{n,\mu}^{(i)} = n_{ki} \mu_{ni}^{-1} n_{ki}^{-1} \mu_{ki}^{-1}$ , где  $n_{ni}$ ,  $\mu_{ni}$  – начальное значение коэффициента затухания и динамической вязкости для *i*-го интервала;  $n_{ki}$ ,  $\mu_{ki}$  – конечное значение коэффициента затухания и динамической вязкости для *i*-го интервала. Получено, что при  $\mu = 0 \dots 0,1$  кг·с<sup>-1</sup>/м  $\Delta_{n,\mu}^{(1)} = 0,113$ ; при  $\mu = 0,1 \dots 0,6$  кг·с<sup>-1</sup>/м  $\Delta_{n,\mu}^{(2)} = 0,267$ ; при  $\mu = 0,6 \dots 10$  кг·с<sup>-1</sup>/м  $\Delta_{n,\mu}^{(3)} = 0,094$ . Таким образом, изменение вязкости перевозимой жидкости в пределах первого и третьего интервалов существенного влияния на колебательный процесс жидкого груза не оказывает, и, на наш взгляд, допустимо при моделировании динамики цистерны принимать характеристики жидкого груза с «осредненной интервальной вязкостью». В то же время при определении динамических параметров железнодорожных цистерн с жидкими грузами, вязкость которых изменяется в пределах второго интервала, следует выполнять анализ с учетом более широкого диапазона соответствующих характеристик жидкого тела.

Для анализа продольных колебаний железнодорожной цистерны при различных режимах эксплуатации с учетом частичного заполнения котла цистерны с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [3] разработана трехмерная твердотельная динамическая модель цистерны для перевозки нефтепродуктов модели 15–1443, имеющая возможность взаимодействия с рельсовой колеей. Она состоит из кузова вагона, расположенного на тележках, модельные характеристики которых соответствуют тележкам модели 18-100, а также автосцепных устройств, включающих силовые элементы поглощающего аппарата.

Геометрические характеристики элементов конструкции вагона определены с использованием модели, разработанной в [5]. Для учета подвижности жидкого груза задана материальная точка, связанная с кузовом вагона-цистерны контактом типа «точка – кривая», имеющая возможность перемещения относительно кузова по заданной траектории. Кроме того, в модели предусмотрено приложение осевых составляющих сил сопротивления движению эквивалентного твердого тела в зависимости от соответствующих составляющих его скоростей в относительном движении.

Проведена серия расчетов для случая воздействия продольной силой 0,5 МН в автосцепное устройство свободно катящейся со скоростью 1 м/с по рельсовой колее вагона-цистерны в течение 0,5 с при различных

уровнях заполнения котла жидкостью. Для выявления влияния перетекания жидкого груза на кинематические характеристики вагона определены максимальные значения увеличения и снижения скорости вагона-цистерны с жидкостью и вертикальных перемещений ее автосцепных устройств относительно случая, когда жидкое тело неподвижно (рисунок 2).

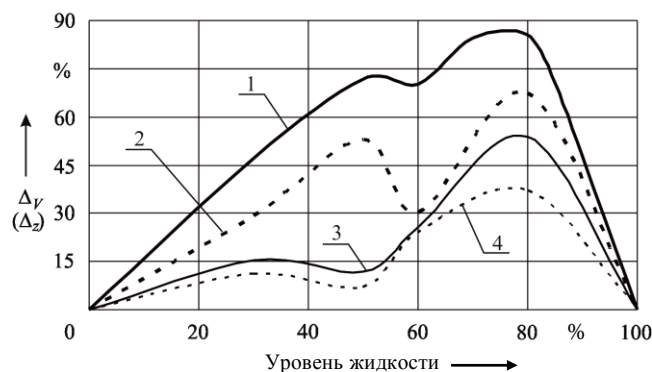


Рисунок 2 – Максимальные значения увеличения и снижения скорости  $\Delta v$  вагона-цистерны с жидкостью и вертикальных перемещений автосцепок  $\Delta z$  относительно случая, когда жидкое тело неподвижно:  
1 – увеличение скорости вагона-цистерны; 2 – снижение скорости вагона-цистерны; 3 – увеличение вертикального перемещения первого по ходу движения автосцепного устройства; 4 – увеличение вертикального перемещения второго по ходу движения автосцепного устройства

Выполнено также моделирование режима соударения вагонов, один из которых вагон-цистерна с жидким грузом накатывается со скоростью 12 км/ч на свободно стоящий загруженный вагон общей массой 85 т. На рисунке 3 приведены временные зависимости изменения скорости вагона-цистерны для различных уровней заполнения котла жидкостью. Приведенные зависимости демонстрируют колебательный характер изменения скорости вагона-бойка, отличающиеся лишь периодом и величиной амплитуды колебаний.

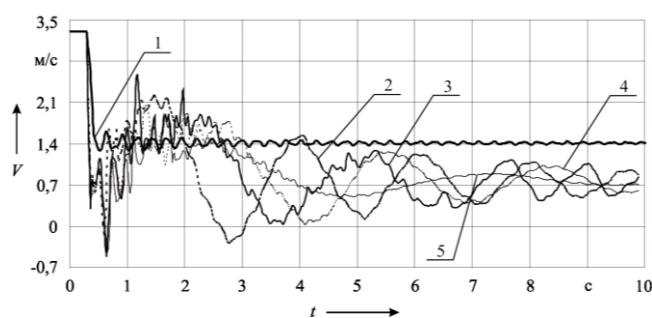


Рисунок 3 – Изменение скорости вагона-цистерны с жидкостью при соударении вагонов:  
1 – нормативный налив; 2 – налив 80%; 3 – налив 60%;  
4 – налив 50%; 5 – налив 30%

Анализ максимальных значений увеличения и снижения скорости вагона во времени относительно случая, когда жидкое тело неподвижно для различных наливов котла, показал, что для рассматриваемого режима наибольшее влияние оказывает перетекание груза при заполнении котла на 50–80% (рисунок 4).

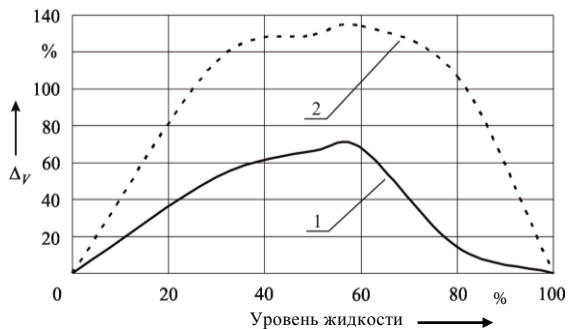


Рисунок 4 – Максимальные значения увеличения и снижения скорости вагона-цистерны с жидкостью относительно случая, когда жидкое тело неподвижно

Таким образом, результаты выполненных расчетов показали, что наиболее влияющим на динамические характеристики вагона является уровень заполнения жидким грузом 50–80 %. В то же время, в соответствии с п. 3.2.13 Правил перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума запрещается предъявлять к перевозке вагоны-цистерны, если степень наполнения котла жидкостью, имеющей кинематическую вязкость менее 2680 сСт при 20 °С, составляет от 20 до 80 % от полного объема котла. Здесь следует отметить, что в ряде случаев заполнение котла вагона на 80 % может быть весьма опасным не только с позиции динамики вагона, но и с точки зрения гидродинамической нагруженности. Так, на рисунке 5 приведены результаты расчета гидродинамической нагруженности днища котла цистерны при ударном нагружении. Результаты получены с использованием компьютерных моделей, разработанных в [5].

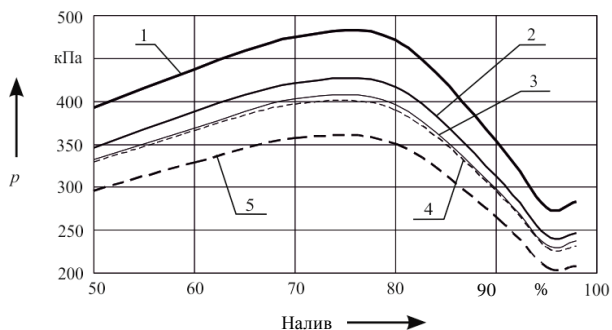


Рисунок 5 – Гидродинамическая нагруженность днища котла цистерны при ударном нагружении в зависимости от заполнения жидким грузом:

1 – мазут; 2 – дизельное топливо; 3 – нефть; 4 – спирт; 5 – бензин

Развивая предлагаемый подход в направлении возможности оценки поперечной динамики наливного экипажа, необходимо на стадии определения траектории движения центра масс получить не траекторию движения центра масс в продольном направлении, а траекторию-поверхность перемещения последнего. Так, например, на рисунке 6 (траектория-поверхность показана в режиме «проволочного» изображения) приведена

Получено 17.04.2013

**V. I. Senko, A. V. Putsiata.** Features longitudinal dynamics of the railway tank car.

Results of implementation of algorithm of simulation of direct dynamics 4-axes the railway tank car taking into account a possible incomplete filling of a copper are reduced. It is installed, that by the most influencing dynamic characteristics, and also on hydrodynamic loading level of filling of a copper on 50–80 % is. Development of the considered approach for the analysis of the transverse dynamics of the cisterns, and also dynamics of a bulk train is offered.

модель с 60 %-м заполнением жидкостью, позволяющая выполнять анализ не только продольной, но и поперечной динамики вагона.

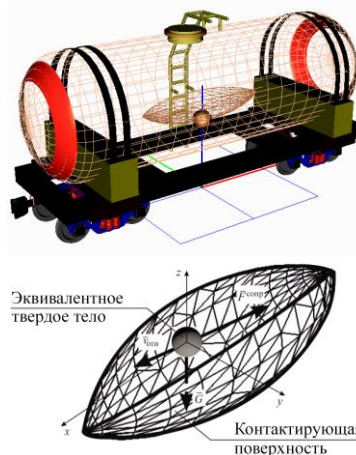


Рисунок 6 – Твёрдотельная модель вагона-цистерны для анализа продольной и поперечной динамики с наливом 60 %

Задавая разработанные динамические модели вагонов-цистерн в виде подсистем, появляется возможность моделирования динамики наливного поезда, которая, как известно, имеет существенные отличия от динамики грузовых поездов, перевозящих сухогрузы. Для примера, на рисунке 7 приведена модель для анализа продольной динамики сцепа из пяти вагонов-цистерн (траектория центра масс – кривая), перевозящих дизельное топливо и имеющих различные уровни заполнения котла.

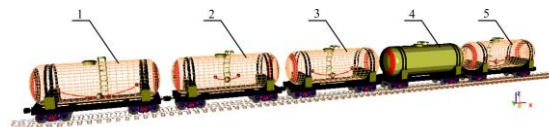


Рисунок 7 – Компьютерная модель сцепа из пяти вагонов-цистерн с различным уровнем заполнения дизельным топливом: 1 – налив 20 %; 2 – налив 80 %; 3 – налив 30 %; 4 – нормативный налив; 5 – налив 60 %

**Список литературы**

- 1 **Богомаз, Г. И.** Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / Г. И. Богомаз. – Киев : Наукова думка, 2004. – 223 с.
- 2 **Высоцкий, М. С.** Динамика автомобильных и железнодорожных цистерн / М. С. Высоцкий, Ю. М. Плескачевский, А. О. Шимановский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2006. – 320 с.
- 3 Интернет-портал Российской Федерации [Электронный ресурс] / Универсальный механизм: программы, руководство пользователя, презентации. – Брянск, 2010. – Режим доступа : [www.umlab.ru](http://www.umlab.ru). – Дата доступа : 15.09.2010.
- 4 **Путьято, А. В.** Компьютерное моделирование продольной динамики железнодорожных цистерн с учетом возможного недолива котла / А. В. Путьято // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель : БелГУТ, 2010. – № 2 (21). – С. 10–15.
- 5 **Путьято, А. В.** Теория и практика совершенствования конструкций кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами / А. В. Путьято. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 295 с.
- 6 **Черкашин, Ю. М.** Динамика наливного поезда / Ю. М. Черкашин // Тр. ЦНИИ МПС. – М. : Транспорт, 1975. – Вып. 543. – 136 с.