

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ БОКОВОЙ КАЧКИ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КРИВЫХ

Л.М. Абдуллин, Ю.К. Мустафаев

Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

Обоснование. Безопасность движения поездов является одним из основных условий перевозок грузов. Задачи повышения безопасности перевозок и снижение динамического воздействия на путь отмечены как одни из приоритетных в Стратегии развития холдинга ОАО «РЖД». Таким образом, грузы, возможно изначально неопасные, могут стать причиной перехода движения поезда в опасное состояние (дестабилизирующий фактор).

Цель — найти зависимость максимальной безопасной скорости движения вагона от величины недолива жидкости от уровня максимального заполнения котла цистерны, а также относительно возвышения наружного рельса.

Методы. Анализ научно-методической литературы, методы математического моделирования колебания механических систем, исследование устойчивости движения вагона-цистерны, графические методы, для визуализации результатов была использована программа Mathematica.

Результаты. Перевозимую жидкость принципиально невозможно закрепить при перевозке, а наличие свободной поверхности создает условия для потенциальных колебаний, что существенно оказывает неблагоприятное воздействие на безопасность перевозки груза.

По результатам исследования минимальная критическая скорость по расчетам получилась при коэффициенте заполнения в районе значения, близкого к 50 %. Тогда, с точки зрения устойчивости, рекомендуется заполнять цистерну либо в диапазоне от 0 до 30 %, либо от 80 до 100 %. В зависимости от перевозимого груза меняется и динамика вагонов-цистерн.

Жидкость представлена в виде сегмента (рис. 1), то есть изменением формы свободной поверхности пренебрегали. Это было сделано для того, чтобы представить колебания жидкости как колебания маятника.

Тогда для определения центра масс были применены формулы:

$$h = \frac{4r(\sin\alpha)^3}{6\alpha - 3\sin 2\alpha}, \quad \lambda = \frac{m}{m_0} = \frac{S_{\text{сегм}}}{S_{\text{круг}}} = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\pi},$$

где h — высота недолива цистерны; λ — коэффициент заполнения цистерны; r — радиус цистерны; α — половина центрального угла, образованного хордой свободной поверхности жидкости; m — масса груза; m_0 — масса цистерны; $S_{\text{сегм}}$ — площадь сегмента, представляющего собой поперечное сечение жидкости; $S_{\text{круг}}$ — площадь круга.

Существует три основных случая колебаний жидкости в котле.

1. В первом случае равнодействующая сил тяжести направлена наружу кривой, то есть угол возвышения наружного рельса в кривой не компенсирует центробежные силы. Тем самым возникает возможность опрокидывания наружу кривой при отклонении маятника на максимальный угол.

2. Второй случай возникает, когда равнодействующая сил инерции направлена внутрь кривой, но максимальное отклонение маятника превышает угол возвышения наружного рельса в кривой.

3. Третий случай возможен при малой скорости в пути с большим возвышением наружного рельса. Таким образом, возникает опрокидывания цистерны внутрь кривой.

В данной работе был рассмотрен только один случай — первый, так как с точки зрения возможности возникновения наиболее опасных колебаний, он является наиболее показательным. Для него была составлена расчетная схема (рис. 2).

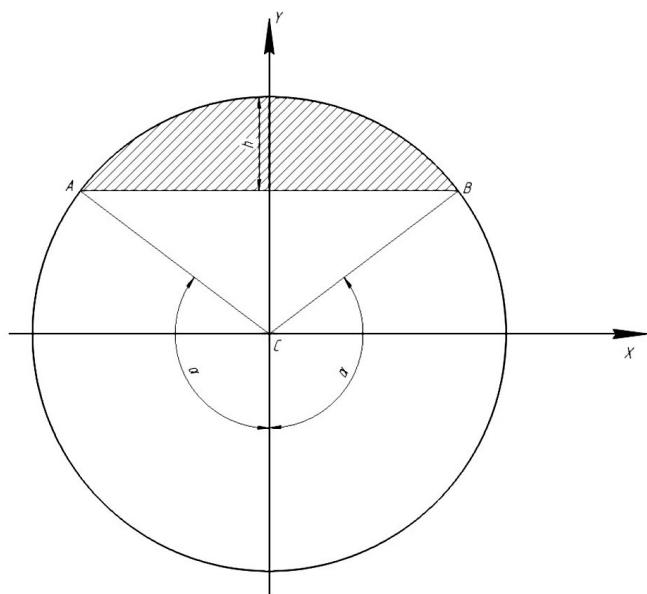


Рис. 1. Определение положения центра масс сегмента

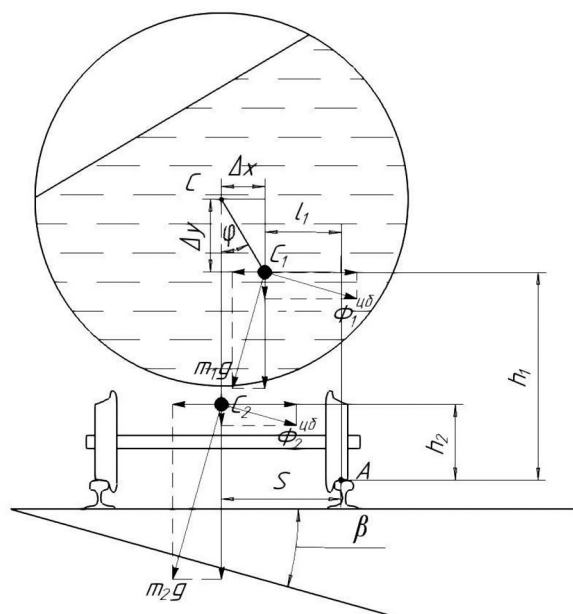


Рис. 2. Расчетная схема для случая 1

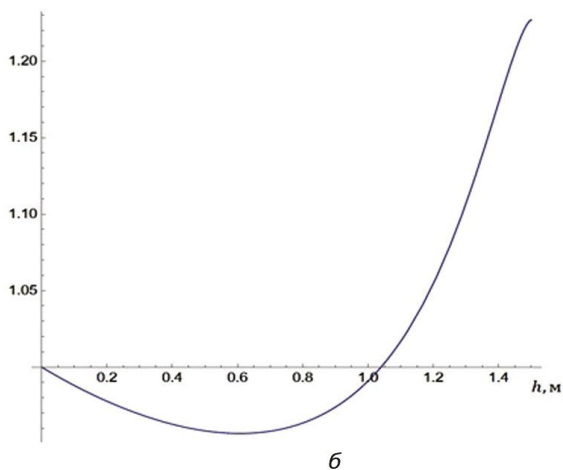
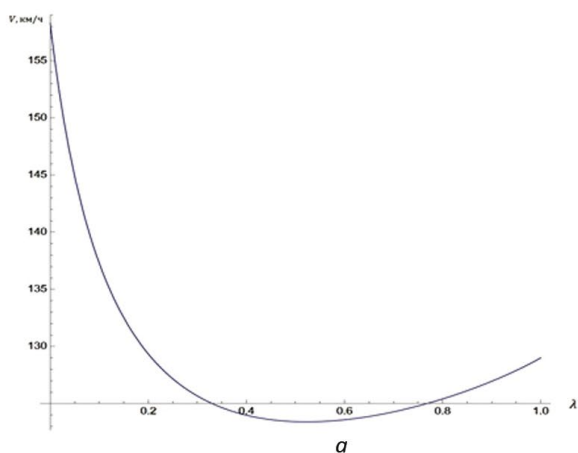
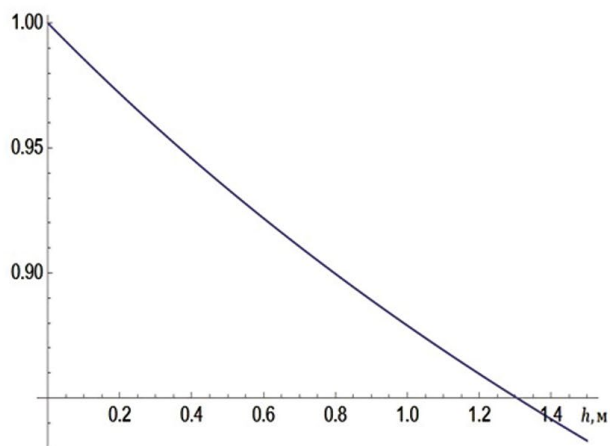
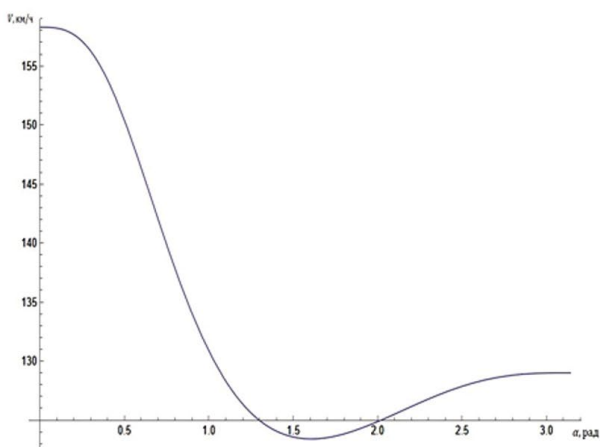


Рис. 3. а — графики зависимости критической скорости от α (вверху) и коэффициента заполнения λ (снизу);
б — графики изменения отношения критической скорости к критической скорости заполненной цистерны от высоты недолива h без учета (вверху) и с учетом (внизу) изменения массы

Следует отметить, что для остальных случаев оценка снижения устойчивости в данном исследовании не проводилась. В расчетной схеме система координат повернута таким образом, что ось Ox параллельна головкам рельсов, а ось Oy — направлена перпендикулярно пути.

Для оценки устойчивости от опрокидывания было составлено уравнение кинестатического равновесия в виде суммы моментов всех действующих сил относительно точки A , то есть рассмотрено опрокидывание наружу от кривой:

$$\sum M_A = m_1 \lambda \left(g \sin \beta - \frac{V^2 \cos \beta}{R} \right) \left(h_1 - h \cos \left(2 \tan^{-1} \left(\frac{V^2}{gR} \right) - \beta \right) \right) + m_1 \lambda \left(g \cos \beta + \frac{V^2 \sin \beta}{R} \right) \left(S - h \sin \left(2 \tan^{-1} \left(\frac{V^2}{gR} \right) - \beta \right) \right) + h_2 m_2 \left(g \sin \beta - \frac{V^2 \cos \beta}{R} \right) + m_2 S \left(g \cos \beta + \frac{V^2 \sin \beta}{R} \right) = 0.$$

Из данного уравнения было выведено уравнение зависимости скорости от α :

$$V = \sqrt{\frac{gRh_1 m_1 \lambda \sin \beta + h_2 m_2 \sin \beta + m_1 S \lambda \cos \beta + m_2 S \cos \beta}{hm_1 \lambda + h_1 m_1 \lambda \cos \beta + h_2 m_2 \cos \beta - m_1 S \lambda \sin \beta - m_2 S \sin \beta}} =$$

$$= \sqrt{\frac{gRm_2 S \cos \beta + \frac{m_1 S \cos \beta \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)}{2\pi} + h_2 m_2 \sin \beta + \frac{h_1 m_1 (2\alpha - \sin 2\alpha) \sin \beta}{2\pi}}{h_2 m_2 \cos \beta + \frac{h_1 m_1 \cos \beta \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)}{2\pi} + \frac{2m_1 r (\sin \alpha)^3 \cdot (2\alpha - \sin 2\alpha)}{\pi(6\alpha - 3\sin 2\alpha)} - m_2 S \sin \beta - \frac{m_1 S (2\alpha - \sin 2\alpha) \sin \beta}{2\pi}}}$$

Выводы. По результатам исследования минимальная критическая скорость по расчетам получилась при коэффициенте заполнения в районе значения, близкого к 50 %. Тогда, с точки зрения устойчивости, рекомендуется заполнять цистерну либо в диапазоне от 0 до 30 %, либо от 80 до 100 %. Также можно сделать вывод, что, с учетом изменения массы жидкости, была получена довольно большая разница отношений скоростей с увеличением высоты недолива цистерны, то есть, учитывая еще больше дополнительных параметров, появляется возможность уточнить наши расчеты, поэтому планируется учесть прогиб рессорного подвешивания вагона-цистерны, так как при учете данного фактора центр масс вагона будет смещен.

Ключевые слова: вагон-цистерна; качка; кривые; анализ; моделирование; опрокидывание; уравнение кинестатики.

Список литературы.

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Москва, 2015. 69 с. Доступ по ссылке: http://www.rzd-expo.ru/innovation/sait_WB.pdf
2. Мустафаев Ю.К., Мазанов А.С. Разработка математической модели и исследование различных форм боковых колебаний кузова грузового вагона // Наука и образование транспорта. 2017. № 2. С. 162–165.
3. Писарева Д.Е. Оценка устойчивости вагона от опрокидывания к кривой при частичном заполнении котла цистерны // Сборник материалов XLV научной конференции обучающихся СамГУПС: «Дни студенческой науки». Вып. 19. С. 60–61.
4. Рожкова Е.А., Астафьева А.Н., Баранова Т.А. Анализ устойчивости вагона от опрокидывания при движении в кривых участках пути различного радиуса // Электронный научный журнал: Молодая наука Сибири: 2020. № 2.
5. Долматов А.А., и др. Особенности динамики вагонов при высоких скоростях движения // Труды ВНИИЖТ. вып. 342. Москва: Транспорт, 1978. С. 1–159.
6. studmed.ru [Электронный ресурс]. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1993. 260 с. Доступ по ссылке: https://www.studmed.ru/normy-dlya-rascheta-i-proektirovaniya-vagonov-zheleznyh-dorog-mps-kolei-1520-mm-nesamohodnyh-_066ec375b79.html

Сведения об авторах:

Маратович Абдуллин Линар — студент, группа ПСЖД-91, факультет «Подвижной состав и путевые машины»; Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия. E-mail: linar.abdullin721@gmail.com

Юрий Кямалович Мустафаев — старший преподаватель кафедры «Наземные транспортно-технологические средства»; к.т.н.; Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия. E-mail: mustafaev.yuri@mail.ru