

# УТОЧНЕН РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КУЗОВА ПОЛУВАГОНА ПРИ РАЗГРУЗКЕ НА ВАГОНОПРОКИДЫВАТЕЛЕ

**А.В. Додонов, заместитель директора ООО «ИЦ ПС», канд. техн. наук,  
И.А. Хиллов, младший научный сотрудник ООО «ИЦ ВС»**

В настоящее время количество эксплуатируемых на железных дорогах колес 1520 мм полувагонов превысило 500 тыс. ед. На сегодня это самый распространенный тип подгонного состава, насчитывающий более 110 моделей. Тем не менее, работы по созданию новых конструкций полувагонов продолжаются, что влечет за собой необходимость в совершенствовании методов расчета прочности кузовов на стадии проектирования.

Следует отметить, что для разгрузки полувагонов наиболее эффективным является использование вагонопрокидывателей. Данный процесс занимает всего несколько минут, а производительность вагонопрокидывателя может достигать 50 тыс. т в час. При таком способе разгрузки кузов полувагона испытывает значительные нагрузки, действие которых необходимо учитывать при проектировании.

При оценке прочности конструкции грузовых вагонов руководствуются Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (неискользящий) (1) (далее — Нормы). Согласно требованиям данного нормативного документа боковые стенки полувагона и открытые вагоно-копелеры для условий разгрузки на вагонопрокидывателе проверяются по I расчетному режиму на одновременное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок, равномерно распределенных по ширине верхней обвязки на длине 0,8 м

средней части пролета обвязки между соседними стойками (рис. 1, а).

Величину вертикальной нагрузки определяют по формуле:

$$q_v = P_{\text{вс}}/n,$$

где  $P_{\text{вс}}$  — сила тяжести вагона брутто, кН;

$n$  — количество упоров вагонопрокидывателя.

Горизонтальную поперечную силу при этом принимают равной  $q_h = 0,25q_v$ .

В результате расчета получают поля напряжений в конструкции кузова полувагона (рис. 1, б).

Вместе с тем, как свидетельствует практика, полувагоны при разгрузке на вагонопрокидывателе все же получают повреждение. Причиной этого является то, что нормативные документы, регламентирующие расчет грузовых вагонов на прочность, не корректировались более 15 лет, тогда как условия эксплуатации постоянно ужесточались. Поэтому силы, возникающие при разгрузке полувагона на вагонопрокидывателе, существенно отличаются от нормативных значений. Таким образом, задача уточнения нагрузок, действующих на полувагон при данном способе разгрузки, на сегодняшний день является актуальной.

Для решения этой задачи специалистами группы компаний «Инженерный центр» (г. Санкт-Петербург) проведены расчетно-экспериментальные исследования по уточнению силового воздействия на

конструкцию кузова полувагона при его разгрузке на вагонопрокидывателе. Данные исследования включали в себя:

- анализ работы вагонопрокидывателя для выявления факторов, влияющих на величину силового воздействия на полувагон, и уточнения граничных условий;
- проведение исследовательских испытаний для получения фактических значений напряжений в конструкции полувагона при его разгрузке на вагонопрокидывателе;
- сопоставление напряжений, определенных в результате нормативного расчета, с экспериментальными значениями напряжений для оценки адекватности нормативной расчетной модели (удельная относительная сходимости было принято расхождение не более 10%);
- корректировку граничных условий расчетной модели для получения удельной относительной сходимости между расчетом и экспериментом.

На первом этапе было выполнено исследование конструкции и проведен анализ работы наиболее распространенного вида вагонопрокидывателя с целью выявления параметров, влияющих на величину силового воздействия на кузов полувагона. Следует отметить, что для разгрузки полувагонов наиболее часто применяются роторные вагонопрокидыватели (рис. 2), на которых полувагон поворачивается относительно продольной оси на угол до 170°.

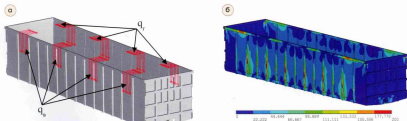


Рис. 1. Расчетная модель кузова полувагона при нормативном расчете:  
а — схема приложения нагрузок, б — напряженно-деформированное состояние кузова полувагона

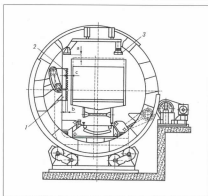


Рис. 2. Общий вид и схема вагоноопрокидывателя роторного типа

Грузный полувагон устанавливают на платформе вагоноопрокидывателя. Затем машинист вагоноопрокидывателя включает механизм поворота. При этом платформа с полувагоном под действием собственной массы и пружин тележек смещается до прилегания боковой стены полувагона к привальной стенке вагоноопрокидывателя 1.

В месте взаимодействия возникают силы, величина которых зависит от расстояния (а) между привальной стенкой и боковой стеной кузова полувагона, обусловленного, в свою очередь, шириной разгружаемого полувагона, скорости опрокидывания в момент привала, наличия и состояния резинового армирования 2 на привальной стенке. Полная боковая привалка кузова полувагона происходит при повороте ротора вагоноопрокидывателя на угол  $10-15^\circ$ . При дальнейшем вращении подвижная привальная стенка с полувагоном и платформой перемещается до момента отпирания верхней обвязки на упоры вибраторов 3.

Полная вертикальная привалка кузова полувагона достигается при повороте ротора вагоноопрокидывателя на угол  $60-65^\circ$ . Величина сил, возникающих в месте контакта верхней обвязки полувагона с упорами вибраторо-

ров вагоноопрокидывателя, зависит от расстояния (а), количества и расположения упоров вибраторов, скорости опрокидывания и неравномерности, вызванной деформациями верхней обвязки и упоров, а также определяется разностью прогибов рессорного подвешивания тележек.

В дальнейшем происходит распределение рессорных комплектов и скопление кузова по привальной стенке вагоноопрокидывателя, при этом возникает дополнительные усилия. При достижении угла поворота ротора вагоноопрокидывателя  $170^\circ$  механизм вращения останавливается. Для удаления остатков груза из кузова включают вибраторы, после чего полувагон возвращается в исходное состояние.

Таким образом, из приведенного выше описания следует, что величина нагрузки, действующей на кузов полувагона, зависит от достаточно большого количества факторов. В связи с этим для получения фактических значений силовых воздействий на конструкцию кузова полувагона при разгрузке на вагоноопрокидывателе на следующем этапе работ были проведены натурные испытания. Для этого был использован полувагон модели 12-9869 (рис. 3).

Испытания осуществлялись на роторном вагоноопрокидывателе модели ВРС-93-110 на территории Каширской ГРЭС. Опытный полувагон был загружен углем до полной грузоподъемности, с заполнением полного объема кузова. Предусматривались три цикла разгрузки, во время которых в режиме реального времени фиксировались напряжения в элементах конструкции полувагона согласно схеме, представленной на рис. 4 (показано только привальная боковая стенка).

Данная схема была разработана таким образом, чтобы минимизировать контакт тензодатчиков с элементами вагоноопрокидывателя и при этом иметь возможность проводить анализ величин вертикальных и горизонтальных сил, действующих на полувагон в процессе разгрузки. Для регистрации деформаций в контрольных точках в качестве первых датчиков были использованы тензорезисторы с базой  $5-20$  мм.

В результате проведенных испытаний были получены осциллограммы напряжений в контрольных точках при разгрузке полувагона на вагоноопрокидывателе (рис. 5). В качестве примера приводятся напряжения в точке 71, расположенной на верхней обвязке, и в точке 18, 58, находящейся на стойках.

Как видно из рис. 5, осциллограммы напряжений можно разбить на несколько характерных этапов:

- ① этап 1 соответствует горизонтальной привалке кузова;
  - ② на этапе 2 осуществляются скольжение и вертикальная привалка кузова;
  - ③ на этапе 3 происходит дальнейший поворот полувагона, отпирание на верхнюю обвязку и развитие рессорных комплектов;
  - ④ на этапе 4 включаются в работу вибраторы;
  - ⑤ этап 5 характеризует поворот полувагона в исходное положение.
- Положения вагона на каждом из этапов разгрузки приведены на рис. 6.



Рис. 3. Общий вид полувагона перед проведением испытаний на вагоноопрокидывателе

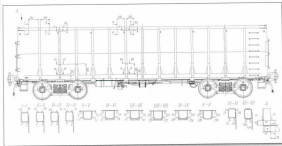


Рис. 4. Схема расположения контрольных сечений и точек в элементах конструкции полувагона

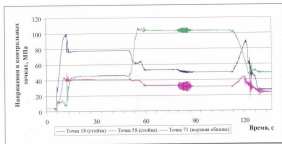


Рис. 5. Оциллограммы напряжений при проведении испытаний на вагоноспридвижателе

Проведенный далее анализ показал, что в различных элементах конструкции напряжения достигают максимума значений на разных этапах разгрузки. В сечениях верхней обвязки это происходит при максимальном повороте ротора вагоноспридвижателя (угол  $-170^\circ$ ). В стойках боковой стены наибольшие напряжения возникают либо тогда, когда полувагон поворачивают на  $45^\circ$ , либо в момент удара полувагона об упоры вибраторов (угол  $-65^\circ$ ).

Кроме того, сопоставление максимальных напряжений, зафиксированных в процессе разгрузки полувагона, с результатами нормативного расчета по-

казало, что они значительно отличаются. Поэтому уровень сходности расчетных и экспериментальных значений напряжений был признан неудовлетворительным. Далее полученные при проведении экспериментальных исследований напряжения были использованы для определения фактического силового воздействия в разные моменты времени на конструкцию полувагона при разгрузке на вагоноспридвижателе.

Для уточнения расчетных нагрузок, действующих на полувагон в моменты возникновения максимальных напряжений при его разгрузке на вагоноспридвижателе,

на следующем этапе была разработана расчетная модель конструкции кузова полувагона, сформированная из пластинчатых восьмизвуковых конечных элементов. В целом конструкция полувагона представляет собой балочные элементы, поэтому использование пластинчатых конечных элементов для данной расчетной модели обеспечило необходимую точность расчетов.

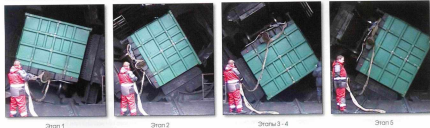
Для каждого расчетного случая (углы поворота на  $-45^\circ$ ,  $-65^\circ$  и  $-170^\circ$ ) были разработаны собственные схемы кинематических и силовых граничных условий (рис. 7). Это позволило учесть характер взаимодействия груза, полувагона и вагоноспридвижателя между собой. На схемах линейные и угловые степени свободы декартовой системы координат в элементах взаимодействия кузова полувагона с вагоноспридвижателем и тележками представлены в виде  $(x, y, z, \phi, \xi, \psi)$ , где значение 0 означает отсутствие перемещения или вращения по соответствующим осям системы координат.

Для первого расчетного случая (поворот на  $-45^\circ$ ) были учтены следующие нагрузки: от веса груза  $Q_{гв}$ , распорного груза  $P_{гв}$ , веса кузова  $Q_{ку}$ . Анализ полученных напряжений показал, что на данной этапе разгрузки полувагон опирается на тележки и верхнюю часть стоек боковой стены в зоне соединения с верхней обвязкой. Как следует из рис. 7.а, нагрузка от веса груза  $Q_{гв}$  учитывает неравномерное распределение реального груза по поверхности пола и привалочной боковой стены.

Принимая во внимание естественный угол откоса груза  $\phi$ , было установлено, что в момент поворота  $-45^\circ$  груз только начинает высылаться из полувагона, поэтому в расчете вес груза  $Q_{гв}$  был принят равным грузоподъемности полувагона. Активное давление распора груза, действующее на торцевые стены, пол и привалочную боковую стену, определялось согласно п. 2.5.1 Норм.

Второй расчетный случай (рис. 7.б) учитывал все нагрузки для первого расчетного случая, а также ударную нагрузку  $F_{гв}$ , возникающую при ударе полувагона об упоры вибраторов. Поскольку это происходит при повороте  $-65^\circ$ , то нагрузки от веса груза  $Q_{гв}$ , распора груза  $P_{гв}$ , веса кузова  $Q_{ку}$  были уточнены в соответствии с пространственным положением полувагона и количеством

Рис. 6. Основные этапы поворота полувагона на вагоноспридвижателе



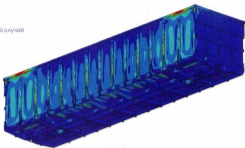
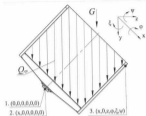
Этап 1

Этап 2

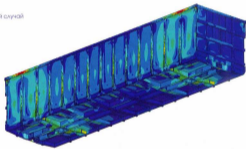
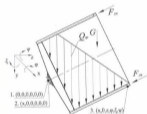
Этапы 3 - 4

Этап 5

а) первый расчётный случай



б) второй расчётный случай



в) третий расчётный случай

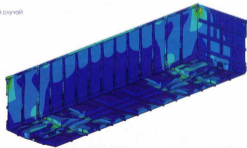
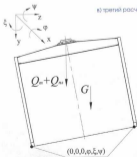


Рис. 7. Схема кинематических и силовых граничных условий

Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние кузова полувагона при разгрузке на вагоноопределятеле

оставшегося в кузове полувагона груза. При этом, принимая во внимание угол естественного откоса груза  $\alpha$ , была установлена, что в момент поворота на  $-65^\circ$  из полувагона выскочило 30 — 35% груза, поэтому в расчете вес груза  $Q_{\text{г}}$  был принят равным 2/3 от грузоподъемности полувагона.

Сила удара была определена по разработанной ранее и успешно апробированной в Инженерном центре методике (2). Для привалочной и свободной боковой станы сила удара составила  $F_{\text{уд}} = 125$  кН на один упор.

Необходимо отметить, что рассматриваемую силу удара в целом можно записать в виде следующей формулы:

$$F_{\text{уд}} = k(Q_{\text{п}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{в}}),$$

где  $Q_{\text{п}}$  — вес груза;

$Q_{\text{в}}$  — вес подвижной платформы;

$Q_{\text{п}}$  — вес кузова;

$Q_{\text{в}}$  — вес тележек;

$k$  — коэффициент приведения динамической нагрузки к эквивалентной статической;

$$k = f(a, v, \alpha),$$

где  $a$  — расстояние между верхней обвязкой полувагона и опорами вагоноприкидывателя, м;

$v$  — угловая скорость вращения ротора, об/мин;

$\alpha$  — угол наклона к горизонту направляющей, по которой происходит скатывание полувагона с платформы до соударения с опорами вибраторов.

Анализ представленных зависимостей показывает, что сила удара полувагона об упоры вибраторов зависит от параметров вагоноприкидывателя, которые являются постоянными для данной модели, а также от массовых и геометрических параметров разгружаемого полувагона. Таким образом, чем ниже высота полувагона от уровня головки рельсов, тем больше будет величина силы соударения, что необходимо учитывать при проектировании.

Для третьего расчетного случая (поворот на  $-170^\circ$ , рис. 7а) были учтены следующие нагрузки: от веса тележек  $Q_{\text{т}}$  и веса подвижной платформы  $Q_{\text{п}}$ , и веса кузова  $Q_{\text{к}}$ . Согласно документации на вагоноприкидыватель масса подвижной платформы составляет 70 т. Анализ полученных напряжений показал, что полувагон опирается на верхние обвязки в местах контакта с опорами вибраторов.

На заключительном этапе исследований по уточненной методике был проведен расчет прочности конструкции полувагона при разгрузке на вагоноприкидывателе (рис. 8). При этом использовались три описанные выше расчетные схемы: поворот полувагона на  $45^\circ$ , поворот полувагона на  $65^\circ$  с ударной нагрузкой об упоры вибраторов и поворот полувагона на  $170^\circ$ .

В итоге за счет применения уточненной силовой модели в расчетной модели кузова полувагона при его раз-

грузке на вагоноприкидывателе удалось добиться корреляции результатов расчетов и испытаний на уровне 94%. Поэтому использование разработанных расчетных схем на стадии проектирования поможет создавать более рациональные конструкции боковых станы.

Резюмируя вышесказанное, можно заключить, что в результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований было получено уточненное силовое воздействие на конструкцию кузова полувагона при его разгрузке на вагоноприкидывателе. Разработаны три расчетные схемы для проверки прочности боковых станы вновь создаваемых конструкций при такой разгрузке. Предложенные расчетные схемы необходимы в дальнейшем обобщить при проведении расчетов полувагонов различных конструкций и открытых вагонов-копиров, после чего они могут быть использованы при разработке новой редакции Норм.

#### Литература

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несомкнутый). — М.: ГосНИИЖТ-ВНИИЖТ, 1996. — 317 с.
2. Блоцкий А.А. Расчетно-экспериментальное обоснование допустимых продольных нагрузок на торцевые станы полувагона / А.А. Блоцкий, И.А. Жилое // Исследование параметров грузовых вагонов: сб. науч. тр. / под ред. А.А. Блоцкого; Инженерный центр «Релаксация». — СПб., 2011. — Вып. 10. — С. 6 — 14.

## ВАМ ПРЕДЛАГАЮТ НОВЫЕ ИЗДАНИЯ



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте» (ФБГОУ «УМЦ ЖД») вступил в свет следующие издания:

Галабузда В.Г. «Транспортный маркетинг». Электронный аналог печатного издания. 2011. Цена 336,30 руб.

В учебнике даны уточнения общих понятий концепции маркетинга на транспорте, дополнена характеристика транспортного рынка и продукция транспорта, расширены методы и способы изучения конъюнктуры рынка транспортных услуг, технологии проведения маркетинговых исследований и формирования спроса на перевозки, планирование и управление транспортным маркетингом с использованием информационных технологий.

Дойлидко А.А. «Метрология, стандартизация и сертификация». Электронный аналог печатного издания. 2009. Цена 336,30 руб.

В учебном пособии подробно изложены основы метрологии, стандартизации и сертификации технических измерений и управления качеством, объяснено использование в различных отраслях предприятий железнодорожного

транспорта. Издание может быть полезно работникам железнодорожного транспорта.

Данилини В.Ф. «Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятий железнодорожного транспорта». Электронный аналог печатного издания. 2008. Цена 336,30 руб.

В учебнике изложены содержание, значение и роль экономической диагностики и анализа хозяйственной и финансовой деятельности предприятий в системе реформирования экономики железнодорожного транспорта. Приведены основные приемы и способы аналитической работы по оценке фактического состояния экономики предприятия.

Козырев В.А. «Менеджмент на железнодорожном транспорте». Электронный аналог печатного издания. 2009. Цена 336,30 руб.

Изложены ключевые составляющие типологии менеджмента на железнодорожном транспорте: корпоративный, стратегический, инновационный, кадровый, социальный и финансовый менеджмент. Издание будет полезно специалистам — функциональцам и линейным руководителям железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения обращайтесь в ФБГОУ «УМЦ ЖД»: 105082, г. Москва, ул. Бокуневская, д. 71. Тел. (495) 739-00-31, marketing@umczd.ru

ФИЛИАЛЫ ФБГОУ «УМЦ ЖД»:

664029, г. Иркутск, ул. 4-я Железнодорожная, д. 14-а  
630003, г. Новосибирск, ул. Владимира Ленина, д. 15-А  
344019, г. Ростов-на-Дону, ул. 9-я линия, д. 10  
443030, г. Самара, ул. Чернышевская, д. 29-а  
660000, г. Хабаровск, ул. Фрунзе, д. 39-а  
454005, г. Челябинск, ул. Цвиллинга, д. 63  
150000, г. Ярославль, ул. Революционная, д. 28

факс (ж.д.): 992-46-4-37-27  
факс (ж.д.): 978-2-36-45; 978-2-27-35  
факс (гор.): 8-8-032-53-51-65  
факс (гор.): 8-8-465-372-63-08  
факс (ж.д.): 998-4-98-51  
факс (ж.д.): 972-41-4-36-89  
факс (гор.): 4852-72-65-95

e-mail: ir@umczd.ru  
e-mail: novosib@umczd.ru  
e-mail: rostov@umczd.ru  
e-mail: samara@umczd.ru  
e-mail: habarovsk@umczd.ru  
e-mail: chel@umczd.ru  
e-mail: yar@umczd.ru