

# Оценка устойчивости высокоскоростного подвижного состава при движении по эстакаде с учетом повышенной пиковой ветровой нагрузки



**А. А. Воробьев,**  
д-р техн. наук,  
заведующий кафедрой  
наземных транспортно-  
технологических  
комплексов Петербург-  
ского государственного  
университета путей  
сообщения Императора  
Александра I (ПГУПС),



**Я. С. Ватулин,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
наземных транспортно-  
технологических  
комплексов ПГУПС,



**Э. Ю. Чистяков,**  
старший преподаватель  
кафедры строительных  
материалов  
и технологий ПГУПС

В рамках создания ВСМ в России необходимо выполнить численное моделирование аэродинамической нагрузки на поезд при его движении на эстакадах, оценить устойчивость подвижного состава при воздействии явления «сноса» и установить предельные значения скоростного режима в зависимости от нагрузки, образующейся при штормовых условиях на прибрежных участках пути.

Современное представление обеспечения надежного железнодорожного движения [1] предполагает передвижение по эстакадам определенной высоты с минимальным воздействием на окружающую среду. Но при этом подвижной состав подвергается воздействию сложного сочетания воздушных потоков, образующихся в результате вымещения и инерционного увлечения воздушных масс движущимся корпусом, а также потоков воздуха бокового направления со стороны открытого пространства водной поверхности. Формирующееся таким образом аэродинамическое нагружение значительно отличается от варианта движения поезда по высокой насыпи.

Аналогичная проблема высокоскоростного движения известна, например, по линии Méditerranée (Франция) на участках в направлении Марселя и Монпелье. При пересечении долины р. Рона (южнее г. Авиньон) поезд TGV Duplex должен двигаться по виадуку высотой 55 м с заявленной скоростью 300 км/ч [2]. Однако в данной местности нередко образуются мощные порывы ветра, способные создавать значительный опрокидывающий момент.

Результаты исследований [3] показывают, что структура возмущенной воздушной среды, образующаяся в непосредственной близости от движущегося поезда, в значительной степени зависит от конфигурации и расположения элементов приближенных сооружений.

Таким образом, данную задачу необходимо рассматривать в обобщенной трехмерной постановке с учетом конфигурации окружающих поверхностей.

Устойчивость подвижного состава к воздействию бокового ветра на специфических участках пути при определенных климатических условиях регламентируется в технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI) [4]. Опрокидывающий момент [5], образованный результирующей воздействия ветровой нагрузки, создает обезгрузку колесной пары, что снижает эффективность процесса торможения и создает риск вкатывания колеса на головку рельса [6]. Критерием предельного снижения давления является распределение веса подвижного состава на колесные пары менее 10 % [7].

Сложность решения данной задачи заключается в том, что объект представляет собой многомассовую систему взаимодействующих между собой элементов с системой упруго-диссипативных связей в виде межвагонных связей [8].

## Математическая модель

Численное моделирование<sup>1</sup> аэродинамического взаимодействия движущегося подвижного состава с искусственными сооружениями выполнено с использованием метода конечных объемов с помощью

<sup>1</sup> Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

уравнений Навье — Стокса в векторной форме. Для случая несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости они имеют вид:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} \right) = \mu \Delta \vec{V} - \nabla P + \vec{f},$$

где  $\rho$  — плотность жидкости;

$V$  — скорость жидкости;

$\mu$  — кинематическая вязкость;

$g$  — ускорение свободного падения;

$P$  — давление;

$f$  — вектор массовых сил, которые, помимо силы тяжести, могут иметь различную природу (электрические, магнитные и пр.).

С целью построения полей скоростей и давлений в зависимости от положения объекта применен метод frozen rotor (замороженного ротора). Специфика применения метода предполагает задание движения исследуемого объекта по окружности относительно неподвижной приближенной периферии. С целью снижения погрешности расчета необходимо задавать радиус движения достаточно большим. Таким образом, становится возможным рассчитывать распределение скоростей и давлений в зависимости от положения объекта, движущегося по окружности радиуса относительно неподвижного объекта.

Математическое моделирование процесса потери устойчивости подвижного состава выполнено на основе составления и решения дифференциальных уравнений [9], описывающих вынужденные колебания двухмассовой системы, находящейся под воздействием внешних силовых факторов возмущения гармонического характера с ограничением по критерию смещения проекции центра масс вагона под воздействием системы возмущающих подъемных и боковых аэродинамических сил [10].

Для оценки силового воздействия движущихся воздушных масс на подвижной состав необходимо установить механизмы передачи внешних аэродинамических нагрузок с поверхности корпуса подвижного состава на тележку и далее на верхнее строение пути. С этой целью необходимо:

- составить расчетную схему для определения аэродинамического давления на корпус движущегося поезда методом конечных объемов, используя подходы теории упругости;
- определить механизм формирования воздушного сопротивления высокоскоростного состава типа «Сапсан» при его движении по эстакаде определенной высоты в условиях воздействия бокового ветра;

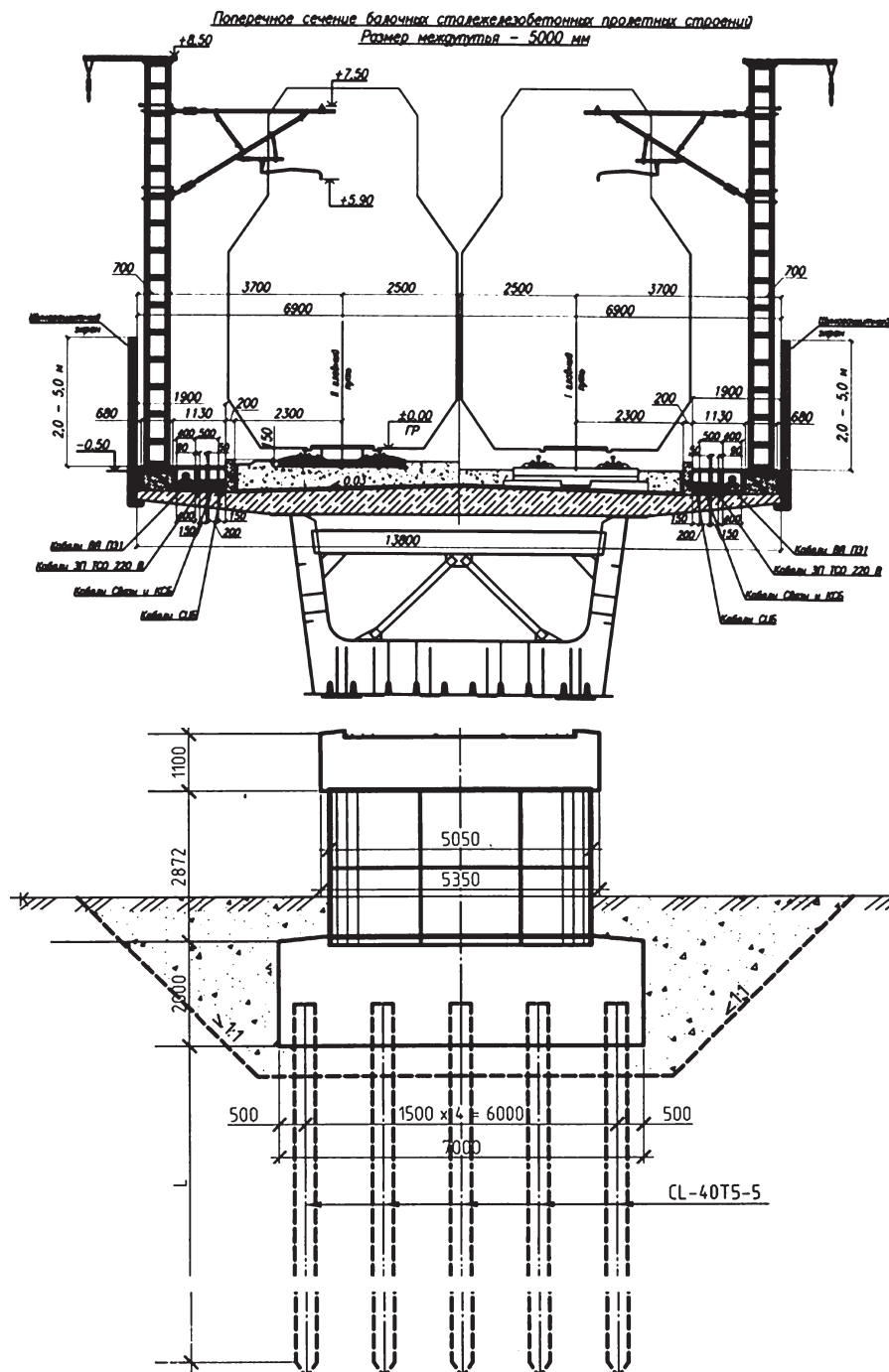


Рис. 1. Габаритные характеристики пролетного строения, опоры эстакады

- определить динамический отклик упруго-податливой подвески подвижного состава на возмущение от аэродинамического воздействия;
- определить усилия в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» при различных скоростях движения состава и скорости бокового ветра.

## Исходные данные

Для моделирования боковых потоков воздушных масс приняты условия формирования аэродинамической нагрузки при сильном шторме и урагане (по шкале Бофорта): 12 м/с — 6 баллов,

27 м/с — 10 баллов, 36 м/с — 12 баллов. Расчетным подвижным составом принят высокоскоростной электропоезд на платформе Siemens Velaro, в частности, Velaro RUS (ЭБС2 «Сапсан»). Его основные характеристики: число вагонов — 10 шт., число осей вагона — 4 шт., длина вагона — 24,73 м, длина поезда — 246,27 м, вес поезда — 6412 кН, средняя осевая нагрузка — 26,04 кН/м, высота вагона от уровня головки рельса — 5 м. Принятый уровень головки рельса над земной поверхностью соответствует отметке 4,0 м. Характеристики поглощающего аппарата автосцепного устройства: жесткость

Таблица 1. Значения давления воздушных масс на боковую поверхность корпуса головного вагона с наветренной и подветренной сторон

| Скорость поезда, км/ч | Сторона нагружения, Ра | Скорость бокового ветра, м/с |        |        |
|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------|--------|
|                       |                        | 12                           | 27     | 36     |
| 200                   | Наветренная            | -6,2                         | 35,1   | 62,7   |
| 200                   | Подветренная           | -128                         | -387   | -653,6 |
| 300                   | Наветренная            | -26,9                        | 110,9  | 123,5  |
| 300                   | Подветренная           | -191,2                       | -403,1 | -650,5 |
| 400                   | Наветренная            | -103,1                       | 138,5  | 248,1  |
| 400                   | Подветренная           | -319,7                       | -424   | -669,1 |

пружины — 26,21 МН/м, коэффициент демпфирования — 35 Н·с/мм.

Система подвешивания поезда «Сапсан» двухуровневая. Первичное рессорное подвешивание (колесо — тележка) реализуется одноповодковыми буксами, гидравлическими гасителями вертикальных колебаний и цилиндрическими винтовыми пружинами — 1400 кН/м. Вторичное рессорное подвешивание (тележка — кузов) реализуется при помощи пневмобаллонов, гидравлических гасителей вертикальных и поперечных колебаний и виляния — 670 кН/м. Кроме того, конструкция ходовых устройств поезда оборудована устройством поперечной устойчивости (от раскачивания): первичное — 1100 кН/м, вторичное — 410 кН/м.

Габаритные характеристики пролетного строения и опоры эстакады представлены на рис. 1.

### Моделирование аэродинамического нагружения

Аэродинамическое воздействие на корпусные элементы поезда формирует пространственно направленный суммарный вектор движения воздушных масс относительно подвижного состава (рис. 2): в горизонтальной (угол виляния) и вертикальной плоскостях (угол галопирования).

Для движения поезда с постоянной

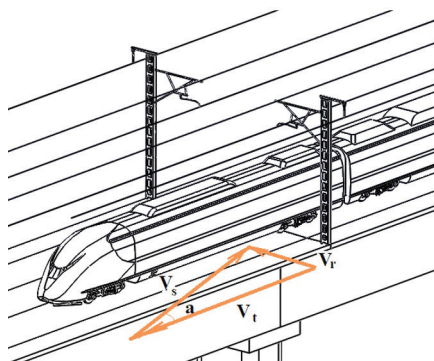


Рис. 2. Схема движения воздушных масс относительно подвижного состава

скоростью и принятой модели устойчивого бокового ветра [11] суммарный вектор аэродинамического воздействия на корпус подвижного состава определяется по формуле

$$V_s = \sqrt{V_t^2 + V_v^2},$$

где  $V_t$  — скорость транспортного средства, м/с;  $V_v$  — скорость бокового воздушного потока, м/с. Угол виляния:  $\tan a = \frac{V_v}{V_t}$ .

Установившиеся аэродинамические силы  $F$  и моменты  $M$  определяются следующим образом:

$$F = 0,5\rho S C_F(a) V_s^2,$$

$$M = 0,5\rho S h C_M(a) V_s^2,$$

где  $C_F$  — коэффициент аэродинамической силы;  $C_M$  — коэффициент аэродинамического момента;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — контрольная площадь, м<sup>2</sup>;  $h$  — контрольная высота, м.

Для моделирования порывистого бокового ветра применяется методика, изложенная в СП 20.13330.2011 п. 11 «Воздействия ветра». Трасса проходит в двух зонах 4 и 5 по скорости ветра. По давлению ветра — I, II зоны, что соответствует 30,59 кг/м<sup>2</sup> (п. 11.1.4, табл. 1.1, прил. Ж). Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на 1 м<sup>2</sup> наветренной поверхности состава:

$$W_m = W_0 K_1 C_x = 48,09 \text{ кг/м}^2,$$

где  $W_0 = 30,59$  — нормативное давление ветра для зоны II (п. 11.1.4);  $K_1 = 1,31$  — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте местности А (п. 11.15);  $C_x = 0,2$  — аэродинамический коэффициент [12].

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на высоте  $z$  следует определять (п. 11.1.8):

$$W_p = W_m K_s N_u = 19,33 \text{ кг/м}^2,$$

где  $K_s = 0,67$  — коэффициент пульсаций давления ветра на уровне  $Z$  (п. 11.1.8);

$N_u = 0,6$  — коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (п. 11.1.11).

Пиковая положительная ветровая нагрузка (п. 11.2):

$$W_z = S(W_m + W_p) = 67,42 \text{ кг/м}^2 (0,66 \text{ кПа});$$

$S = 1$  — площадь, м<sup>2</sup>.

В принятой  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности базовый размер ячеек составляет 0,4 м со сгущением до размера 0,01 м ближе к стенкам поезда и поверхностям периферийных сооружений. При этом пограничный пристеночный слой полностью находится в пределах первого сеточного слоя от стенки.

В модели приняты следующие допущения:

- с целью снижения размерности задачи в моделях редуцирован ряд конструктивных элементов, не оказывающих существенного влияния на аэродинамические свойства объекта;
- нестационарный характер движения циркуляционных потоков учитывается через коэффициент трения воздушной среды и определяется как касательная сила трения, отнесенная к единице поверхности раздела слоев жидкости;
- вся расчетная область имеет постоянную температуру;
- конвекционные процессы и гравитация при этом оказывают пренебрежимо малое влияние;
- кузов, тележки вагона, элементы пути считаются абсолютно твердыми телами по сравнению с жесткостью рессор;
- колесные пары находятся в постоянном контакте с рельсами;
- рессорное подвешивание считается безынерционным ввиду малости масс.

### Результаты численного моделирования аэродинамических процессов

Результаты численного моделирования объемного вымещения направленно движущейся воздушной среды твердотельным объектом качественно подтверждены экспериментом, проведенным на масштабных моделях в научно-техническом центре строительства CSTB [13] (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

Имеют место определенные отличия. Эксперимент выполнен с неподвижным



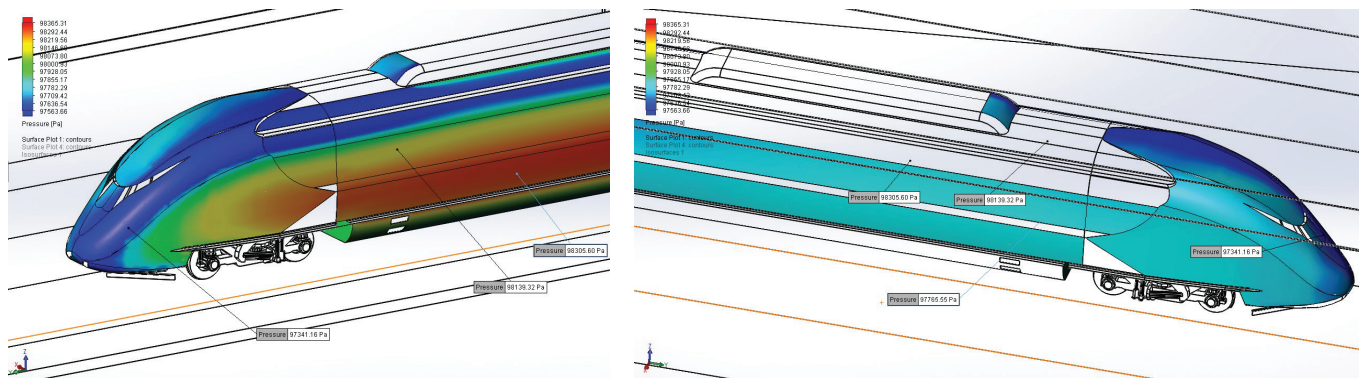


Рис. 3. Эпюра распределения давления на поверхности корпуса головного вагона (скорость движения состава 300 км/ч, боковой ветер – 32 м/с): слева – наветренная поверхность, справа – подветренная поверхность

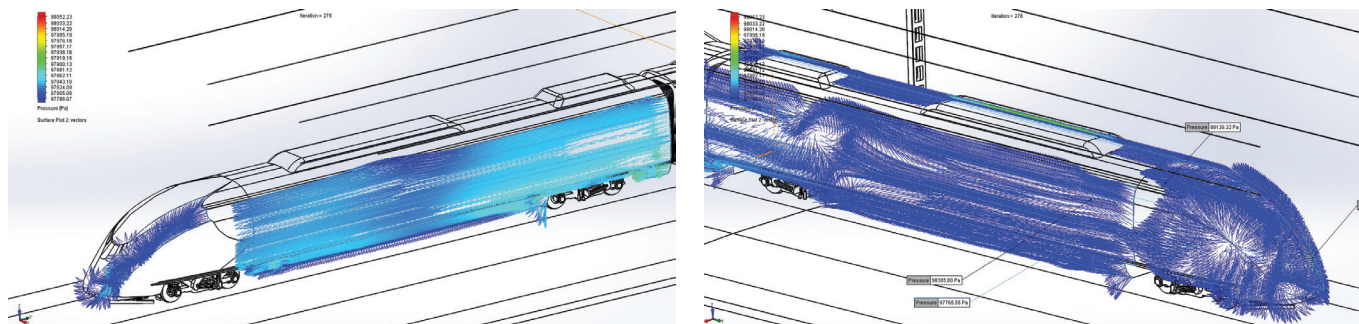


Рис. 4. Явление инерционного сноса суммарного потока воздушных масс вдоль поверхности корпуса вагона: слева – превалирование действия бокового ветра при скорости движения в пределах 200–300 км/ч; справа – снос эпицентра формирования срывных потоков в направлении хвостового вагона при скорости движения более 300 км/ч при боковом ветре 32 м/с

объектом, находящимся на уровне поверхности земли. Наличие свободного пространства под пролетным строением эстакады формирует особую конфигурацию аэродинамической тени, создаваемой корпусом подвижного состава и эстакады. В частности, с наветренной стороны воздушный поток разделяется на две части. Верхняя омывает крышевую и боковую поверхности корпуса, здесь преобладают зоны высоких скоростей, что способствует образованию области отрицательного давления. Вторая часть направлена в зону свободного пространства под пролетным строением эстакады (рис. 3). Нижняя часть боковой поверхности корпуса вагона и подвагонное пространство находятся в зоне резкой смены направления разделяющихся потоков воздушных масс, что вызывает снижение скорости и рост давления среды. При движении транспортного средства, например, по высокой насыпи, подвагонная область подвижного состава подвержена интенсивному воздействию ускоренно перемещающихся воздушных масс.

Усредненные значения давления воздушной среды на поверхность корпуса головного вагона с наветренной и подветренной сторон сведены в табл. 1.

Процесс омыwania суммарным потоком воздушных масс кузова вагона

создает на его поверхности характерную структуру срывных вихрей сложной конфигурации, представленную на рис. 4 векторами направлений движения воздушных масс.

Следует отметить устойчивую тенденцию смещения (сноса) по ходу движения поезда участков вихреобразования действия потока бокового ветра на радиусной части крышевой поверхности с повышением скоростного режима движения состава и роста интенсивности процесса с увеличением скорости бокового ветра.

Исследование распределения давления воздушной среды вдоль состава высокоскоростного поезда показывает, что при различной скорости движения и воздействии бокового ветра картина остается схожей в диапазоне до 300 км/ч. Однако при увеличении скорости возникают значительные колебания давления на наветренной стороне кузова, особенно в области первых нескольких вагонов состава.

Из табл. 1 следует, что максимально-му воздействию со стороны возмущенной воздушной среды подвержены крайние вагоны состава (причем воздействие усиливается в направлении хвостового вагона), а также усиление происходит с повышением скоростного режима

движения состава. С увеличением скорости бокового ветра более 27 м/с кратно растет число кластеров поверхности корпуса кузова, где давление воздушной среды превышает предельно допустимые значения давления ветровой нагрузки 0,5 кПа, установленные [14].

Образующаяся разница давлений возмущенной воздушной среды на наветренной и подветренной поверхностях кузова вагона вызывает опасный бортовой крен, что способствует потере устойчивости и повышает риск схода поезда с рельс.

## Моделирование двухмассовой динамической системы, находящейся под воздействием внешних силовых факторов возмущения гармонического характера

Конструкцию подвешивания ходового устройства поезда можно представить, как двухуровневую систему верхних и нижних вертикально установленных осцилляторов, соответственно определяющих жесткость первичного и вторичного подвешивания (1), а также горизонтально расположенных осцилляторов (2), определяющих поперечную жесткость подвески (рис. 5).

В качестве ограничения по критерию устойчивости вагона служит величина

отношения удерживающего момента к опрокидывающему [14] в пределах значения  $n = 1,25$ :

$$n = \frac{Q L_Q}{F_{H2} L_{H2} + F_{H1} L_{H1} + F_{V1} L_{FV1} + F_{V2} L_{FV2}} > 1,25.$$

В модели приняты следующие допущения:

- с целью снижения размерности задачи в моделях редуцирован ряд конструктивных элементов, не оказывающих существенного влияния на динамические свойства объекта;
- кузов, тележки вагона, элементы пути считаются абсолютно твердыми телами по сравнению с жесткостью ресурсор;
- рессорное подвешивание считается безынерционным ввиду малости масс;
- колебательная система считается двухмассовой (кузов — тележка), при этом колесные пары находятся в постоянном контакте с рельсами, а гребни обода одной из сторон колесных пар при движении прижаты к головке рельса;
- рассматривается режим свободных колебаний, образующихся под воздействием внешних силовых факторов возмущения пиковой нагрузки порыва ветра.

Кузов вагона подвержен воздействию однократной пиковой положительной ветровой нагрузки.

### Результаты численного моделирования динамики движения состава с учетом однократной пиковой положительной ветровой нагрузки на боковую поверхность

В результате проведенного исследования установлено, что конструкция при скорости движения состава 200 км/ч и скорости бокового ветра 12 м/с имеет максимальный размах углового отклонения  $0,076^\circ$  и возвращается в устойчивое состояние в течение 1,8 с. При скорости бокового ветра 36 м/с размах углового отклонения увеличивается до  $0,235^\circ$ . Возвращение в устойчивое состояние происходит в течение 2 с. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 и 36 м/с соответственно представлены в табл. 2.

Из полученных данных следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо при скорости воздушного потока 12 м/с не превышает предельного допустимого значения 10% от весовой номинальной нагрузки, тогда как при скорости воздушного потока 36 м/с минимальный

Таблица 2. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 и 36 м/с (процент распределения нагрузки на колесо)

| Рельс                                 | Нагрузка на колеса<br>передней тележки, кН |              | Нагрузка на колеса<br>задней тележки, кН |              |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|--------------|
| При скорости воздушного потока 12 м/с |                                            |              |                                          |              |
| Правый                                | 7,26 (11,6)                                | 8,03 (12,8)  | 7,65 (12,24)                             | 8,33 (13,32) |
| Левый                                 | 7,41 (11,8)                                | 7,68 (12,28) | 7,9 (12,64)                              | 8,28 (13,24) |
| При скорости воздушного потока 36 м/с |                                            |              |                                          |              |
| Правый                                | 10,57 (14,4)                               | 10,58 (14,4) | 8,08 (11)                                | 12,3 (16,75) |
| Левый                                 | 7,27 (9,9)                                 | 7,97 (10,85) | 8,13 (11)                                | 8,5 (11,5)   |

уровень нагрузки на ходовое колесо превышает предельно допустимое значение 10% от весовой номинальной нагрузки на передней тележке на левом колесе.

Результаты исследований показывают:

1. Наличие определенной корреляции уровня турбулентности возмущенной воздушной среды в коридоре движения железнодорожного транспортного средства и реакций в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней и задней тележек.

2. В пределах скоростного режима движения поезда 300 км/ч и боковом ветре не более 27 м/с колебательный процесс в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» имеет гармонический характер.

3. При увеличении скорости бокового ветра более 27 м/с и скоростном режиме движения поезда свыше 300 км/ч наблюдается постепенная смена режима колебательного процесса в контактных группах «колесо — рельс», в частности, появляются признаки низ-

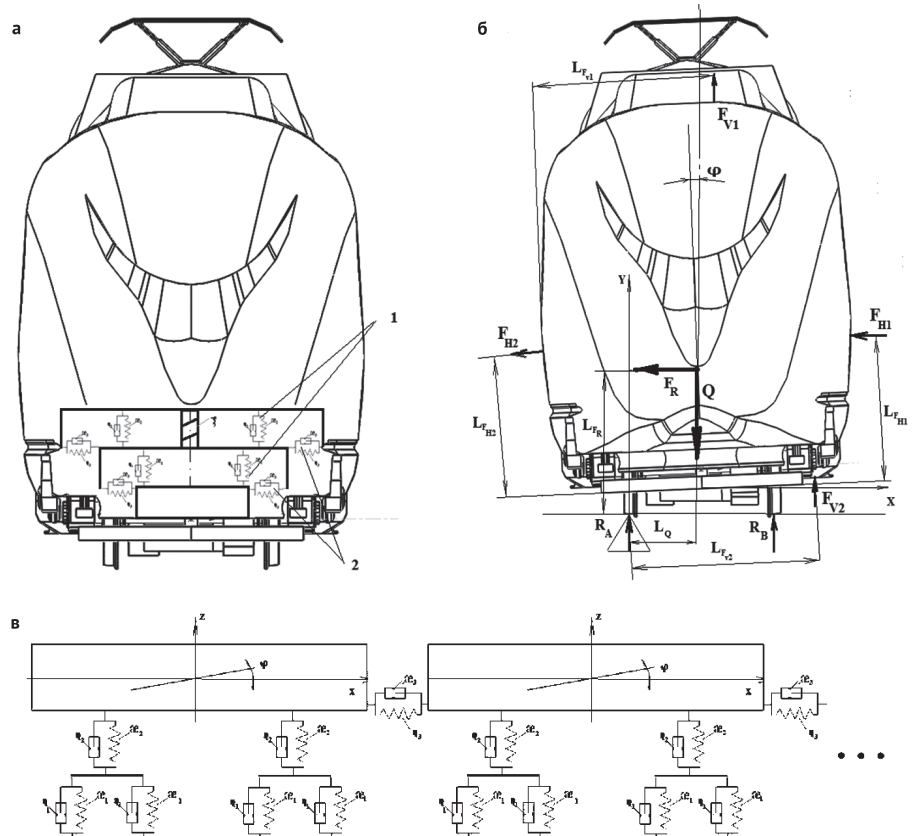


Рис. 5. Схема определения боковой устойчивости подвижного состава: а — моделирование конструкции подвешивания ходового устройства вагона; б — схема нагружения кузова вагона; в — схема упруго-демпфирующих связей многомассовой системы

$Q$  — сила тяжести;  $L_{r1}$  — расстояние до центра тяжести;  $F_R$  — сила ветра;  $F_{V1}$  — подъемная сила на крыше (1, 2 кластер (по табл. 2));  $F_{V2}$  — подъемная сила на днище (3 кластер (по табл. 2));  $F_{H1}$ ,  $F_{H2}$  — боковые силы ( $F_{V2}$  — 4, 5 кластер);  $L_{FV1}$ ,  $L_{FV2}$  — расстояние до точки приложения подъемной силы на крыше и днище;  $L_{FH1}$ ,  $L_{FH2}$  — расстояния до точки приложения боковых сил;  $L_Q$  — расстояние до точки приложения силы тяжести

кочастотной неустойчивости, что связано с резко возросшей турбулентностью формирующихся срывных потоков воздушной среды на кузове вагона.

4. Поскольку элементы многомассового объекта имеют упругоподатливые связи между собой, и значения поперечных нагрузок различны по длине состава (табл. 1), значение углового крена вагонов в районе хвоста поезда будет отличаться от остальных, что приведет к взаимовлиянию сопряженных элементов друг на друга, и усложнит колебательный процесс в контактных группах «колесо — рельс». 

**Источники**

1. Александрова Н. Б., Писарева И. Н., Потапов П. Р. Обеспечение безопасности движения поездов: учеб. пособие. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2016. 148 с.
2. Аэродинамика скоростных поездов: почему ветер не мешает TGV. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/10632-protiv-vetra-aerodinamika/> (дата обращения: 04.08.2024).
3. Управление аэроупругим взаимодействием подвижного состава с элементами искусственных сооружений тоннельного типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук.

СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. 17 с.

4. Технические спецификации интероперабельности (TSI). URL: [https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability\\_en](https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability_en) (дата обращения: 04.08.2024).
5. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза от 15.07.11 с изм. на 09.12.11 (ТР ТС 002/2011). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293437> (дата обращения: 01.10.2015).
6. Сидорова Е. А., Певзнер В. О., Чечельницкий А. И. Показатели силового взаимодействия пути и подвижного состава при движении грузового вагона по длинным неровностям с учетом действия продольных сил // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 6. С. 359–365.
7. Воробьев А. А., Каримов Д. Д., Сотников К. А., Богданов Н. В. Управление аэродинамическим взаимодействием высокоскоростного поезда с элементами искусственных сооружений тоннельного типа // Транспорт Российской Федерации. 2024. № 1 (110). С. 62–68.
8. Котуранов В. А. Обоснование показателей, характеризующих новаторность конструкций поглощающих

аппаратов автосцепки в условиях маневровых соударений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУПС (МИИТ), 2014. 181 с.

9. Сладкова Л. А., Неклюдов А. Н. Динамика подвижного состава и выбор параметров гасителей колебаний // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 4 (95). С. 13–20. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-2.
10. Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Воробьев А. А., Сотников К. А. Цифровое моделирование аэроупругого взаимодействия подвижного состава с порталными сооружениями перевальных тоннелей // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 104–123. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-104-123.
11. Yu M., Jiang R., Zhang Q., Zhang J. Cross-wind Stability Evaluation of High-Speed Train Using Diferent Wind Models // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2019. Pp. 32–40. DOI: 10.1186/s10033-019-0353-7.
12. NUCARS. URL: <http://www.aar.com/nucars/> (дата обращения: 04.08.2024).
13. Centre Scientifique et Technique du Batiment TGV. URL: <https://cstb.ha.lscience/> (дата обращения: 04.08.2024).
14. Научно-исследовательский центр «Аэротехника». URL: <https://www.aero-tehnika.ru/index.php> (дата обращения: 04.08.2024).



Общероссийская общественная организация  
**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА**

Основные сферы:

