Взаимодействие высокоскоростного поезда с воздушной средой вблизи объектов инфраструктуры

Б. О. Поляков,
инженер
АО «НВЦ ВАГОНЫ»

Е. Я. Ватулина,
студентка 5-го курса Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

Перспективы развития рельсового транспорта связаны с возможностью значительного увеличения скорости движения (до 300–500 км/ч) для обеспечения конкуренции с воздушным и автомобильным транспортом. Увеличение скорости может быть ограничено аэродинамическим воздействием подвижного состава на объекты инфраструктуры и находящихся вблизи магистрали пассажиров.

Аэродинамическое воздействие, генерируемое высокоскоростным подвижным составом, может создавать реальную угрозу безопасности пассажиров, способствовать усталостному разрушению конструкций, находящихся в зоне интенсивного изменения градиента давления воздушной среды. Опасность представляет не только механическое воздействие вихревого воздушного потока на человека, но и метательное воздействие относительно легких элементов (веток деревьев, элементов насыпи пути), которые могут двигаться в потоке с большой скоростью и приобретать значительную кинетическую энергию. Кроме того, существующие габариты перестанут отвечать требованиям безопасности **[1]**. Турбулентные потоки со значительным градиентом положительного и отрицательного давления, формирующиеся при высокоскоростном движении поезда, представляют опасность и для расположенных вблизи магистрали строительных конструкций: в результате таких колебаний различные элементы объектов могут войти в резонанс с собственными колебаниями, потерять прочность и устойчивость **[2]**.

Аэродинамика на высокоскоростной магистрали

Из анализа мирового опыта проектирования и применения высокоскоростного движения поездов следует, что специалисты стран Евросоюза, а также ряда стран азиатского региона (например, Китайской Народной Республики) включают аэродинамические воздействия в основные сочетания нагрузок на объекты железнодорожной инфраструктурных **[3]**. В России исследованиями аэродинамических характеристик подвижного состава традиционно занимался ВНИИЖТ **[4]**. Кроме того, ВНИИЖТ выполнил натурные исследования аэродинамического воздействия высокоскоростного поезда на различные объекты **[5]**.

Натурные испытания не всегда возможны, причем не только по экономическим соображениям. В определенных ситуациях, например, в проектных работах, когда натурных объектов нет, применяется физическое моделирование. В таких случаях динамика течения воздушных масс вблизи объекта наблюдения исследуется в специальных устройствах – аэродинамических трубах, где реализуются заданные характеристики аэродинамического нагружения **[6]**. Однако для оценки особенностей взаимодействия высокоскоростного поезда с воздушной средой вблизи объектов инфраструктуры применение аэродинамической трубы оказывается неэффективным, так как объектом, генерирующим воздушный поток, должен быть состав.

Особенности взаимодействия высокоскоростного поезда с воздушной средой вблизи объектов инфраструктуры железных дорог исследовались с помощью численного математического моделирования в среде Flow Simulation. В исследовании решались следующие задачи:

• разработать расчетную модель для исследования аэродинамического влияния на высокоскоростной подвижной состав при его движении, а также на

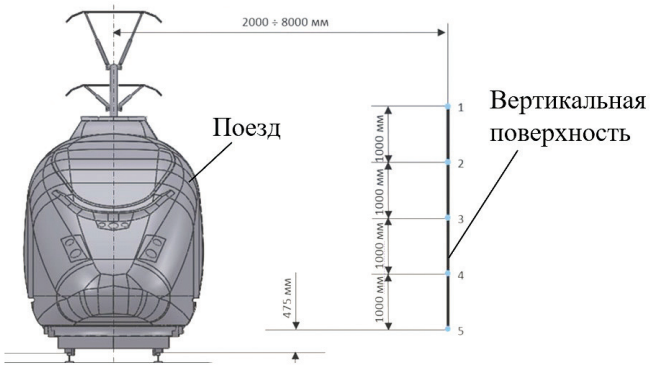

Рис. 1. Расчетная схема поезда с расставленными на вертикальной поверхности индикаторными линиями 1 – 5

элементы инфраструктуры вблизи магистрали;

• определить аэродинамическое воздействие от проходящего состава на плоскую вертикальную поверхность, расположенную параллельно оси пути;

• определить аэродинамическое воздействие проходящего состава на мачту поддержки контактного провода, путепровода, моста ферменной конструкции.

В качестве объекта исследования принят состав из четырех корпусных элементов с геометрией вагонов поезда «Сапсан» (VELARO RUS), движущийся в непосредственной близости от конструкций ферменного моста, сплошностенчатого моста балочной конструкции, подвеса контактного провода.

Воздействие воздушной среды на высокоскоростной поезд вблизи объектов инфраструктуры

Исследования взаимодействия проводились вблизи следующих объектов: мачты контактного провода, путепровода, моста ферменной конструкции.

Такие элементы инфраструктуры, как мачта контактного провода или балка моста ферменной конструкции, могут быть охарактеризованы как плохообтекаемые объекты, создающие высокое сопротивление набегающему потоку воздушной среды **[7]**.

Используемые программные средства

В основу математической модели анализа аэродинамических процессов положена система уравнений Навье – Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии среды.

Вычислительное ядро технологии моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости представляет собой особый алгоритм дискретизации уравнения конвекции-диффузии в трехмерном пространстве **[8]**. Он реализован в функционале Flow Simulation системы SolidWorks, который основан на численном решении трехмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики жидкости и газа, включающих в себя законы сохранения массы, импульса, уравнения состояния.

Flow Simulation использует конечно-объемный подход для аппроксимации уравнений математической модели. Уравнения Навье – Стокса решаются методом расщепления по физическим процессам (проекционным методом MAC).

Расчетные модели

При движении высокоскоростного состава вблизи поверхности кузова вследствие вытеснения и уплотнения воздушной среды непосредственно у состава формируются знакопеременные зоны повышенного и пониженного давления и плотности **[10]**.

Механическое воздействие воздушного импульса реализуется за счет постепенного расширения ускоренно уплотненной области воздушной среды, образующейся в районе головного обтекателя состава, а также инерционного наддува воздушных масс, увлеченных движением поезда.

На *рис. 1* указаны индикаторные линии, идущие вдоль состава, на которых определяются значения давлений поперек и вдоль оси пути.

Величины давлений на вертикальную плоскость в зависимости от расстояния до вертикальной плоскости (поперек оси пути), от характерных точек импульса (вдоль оси пути) и номера линии индикации по вертикали плоскости сведены в *табл. 1*.

С целью организации движения потоков воздушных масс непосредственно от движущегося объекта реализуется повторное применение принципа относительности, т. е. выполняется реверс направлений потоков прямого направления из предыдущей задачи таким образом, чтобы давление на индикаторную плоскость (мишень) осталось прежним. Это достигается регулировкой распределения интенсивности отраженных потоков среды.

Верификация расчетной модели

Степень адекватности разработанных численных моделей оценивается по данным, приведенным в методике определения аэродинамического воздействия Еврокод-1 (EN 1991-1-6:2005, IDT) **[10]**. На *рис. 2* представлены результаты расчета давления на вертикальную поверхность, параллельную оси пути, при проходе высокоскоростного поезда.

Отклонения расчетных данных в большую сторону на расстоянии 7–9 м

Таблица 1. Избыточное давление в характеристических точках (дистанция от передней кромки головного обтекателя по ходу движения) для головного обтекателя (дистанция 2 м), Па

№ линии индикации	Характеристические точки									
	1		2		3		4		5	
	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па	X, м	P, Па
1	4	740	6	790	8	181	12	–1351	25	–26
2	2	741	6	1236	8	138	11	–2166	25	–11
3	2	875	6	1680	8	–138	10	–2506	25	0,66
4	2	1006	6	1895	8	333	8,5	–2431	25	–10
5	1	816	5	1903	7	151	8,5	–2073	25	–15

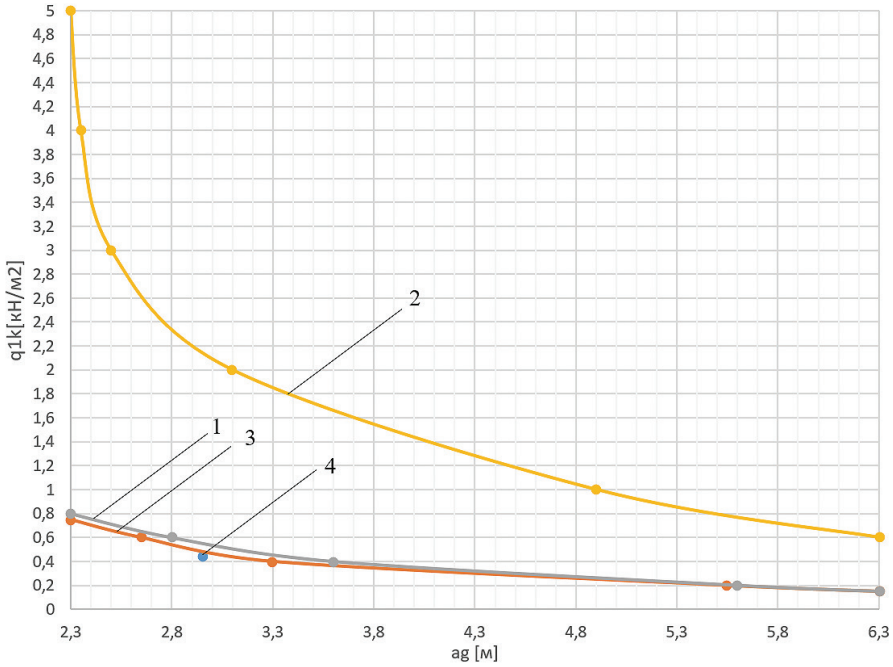

Рис. 2. Давление от проходящего поезда на плоскую стенку, параллельную оси пути, в зависимости от расстояния до нее: 1, 2 – расчетные значения давлений при скорости 200 (1) и 400 (2) км/ч по используемой модели; 3 – давление на стенку при скорости 200 км/ч по данным документа ЕВРОКОД-1; 4 – экспериментальные значения давлений на стенку при скорости 200 км/ч по данным ВНИИЖТ

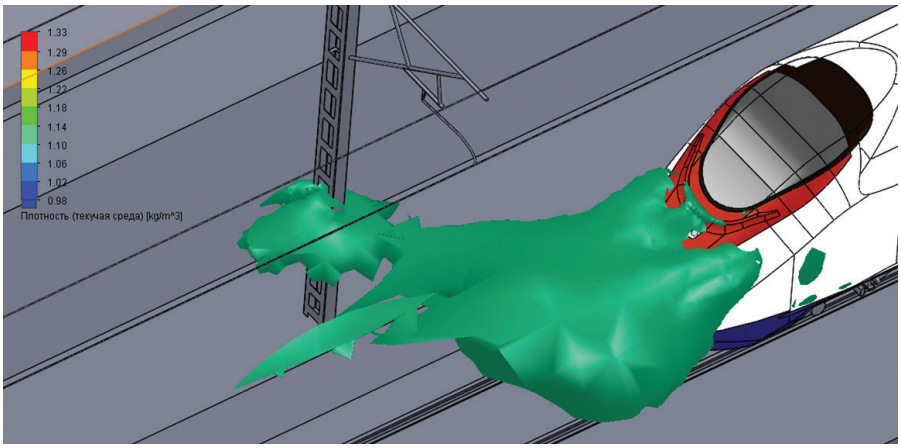

Рис. 3. Объемная эпюра плотности воздушного потока на участке установки стойки опоры контактной сети

от верха состава — около 0,6 кПа, что составляет 13 % от допустимого максимума, полученного по расчету **[10]**. При сравнении с экспериментальными данными ВНИИЖТ **[5]** установлено расхождение 11 %.

Результаты расчетов

С помощью численного эксперимента установлена качественная картина аэроупругого нагружения несущих металлоконструкций стойки опоры контактной сети. Конфигурация объемной эпюры плотности потока показывает, что основное аэроупругое воздействие осуществляется на нижнюю — опорную часть металлоконструкции устройства (*рис. 3*).

При моделировании аэроупругого взаимодействия высокоскоростного состава с ферменной конструкцией обнаружены сложные явления формирования потоков воздушной среды во внутреннем стесненном пространстве между поверхностью состава и элементами металлоконструкции. Механическое воздействие этих воздушных потоков на конструкцию представляют серьезную опасность для надежности и долговечности элементов, а также для пребывания человека на этих конструкциях. Результаты моделирования представлены на *рис. 4*.

При входе поезда в пространство ферменного моста максимальный перепад давления 1989 Па был обнаружен на подкосе моста, в средней части моста максимальный перепад давлений достиг 3098 Па.

Аэроупругое воздействие высокоскоростного состава на строения, расположенные непосредственно над путями, в значительной степени определяется аэродинамическими свойствами строения, его пространственной ориентацией относительно коридора движения поезда (*рис. 5*).

Интенсивные турбулентные образования проявляются в нише межбалочного пространства в результате резкой остановки части ускоренно движущихся воздушных масс под воздействием поршневого эффекта обтекателя. Основной поток ускоренно движущихся воздушных масс отражается от нижней поверхности балки и продолжает движение в направлении, параллельном плоскости пролетного строения. Скорость потока за пределами пролетного строения ускоренно снижается.

Интенсивный подсос воздуха осуществляется из пространства над подвижным составом по параболической траектории через подвагонное пространство к головному обтекателю. Зона разрежения образуется также в нижней части обтекателя — в районе установки спойлера и ниши ходовой тележки.

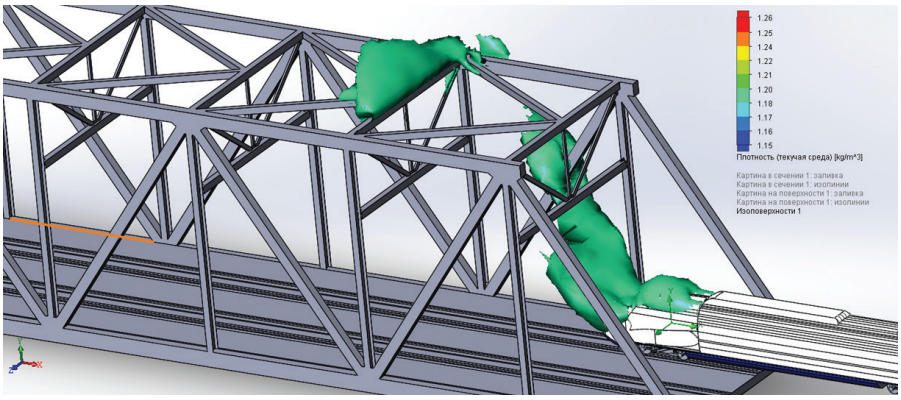

Рис. 4. Эпюра изоповерхности распределения плотности воздушного потока на ферменной конструкции от высокоскоростного подвижного состава

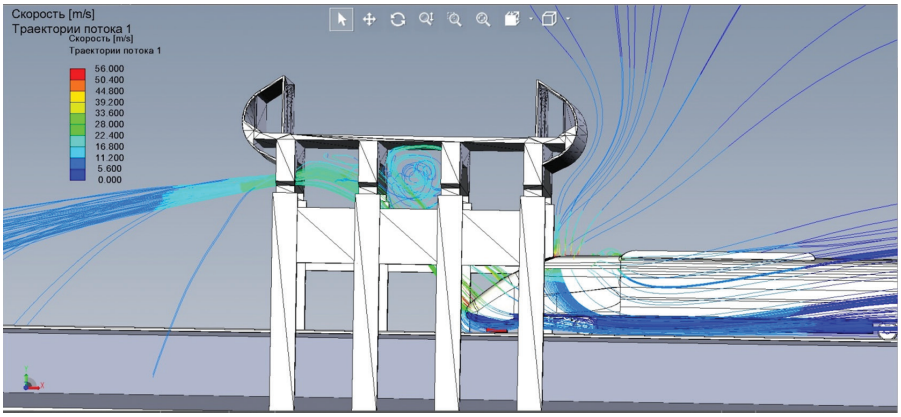

Рис. 5. Эпюра траекторий распределения скорости воздушных потоков от высокоскоростного состава

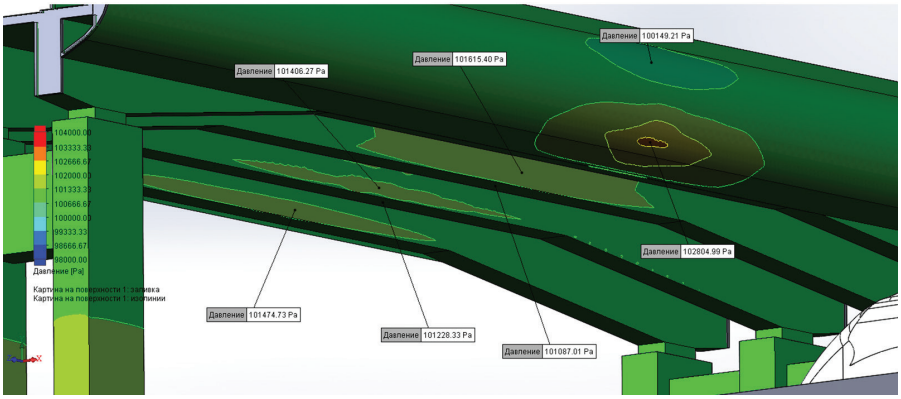

Рис. 6. Распределение давления на поверхностях балок путепровода

Анализ эпюр нагружения позволяет обобщить тип воздействия воздушного потока на несущие элементы металлоконструкции в виде кратковременной распределенной нагрузки со следом контакта сложной конфигурации (*рис. 6*).

Результаты нагружения представлены в *табл. 2*.

В результате исследований установлено, что течение воздушного потока при прохождении высокоскоростного состава под путепроводом имеет сходство с движением газа на конфузор-диффузорном участке трубопровода, где выполняются следующие условия: рост скорости и значений динамического давления газа в направлении движения при одновременном снижении статического давления – в конфузоре и обратное явление на выходе – в диффузоре.

Заключение

Разработана математическая модель взаимодействия высокоскоростного электропоезда с воздушной средой вблизи элементов инфраструктуры железных дорог на базе программного комплекса SolidWorks с использованием специализированного модуля Flow Simulation, позволяющего оценить давление и силы, действующие на такие элементы инфраструктуры, как опорная мачта контактной сети, мост ферменной конструкции, путепровод.

Таблица 2. Результаты моделирования аэроупругого взаимодействия высокоскоростного состава с ферменной конструкцией

Местоположение головного обтекателя относительно габарита путепровода	Локализация следа аэроупругого воздействия воздушной волны	Давление на поверхности элемента конструкции, Па
6 м до габарита путепровода	Верхняя / нижняя часть элемента А	1479/–1176
2-я балка пролетного строения	Нижняя поверхность балки	810
	Боковая поверхность балки	149
	Межбалочная ниша	1675/–2380

Выполнена верификация математической модели путем сравнения результатов расчета по индикаторным линиям с данными методики ЕС «ЕВРОКОД». Показано, что расхождение не превышает 13%.

При движении высокоскоростного состава установлены особенности поведения воздушного потока:

- на мосту ферменной конструкции при одиночном движении;
- под путепроводом;
- вблизи опоры контактной сети.

Полученные значения давлений на сооружения сравнимы с нормативами ветровых нагрузок **[2]**. Если их использовать при проектировании высокоскоростных линий, то скорость рельсового транспорта может превысить значение 400 км/ч.

Литература

1. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений.
2. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия 6. Ветровые нагрузки.
3. Recent development of bridge aerodynamics in China // J. Wind Eng. Industr. Aerodynamics. 2008. № 96. С. 736–768.
4. Астахов П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава. М.: Транспорт, 1966. С. 87.
5. Лазаренко Ю. М., Капускин А. Н. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении // Вестн. ВНИИЖТА. 2012. № 4. С. 11–14.
6. RM BridgeProfessional – расчет, проектирование и строительство мостов (по материалам компании BentleySystems) // Рациональное управление предприятием. 2011. № 6. С. 26–30.
7. Казакевич М. Н. Аэродинамика мостов. М.: Транспорт, 1987. С. 240.
8. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks: учеб. пособие. М.: ДМК Пресс, 2010. С. 783.
9. Чурков Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда: принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной сферы на железнодорожный поезд. Желдориздат, 2007. 332 с.
10. НСР ЕН 1991-2-2011. ЕВРОКОД 1: Воздействия на сооружения. Ч. 2: Транспортные нагрузки на мосты (1-я ред.).