

Оптимизация аэродинамики высокоскоростных поездов

Рост цен на энергоносители и необходимость сокращения эмиссии диоксида углерода создают дополнительные стимулы для совершенствования аэродинамических характеристик и повышения энергетической эффективности подвижного состава железнодорожного транспорта. Первоочередные задачи в этом направлении — уменьшение аэродинамического сопротивления и обеспечение устойчивости поездов к воздействию бокового ветра при движении со скоростью более 300 км/ч.

Достижение оптимальных аэродинамических показателей является одной из основных задач при создании высокоскоростного подвижного состава. Разработка специалистами компании Bombardier электропоезда Zefiro 380 стала важным этапом в области исследования и оптимизации аэродинамики высокоскоростного подвижного состава.

Аэродинамическим характеристикам тягового подвижного состава начали уделять внимание еще в 1920–1930-е годы. При относительно малой мощности эксплуатирувавшихся тогда паровозов предполагалось, что более высокую скорость можно реализовать только за счет придания локомотивам

обтекаемой формы. Примером могут послужить два паровоза, построенные заводом компании Borsig в Берлине в 1935 г. для железных дорог Германии и рассчитанные на скорость 175 км/ч (рис. 1); один из них 11 мая 1936 г. достиг скорости 200,4 км/ч.

Развитие в XX в. электрической тяги привело к существенному увеличению тяговой мощности, вследствие чего значение аэродинамических качеств уменьшилось, и при этом рост мощности локомотивов сопровождался несколько пренебрежительным отношением к их дизайну.

Лишь с появлением высокоскоростных поездов семейства Синкансен (Япония), а позднее — TGV (Франция) и ICE (Германия) аэродинамике подвижного состава железных дорог вновь стали уделять внимание как важной области исследований. Аэродинамические характеристики были признаны одним из наиболее значимых факторов при разработке компанией Bombardier семейства высокоскоростных электропоездов Zefiro (рис. 2).

Создание поезда Zefiro 380 потребовало решения задачи повыше-

ния аэродинамической эффективности с целью снижения энергопотребления и обеспечения устойчивости к воздействию бокового ветра.

Требования TSI

В Европе основные требования к аэродинамическим характеристикам, обеспечивающим безопасную эксплуатацию высокоскоростных поездов, изложены в Технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI) и охватывают ряд факторов, в частности:

- устойчивость к воздействию бокового ветра и снижению риска схода с рельсов при определенных климатических условиях на специфических участках пути, например на мостах и насыпях;
- защита персонала, занятого в работах на линии, и пассажиров на платформах при прохождении высокоскоростных поездов, создающих эффект спутной струи. Для уменьшения опасности затягивания людей необходимо ограничить максимальную скорость воздушного потока;
- смягчение нагрузки от воздействия перепадов давления на открытых участках и в тоннелях;
- ограничение вероятности выброса балласта при высокой скорости движения поездов;
- смягчение проблемы образования волн микродавления в случае возникновения звукового удара у выходного портала тоннеля при входе поезда с высокой скоростью в тоннель с противоположной стороны.

Вследствие нелинейной природы аэродинамических процессов для достижения оптимальных характеристик конструкцию подвижного состава и параметры инфраструктуры следует рассматривать совместно. Применительно к аэродинамическим показателям технико-эксплуатационная совместимость означает, что теоретически при любых



Рис. 1. Паровоз серии 05 компании Borsig с оптимизированной с точки зрения аэродинамики формой (фото 1936 г.)

вариантах конструкции подвижного состава и параметров инфраструктуры, соответствующих критериям TSI, система рельсового транспорта должна функционировать оптимальным образом с точки зрения как затрат, так и обеспечения безопасности и охраны здоровья людей.

Следует отметить, что выполненные требования безопасности, например в части устойчивости к воздействию бокового ветра, предполагает, что статистическая вероятность схода с рельсов при определенных условиях должна быть ниже установленного уровня. Это, однако, не означает, что поезд, не соответствующий этим требованиям, обязательно будет опрокинут под действием ветра, а поезд, соответствующий им, непременно устоит.

Функциональные требования

Технические требования заказчика обычно содержат некоторые специфические функциональные условия. Например, по желанию заказчика с целью снижения затрат энергии может быть разработана определенная конструкция, минимизирующая аэродинамическое сопротивление. Другим важным требованием может стать обеспечение функционирования всего оборудования для охлаждения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха при движении поезда с высокой скоростью и определенных ветровых условиях.

Первым шагом при разработке поезда Zefiro стало проведение сравнительной оценки всех известных концепций высокоскоростных поездов и выбор на ее основе определенных технических решений. Это касалось, в частности, целесообразности использования узлов сочленения, тележек традиционного типа или одиночных колесных пар, а также рассмотрения преимуществ и недостатков стальных и алюминиевых кузовов.

К числу критериев для принятия решения относились также размер доступной площади для размещения пассажирских кресел на единицу длины поезда, удельное аэродинамическое сопротивление на одного пассажира при полной загрузке поезда, осевая нагрузка и распределение масс. Затем была выполнена оценка потенциала соответствия каждой концепции различным, а в некоторых случаях — противоречивым требованиям, включая плавность хода, тепловой комфорт, акустические показатели и энергопотребление.

Постановка задачи

Подбор аэродинамических характеристик будущего поезда должен был обеспечить минимальное потребление энергии на одного пассажира и максимальную скорость при наименьшей возможной мощности тягового привода.

На рис. 3 представлено соотношение между потребной мощностью на тягу и коэффициентом аэродинамического сопротивления при максимальной скорости, равной 420 км/ч. Видно, что потребность в мощности, а следовательно, установленная мощность тягового подвижного состава может быть снижена, если аэродинамическое сопротивление будет меньше. Потребная мощность на тягу в зависимости от аэродинамического сопротивления рассчитывается с помощью достаточно простой формулы.

Показанное соотношение свидетельствует о возможности уменьшения стоимости подвижного состава за счет улучшения его аэродинамики. Затраты на совершенствование аэродинамических характеристик могут быть компенсированы снижением эксплуатационных расходов вследствие уменьшения потребления электроэнергии на тягу.

Подобное исследование было выполнено и в отношении массы. За основу при этом был принят принцип, согласно которому любое



Рис. 2. Дизайн-проект поезда Zefiro 380 (источник: Bombardier)

увеличение массы вследствие реализации какого-либо мероприятия, способствующего улучшению аэродинамических характеристик, должно компенсироваться снижением массы применяемого тягового оборудования. Данный принцип применялся на стадиях разработки концепции и проектирования поезда.

При поиске путей радикального совершенствования аэродинамических характеристик высокоскоростного поезда прежде всего необходимо выявить факторы, которые могли бы вызвать их ухудшение. На рис. 4 показано влияние параметров отдельных конструктивных элементов на аэродинамические показатели региональных и высокоскоростных поездов.

Безусловно, реальные значения аэродинамического сопротивления вследствие тех или иных факторов для различных поездов будут различаться. В то же время из рис. 4 видно, что для обычного электро- или дизель-поезда, имеющего выступающие части, например

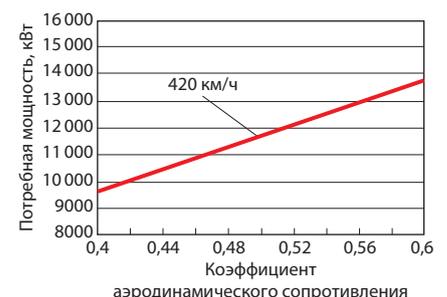


Рис. 3. Зависимость потребной мощности на тягу от коэффициента аэродинамического сопротивления

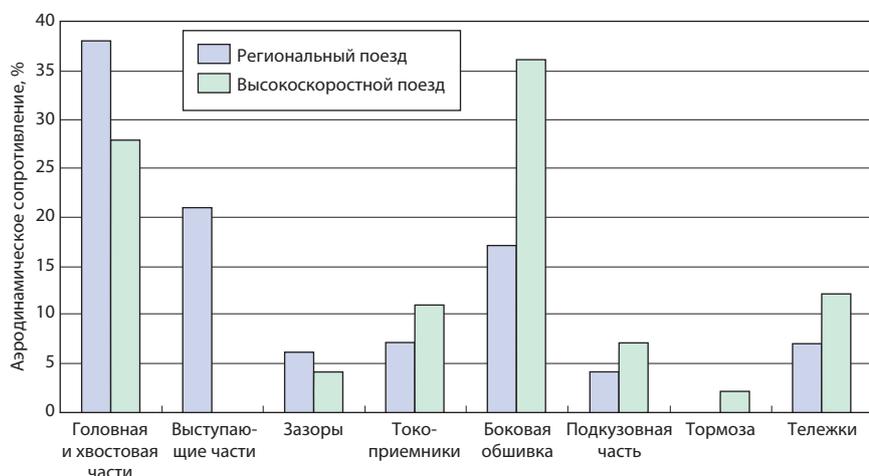


Рис. 4. Влияние параметров отдельных конструктивных элементов региональных и высокоскоростных поездов на величину аэродинамического сопротивления

кондиционеры, трансформаторы или иное оборудование, такие элементы конструкции становятся основным источником увеличения аэродинамического сопротивления, тогда как высокоскоростные поезда, как правило, имеют кузова обтекаемой формы без выступающих частей, а оборудование закрыто кожухами или иным способом.

Конфигурация поперечного сечения кузова и элементов конструкции, расположенных перпендикулярно направлению воздушного потока, — стенок, крыши и пола определяет относительную важность бокового сопротивления (сопротивления обшивки). Так, для высокоскоростного поезда длиной 200 м именно оно является основным фактором при оценке аэродинамического сопротивления. В то же время для четырехвагонного регионального поезда наибольшее влияние оказывает сопротивление головной и хвостовой частей, а также сопротивление, создаваемое расположенным на крыше и не закрытым кожухами оборудованием.

Следующий шаг после определения основных источников аэродинамического сопротивления — оценка потенциала совершенствования для каждого из выявленных компонентов. Только тогда возможно улучшение характеристик поезда в целом.

Методы бионики

Относительно новая наука — бионика занимается поиском в природе источников идей, которые могут быть использованы при создании технических средств. Методы бионики помогли в поиске путей снижения аэродинамического сопротивления автомобилей и самолетов. Однако в некоторых случаях найти прямой аналог в природе невозможно. Так, не существует живого существа, которое летает или плавает с большой скоростью в обоих направлениях точно таким же образом, как движется высокоскоростной поезд.

Экспертам Bombardier по аэродинамике удалось решить проблему, используя те же средства, что и в природе, — репродукцию, мутацию и селекцию, и с их помощью создать конструкцию поезда Zefiro, который представляет собой новый этап развития высокоскоростного подвижного состава, отличающегося малым аэродинамическим сопротивлением и в то же время значительной устойчивостью к воздействию бокового ветра.

Для решения поставленных задач использовались современные методы оптимизации. Известно и документально подтверждено значительное число частных примеров оптимизации (с применением расчетной

динамики жидкой среды). Однако в данном случае было необходимо включение в цепочку оптимизационных расчетов всех элементов конструкции высокоскоростного поезда. В данной работе учтены эргономические требования к интеграции кабины управления в конструкцию кузова и условия видимости сигналов из кабины, требования к прочности кузова при аварии, а также предупреждение влияния тележек, что накладывало ограничения на возможные варианты конструкции вырезов кузова в местах расположения тележек и надтележечных кожухов.

Разработка конструкции

Компании Bombardier удалось реализовать новый инженерный подход к оптимизации аэродинамических свойств поезда Zefiro 380. Так, при проектировании головной части поезда использовались методы нескольких научно-технических дисциплин, что позволило получить ясную картину, отражающую ряд ограничений и различных взаимозависимых требований, включая прочность при крушении, компоновку кабины машиниста, обеспечение резервного пространства как для сидящего машиниста, так и для персонала, работающего стоя, видимость сигналов из кабины, параметры сцепных приборов и габаритные характеристики.

Эти и другие взаимосвязанные факторы были учтены при создании модели САПР. Данная модель включала не только набор параметров с фиксированными значениями для различных компонентов, но и математические соотношения между ними с учетом специфической конструкции, выбранной для определенной подсистемы, например концепции прочности в случае крушения или кинематики сцепных приборов. Это позволило гарантировать максимальную возможную свободу в отношении выбранных аэродинамических параметров в процессе оптимизации.

Методология

Оптимальная с точки зрения аэродинамики форма кузова определялась с применением современных средств автоматизированного проектирования, в частности программного обеспечения Catia V5 и ряда достаточно сложных алгоритмов. При использовании алгоритма многоцелевой оптимизации новая конструкция создавалась методом смены поколений. Каждая конструкция — представитель нового поколения — отличалась от своих непосредственных предшественников, видоизменяясь и частично пересекаясь с ними по некоторым параметрам. Когда было очевидно, что конструкция следующего поколения обладала улучшенными качествами в отношении аэродинамического сопротивления и устойчивости к боковому ветру, она сменяла своего предшественника, подобно тому как это происходит в природе в процессе естественного отбора.

Модель для САПР, включающая большое количество геометрических вариаций и ограничений, была создана на основе поперечного сечения поезда, оптимизированного в отношении устойчивости к воздействию бокового ветра.

Из большого количества конструктивных параметров для рассмотрения с применением модели Catia V5 были выбраны только 15, относящихся к разным вариантам конфигурации перехода от лобовой части к крыше, уплощения передней части и формы подкузовной части концевых вагонов. Именно эти параметры являются определяющими и наиболее важными для оптимизации. В итоге удалось выбрать самый лучший вариант.

Результаты

До начала многоцелевой оптимизации для оценки потенциала совершенствования и проверки возможных корреляций были исследованы

и по отдельности оптимизированы два параметра — аэродинамическое сопротивление и устойчивость к воздействию бокового ветра.

Применение алгоритма для некоторого произвольно выбранного начального набора вариантов конструкции позволило достичь значительного снижения аэродинамического сопротивления после 130 итераций. Затем, хотя алгоритм еще не был полностью реализован, его выполнение было приостановлено для контроля единства подхода. После осуществления еще 100 итераций было достигнуто снижение аэродинамического сопротивления примерно на 25% по сравнению с наименее эффективным вариантом конструкции.

Оптимизация показателей устойчивости к боковому ветру была начата после анализа результатов оптимизации аэродинамического сопротивления. Ожидалось, что при оптимизации характеристик аэродинамического сопротивления показатели устойчивости к боковому ветру могли ухудшиться, и это предположение подтвердилось.

Сравнение вариантов конструкции, обеспечивающих достижение лучших результатов с точки зрения аэродинамического сопротивления и устойчивости к боковому ветру, позволило сделать вывод, что эти две цели не коррелируют между собой. Благоприятные характеристики поезда в отношении аэродинамического сопротивления не означают оптимального его поведения в отношении устойчивости к боковому ветру и наоборот.

В связи с этим и была применена многоцелевая оптимизация. Первоначально это привело к увеличению в 2 раза объема расчетной работы и к значительному росту числа итераций. К тому же многоцелевая оптимизация дает не единственный результат, а несколько Парето-оптимальных вариантов решения.

Для обеспечения благоприятных начальных условий были

выбраны восемь вариантов конструкции, оптимальных с точки зрения аэродинамического сопротивления и устойчивости к воздействию бокового ветра. Параллельное выполнение моделирования по критериям аэродинамического сопротивления и бокового ветра заняло около 7 ч при использовании семи центральных процессоров на одну итерацию.

Оптимизация завершилась после 173 итераций, в результате чего были получены пять Парето-оптимальных вариантов конструкции. В общей сложности многоцелевая оптимизация заняла 8477 машиночасов при использовании группы процессоров с тактовой частотой 1,4 ГГц, не считая времени оценки реакции. Последующий выбор лучшего окончательного варианта конструкции следовало сделать с учетом относительной важности двух указанных выше факторов. По соображениям эффективности оптимизация была выполнена с относительно грубым шагом, поэтому было необходимо проведение дальнейшего изучения надежности результатов.

Аэроакустические факторы

При выборе окончательного варианта конструкции концевых частей поезда специалисты компании Bombardier могли воспользоваться опытом промышленных дизайнеров, чтобы улучшить аэроакустические характеристики поезда, а также обеспечить единый стиль его внешнего вида. Для оценки аэроакустических характеристик потребовалось моделирование переходных процессов. В частности, были получены акустические спектры для двух различных вариантов конструкции надтележного кожуха в сравнении с конструкцией аналогичного узла высокоскоростного электропоезда ICE 3 (Германия).

Для лучшей интерпретации результатов, полученных для поезда

Zefiro 380, параллельно проводилось моделирование для сопоставимого высокоскоростного поезда. Некоторые параметры модели после оптимизации были незначительно изменены с целью улучшения аэроакустических характеристик. Осуществлялся мониторинг всех изменений с точки зрения характеристик аэродинамического сопротивления и устойчивости к боковому ветру. В конечном итоге процесс итерации позволил добиться результата, который был несколько лучше, чем полученный после компьютерной оптимизации. При этом были достигнуты высокие показатели с точки зрения аэродинамики, аэроакустики и устойчивости к воздействию бокового ветра.

По сравнению со сравниваемым высокоскоростным поездом аэродинамическое сопротивление поезда Zefiro 380 ниже на 20%, что довольно много, если учесть, что Zefiro 380 имеет значительно большую высоту и ширину кузова.

Энергопотребление

Для количественной оценки влияния аэродинамических характеристик на потребление энергии было выполнено моделирование поездки по еще не введенной в



Рис. 5. Дизайн-проект поезда Regio 2N (источник: Bombardier)

то время в регулярную эксплуатацию новой высокоскоростной линии Пекин — Шанхай (открыта 30 июня 2011 г.) согласно некоторому ориентировочному расписанию (таблица), составленному исходя из максимального значения скорости, равного 350 км/ч. В результате было установлено, что при реально возможном времени хода за счет улучшения аэродинамических характеристик поезда Zefiro 380 потребление энергии может быть снижено на 10% по сравнению с данными для эксплуатируемых ныне высокоскоростных поездов.

Возможности дальнейшего применения метода

Предложенный специалистами Bombardier инновационный подход к оценке аэродинамических

характеристик достаточно проработан, что делает возможным его промышленное применение, способствующее поддержанию конкурентоспособности продукции компании. Описанный метод использовался при оптимизации конструкции электропоездов ETR 1000 (V300 Zefiro) для компании-оператора Trenitalia, которые Bombardier строит совместно с компанией Ansaldo-Breda (Италия). Данный поезд имеет прогрессивную с точки зрения аэродинамики конструкцию в сочетании с хорошей устойчивостью к боковому ветру. При этом концевые вагоны поезда ETR 1000 могут иметь относительно большую высоту, за счет чего возможно увеличение пассажироместности и достижение высокого уровня комфорта.

Данный метод применялся также при разработке предполагаемой конструкции высокоскоростного поезда ICEx для железных дорог Германии. Его использование позволило повысить устойчивость поезда к воздействию бокового ветра при относительно небольшой массе немоторных концевых вагонов и сократить потребление энергии за счет применения более обтекаемой конструкции.

Кроме того, рассмотренный метод использовался при проектировании региональных поездов типа Regio 2N (рис. 5) для Национального общества железных дорог Франции и электропоездов типа Twindexx для Федеральных железных дорог Швейцарии (оба — из двухэтажных вагонов). Это свидетельствует о способности специалистов компании Bombardier создавать обладающие оптимальными аэродинамическими характеристиками поезда как для высокоскоростных, так и для региональных и пригородных сообщений.

Ориентировочное расписание движения поездов по маршруту Пекин — Шанхай

Станции	Расстояние от Пекина, км	Время хода по участку, ч: мин: с	Длительность стоянок, ч: мин: с	Общее время хода, ч: мин: с	Средняя скорость, км/ч
Пекин-Южный	0,00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	0,0
Цанчжоу-Западный	219,20	00:42:22	00:01:00	00:43:22	310,4
Цзинань-Западный	419,40	00:37:50	00:01:00	01:22:12	317,5
Тэнчжоу-Восточный	589,13	00:32:46	00:01:00	01:55:58	310,8
Сюйчжоу-Восточный	756,43	00:32:15	00:01:00	02:29:13	311,2
Нанкин-Южный	1018,55	00:48:40	00:01:00	03:18:53	323,2
Уси-Восточный	1201,15	00:34:49	00:01:00	03:54:42	314,7
Шанхай	1305,07	00:21:51	00:00:00	04:16:33	285,4

A. Orellano, R. Kirchof. *Railway Gazette International*, 2011, № 5, p. 41–45; материалы компании Bombardier (www.zefiro.bombardier.com).