

УДК 534.2

Аэродинамический шум высокоскоростных поездов: анализ источников и методов снижения

Шпынкова Виктория Дмитриевна^()*

shpynkova.viktoria@mail.ru

Деменев Дмитрий Андреевич

demenev@bmstu.ru

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема аэродинамического шума, который возникает при движении высокоскоростных поездов. Показано, что когда скорость движения превышает 300 км/ч, основным источником шума становится не взаимодействие колес с рельсами, а обтекание поезда воздушным потоком. Представлена классификация того, как именно возникает этот шум: в головной части поезда, вдоль всего кузова и в зоне пантографов. Рассмотрены методы прогнозирования шума. Систематизированы инженерные способы борьбы с шумом: изменение формы головы поезда, сглаживание поверхности кузова и улучшение конструкции пантографов. На основе обобщения данных из научной литературы показано, что оптимизация формы пантографов и сглаживание поверхности позволяют снизить шум. Определены направления для дальнейших исследований: создание методов оптимального проектирования формы поезда и уточнение моделей взаимодействия воздушного потока со звукопоглощающими покрытиями.

Ключевые слова: аэродинамический шум, высокоскоростной поезд, источники шума, методы снижения шума, обтекание

Aerodynamic noise of high-speed trains: analysis of sources and methods of reduction

Shpynkova Victoria Dmitrievna^()*

shpynkova.viktoria@mail.ru

Demenev Dmitry Andreevich

demenev@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The paper addresses the problem of aerodynamic noise generated during high-speed train operation. It is shown that when the speed exceeds 300 km/h, the dominant noise source shifts from wheel-rail interaction to the flow of air around the train surfaces. A classification of noise generation mechanisms is presented: at the nose, along the entire body, and around the pantographs. Methods of noise forecasting are considered. Engineering noise reduction techniques are systematized: nose shape optimization, body surface smoothing, and pantograph design improvement. Based on a synthesis of data from the scientific literature, it is shown that pantograph optimization and surface smoothing can reduce noise. Promising research directions are identified: development of optimal design methods for train body shape and refinement of models for turbulent flow interaction with sound-absorbing coatings.

Keywords: aerodynamic noise, high-speed train, noise sources, noise reduction methods, flow

Введение. Когда высокоскоростной поезд проносится мимо, мы слышим гул. Многие думают, что это стучат колеса. Но на самом деле, на высоких скоростях главный источник шума — воздух.

Почему это происходит? Если поезд движется медленно, воздух спокойно его обтекает, как вода обтекает камень в ручье. Но чем выше скорость, тем сильнее воздух сопротивляется движению, скапливаясь перед поездом.

Если вести руку по воде медленно, она расступается перед ладонью и смыкается за ней, не оставляя следа. Если движение быстрое — перед рукой поднимается волна, а за ней образуется углубление, которое исчезает не сразу (рис. 1). Так же и воздух: на высокой скорости он сжимается перед поездом, а позади становится более редким, не успевая заполнить пустоту, которая образуется за поездом.



Рис.1. Движение руки по воде

Разница между уплотненным воздухом впереди и разреженным позади рождает колебания. Эти колебания распространяются по воздуху, достигают нашего уха, и мы слышим звук [1].

В железнодорожной акустике выделяют три основных источника шума, которые сменяют друг друга с ростом скорости [2, 3]:

Шум оборудования (компрессоры, тяговые электродвигатели и др.) преобладает на скоростях до 50...60 км/ч.

Шум качения — процесс столкновения в системе «колесо — рельс» — определяется зависимостью $30lgV$ (где V — скорость движения, км/ч) и является основным в диапазоне скоростей 60...300 км/ч.

Аэродинамический шум, образованный обтеканием воздуха корпуса подвижного состава, пантографов и других элементов, определяется зависимостью $60lgV$ и становится главным на скоростях свыше 300 км/ч.

Помимо этих основных источников, заметный вклад в общий шум вносят и другие явления. Среди них — дребезжание кузова (корпусной шум), пронзительный скрип колес при прохождении поворотов, шум тормозных коло-

док, звук соударения вагонов при сцепке, а также удары колес о стыки рельсов. На рис. 2 показаны зависимости уровня шума от скорости для всех трех основных источников.

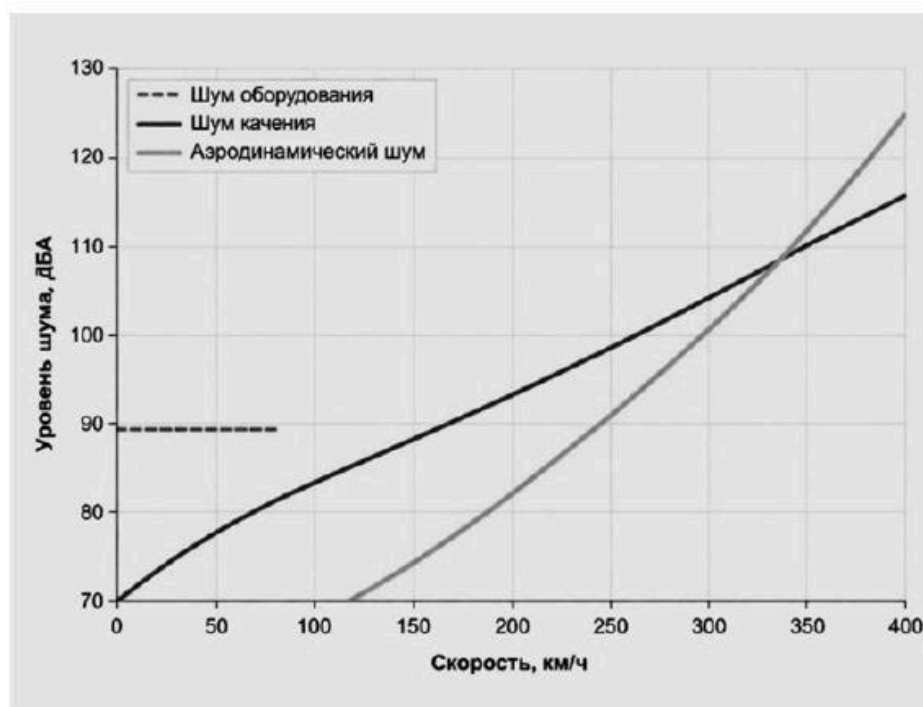


Рис. 2. Зависимость уровня шума от скорости движения поезда

Как видно из графика, до скорости 50–60 км/ч самым громким является шум оборудования. В диапазоне 60–300 км/ч на первый план выходит шум качения, который остается выше аэродинамического. После 300 км/ч аэродинамический шум быстро нарастает и становится главным. Поэтому для поездов, развивающих скорость более 300 км/ч, борьба с аэродинамическим шумом становится одной из главных инженерных задач.

Цель данной работы — разобраться, откуда берется этот шум и какие способы позволяют сделать высокоскоростные поезда тише.

Методы и материалы. В основе исследования лежит анализ научных публикаций по акустике железнодорожного транспорта, изданных за последние двадцать лет. Использованы статьи из научных журналов, индексируемых в международных базах данных, а также материалы международных конференций, посвященных проблемам шума на транспорте. Рассматривались как теоретические работы, описывающие природу шумообразования, так и экспериментальные исследования, в которых проверялась эффективность различных методов снижения шума.

Результаты. При движении поезда на высокой скорости можно выделить три основные зоны, где шум возникает особенно интенсивно.

Головная часть. Нос поезда первым встречает набегающий поток воздуха. На высоких скоростях воздух не успевает плавно обтекать его — он сры-

вается с острых кромок, образуя вихри, которые порождают низкий гул, слышимый далеко вокруг. Удлинение и сглаживание передней части позволяет ослабить вихреобразование, что напрямую снижает уровень шума [3]. Ярким примером такого подхода является японский поезд на магнитной подвеске JR-Maglev: 21 апреля 2015 года на испытательном участке в префектуре Яманаси опытный состав модификации Синкансэн L0 установил мировой рекорд скорости для железнодорожного транспорта — 603 км/ч (рис. 3). Его сверхдлинная заостренная носовая часть — результат многолетней оптимизации формы для снижения аэродинамического сопротивления и шума [4].



Рис. 3. Синкансэн L0 системы JR-Maglev

Поверхность кузова. Даже самый гладкий на вид поезд имеет на своей поверхности микроскопические неровности, стыки между вагонами, сварные швы. Воздух, скользящий вдоль кузова, трется о них, и прилегающий к нему воздух приходит в хаотическое движение. Это явление называют турбулентным пограничным слоем. Он создает непрерывный шум, похожий на ветер, который слышен на всем протяжении состава. Чем меньше неровностей и чем плотнее прилегают друг к другу элементы конструкции, тем слабее этот шум.

Выступающие части. На крыше поезда расположены пантографы — устройства, которые передают электрический ток от контактного провода к поезду. При движении вокруг этих элементов образуются вихри, которые создают высокочастотный свист. Оптимизация формы пантографов позволяет снизить этот шум [5].

Чтобы оценить уровень шума еще на этапе проектирования, инженеры используют математические модели, основанные на законах аэроакустики. Фундаментальную основу для таких расчетов заложил британский ученый Майкл Лайтхилл. В 1950-х годах он разработал теорию, согласно которой звук возникает там, где в потоке воздуха происходят быстрые изменения скорости и давления [6]. Сегодня на основе этой теории созданы вычислительные методы, позволяющие с помощью компьютеров рассчитывать акустические характеристики перспективного подвижного состава [2, 3].

Как же сделать поезд тише? За десятилетия развития высокоскоростного движения инженеры нашли несколько эффективных решений.

Форма головы. Удлинение и сглаживание носовой части позволяет воздуху плавно обтекать поезд, не создавая мощных вихрей, что снижает уровень шума [3].

Гладкость кузова. Уменьшение неровностей, стыков и выступающих деталей на поверхности поезда ослабляет турбулентный пограничный слой и снижает создаваемый им шум.

Пантографы. Оптимизация формы пантографов позволяет уменьшить вихреобразование и снизить уровень свиста [5].

Звукопоглощающие материалы. В местах, где особенно сильно образуются вихри, используют пористые материалы. Они гасят колебания воздуха. Однако эффективность таких материалов напрямую зависит от того, насколько точно удастся рассчитать их взаимодействие с турбулентным потоком. Существующие математические модели описывают этот процесс недостаточно полно, что ограничивает возможности прогнозирования и требует дальнейших исследований [3].

Обсуждение. Результаты подтвердили исходное предположение: после 300 км/ч главным источником шума становится воздух, а не колеса. Три главные зоны — нос, кузов, пантографы — подсказывают, что именно нужно дорабатывать: сделать нос более обтекаемым, поверхность кузова гладкой, а конструкцию пантографов — улучшенной.

Зависимости шума от скорости, приведенные в формулах $30\lg V$ и $60\lg V$, соответствуют физике образования звука при движении поезда: в первом случае — за счет взаимодействия колеса и рельса, во втором — за счет пульсаций давления в потоке воздуха.

Что касается звукопоглощающих материалов, то здесь расчет сталкивается с трудностями: существующие модели турбулентности (например, RANS, LES) и модели акустического импеданса пористых сред не всегда точно описывают поведение таких покрытий в турбулентном потоке. Значит, это направление нуждается в дальнейших исследованиях.

Заключение. В результате выполненного исследования установлено, что при движении высокоскоростных поездов со скоростями свыше 300 км/ч доминирующим становится аэродинамический шум, возникающий при обтекании кузова воздушным потоком. Основными зонами генерации шума являются головная часть поезда, поверхность кузова и пантографы.

Наиболее эффективными методами снижения шума являются оптимизация конструкции пантографов, совершенствование формы головной части и сглаживание поверхности кузова.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании перспективного российского высокоскоростного подвижного состава, а также при разработке нормативных требований к его акустическим характеристикам. Дальнейшие исследования целесообразно направить на создание методов оптимизации формы кузова, учитывающих одновременно как аэродинамические, так и акустические требования, а также на разработку более точных моделей взаимодействия турбулентного потока со звукопоглощающими покрытиями.

Список источников

- [1] Thompson D.J., Jones C.J.C. A review of the modelling of wheel/rail noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, vol. 231, no. 3, pp. 519–536.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2542>
- [2] Talotte C., Gautier P.E., Thompson D.J., Hanson C. Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, vol. 267, no. 3, pp. 447–468.
[https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00707-7](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00707-7)
- [3] Thompson D.J. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier, 2009, 536 p.
- [4] *Самые быстрые поезда: гонка за лидерством в мире пассажироперевозок*. URL: <https://science.mail.ru/articles/4197-samye-bystrye-poezda/> (дата обращения 20.02.2026).
- [5] Kitagawa T., Nagakura K. Aerodynamic noise generated by Shinkansen cars. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, vol. 231, no. 3, pp. 913–924.
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2639>
- [6] Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. I. General theory. *Proceedings of the Royal Society A*, 1952, vol. 211, no. 1107, pp. 564–587.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>