

УДК 629.3.015.3

А.Ф. АНДРЕЙЧИК; А.В. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

С.В. ХАРИТОНЧИК, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ВЛИЯНИЕ МЕЖЗВЕННОГО ПРОСТРАНСТВА НА АЭРОДИНАМИКУ МНОГОЗВЕННОГО АВТОПОЕЗДА

В работе показана возможность снижения потребления топлива на примере многозвеного автопоезда путем уменьшения зазоров между звеньями. Выполнена оценка вклада межзвеного пространства в суммарное аэродинамическое сопротивление многозвеного автопоезда.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, автопоезд, межзвенное пространство, поток, обтекание, моделирование

Введение. Увеличение количества грузопотоков на магистралях, повышение требований к грузоперевозкам заставляет производителей автотранспортной техники совершенствовать существующие конструкции автопоездов. Увеличение грузоподъемности и грузовместимости автопоездов возможно за счет увеличения количества прицепных звеньев.

В настоящее время в странах Европы существуют ограничения по длине автопоезда — 18 м и по полной массе — 40 т. В Швеции и Финляндии в 1998 году были введены требования, разрешающие использование автопоездов длиной до 25,25 м и полной массой до 60 т, при сохранении требований к осевым нагрузкам (рисунок 1) [1]. В 2004 году в Нидерландах в качестве эксперимента было разрешено эксплуатировать автопоезда длиной до 25,25 м. Результаты опытной эксплуатации показали, что использование 60-тонного автопоезда длиной 25,25 м дает увеличение грузоподъемности до 60 % и сокращение на 30 % стоимости доставки одной тонны груза по сравнению с «классическими» автопоездами (длиной 18 м и полной массой 40 т). Кроме того, уменьшение расхода топлива на перевозку тонны груза, в конечном счете, приводит к сокращению на 15 % удельного количества вредных веществ [2].

Основной целью создания новых многозвенных автопоездов является замена эксплуатирующихся на более эффективные, повышение экономической эффективности перевозок, сокращение количества транспорта на

дорогах, сокращение количества занятых в грузоперевозках водителей, уменьшение вредных выбросов в окружающую среду.

В настоящее время в области автомобилестроения реализуются стратегии повышения топливной экономичности и улучшения экологических характеристик большегрузных автотранспортных средств. Одним из перспективных направлений повышения топливной экономичности является совершенствование аэродинамических характеристик автотранспортных средств (АТС). Оно заключается в создании безотрывного обтекания воздуха, которое достигается изменением формы транспортного средства, использованием навесных элементов, обтекателей, спойлеров и т. п., поскольку одним из существенных факторов, оказывающих влияние на расход топлива автомобилей при движении на больших скоростях, является аэродинамическое сопротивление [3].

Течение воздуха в межзвенном пространстве прицепных магистральных автопоездов является мало изученным вопросом. Эта зона автопоезда характеризуется достаточно большой длиной и высотой, и состояние воздушной массы в ней подвержено влиянию набегающих потоков воздуха с крыши, боковых стенок и подднищевой зоны звена автопоезда. Исследование этого вопроса позволит проанализировать механику аэродинамических потерь в межзвенном пространстве и определить эффективные и обоснованные

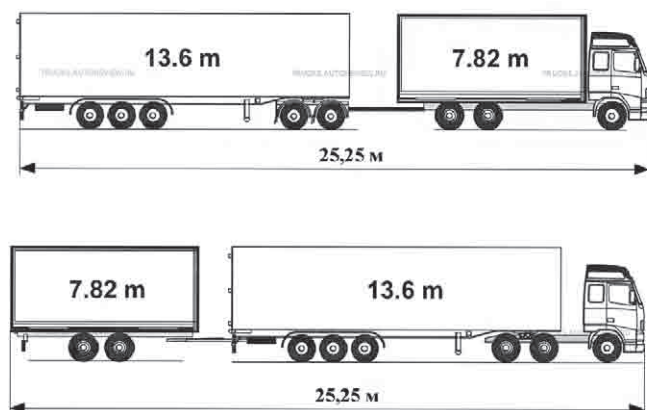


Рисунок 1 — Автопоезда, эксплуатирующиеся в Швеции, Финляндии и Нидерландах

ванные решения, позволяющие снизить потери мощности и тем самым расход топлива.

Рассматриваемый многозвенный автопоезд содержит два пространства между звеньями (рисунок 2). Их наличие приводит к появлению существенных вихреобразований при движении на высокой скорости. Двигаясь вдоль крыши и боковых стенок, воздушный поток достигает зазора и срывается в него, образуя объем сильно уплотненного и завихренного воздуха, который взаимодействует с основным обтекающим автопоезд потоком и увеличивает его аэродинамическое сопротивление.

Благодаря развитию численных методов и вычислительных возможностей компьютерной техники широкое распространение получают аэродинамические исследования на основе компьютерного моделирования испытаний (виртуальные испытания). По сравнению с натурными испытаниями компьютерное моделирование позволяет реализовать широкое варьирование исследуемыми параметрами, обеспечивать повторяемость условий вычислительного эксперимента и более оперативное получение результата, а также существенно меньшую стоимость проведения эксперимента.

Данные исследований [4–6] показывают, что применение возможностей современной вычислительной гидрогазодинамики на основе методов конечных объемов для решения задач внешнего обтекания АТС воздушной средой дает возможность построения картины обтекания, исследования распределений скорости, давления по поверхности автопоезда, а также сил, действующих на отдельные элементы конструкции АТС.

Методика расчета. Рассмотрим реализацию расчетной методики для объекта исследований — многозвенного автопоезда, с применением программных комплексов Siemens PLM NX и FlowVision.

Подготовка расчетной CAD-модели. Для проведения расчетных исследований в программном комплексе трехмерного моделирования Siemens PLM NX с использованием 3D модели объекта, в рассматриваемом случае — многозвенного автопоезда (рисунок 3) создана расчетная модель, представляющая собой замкнутый объем, включающих в себя как сам объект, так и область, имитирующую окружающую среду, в которой происходит перемещение воздушных масс относительно объекта.

На этапе «Подготовка расчетной CAD-модели» выполнена адаптация трехмерной геометрической модели автопоезда (устранения дублирующихся поверхностей, линий и узлов, слияние поверхностей, группировка поверхностей в зависимости от вида граничных условий, задаваемых на них). В результате уменьшено число граней и откорректирована геометрия модели автопоезда таким образом, чтобы она стала подходящей для построения расчетной сетки для решения задачи обтекания.

Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами 100×15×12 м. Внешние границы расчет-

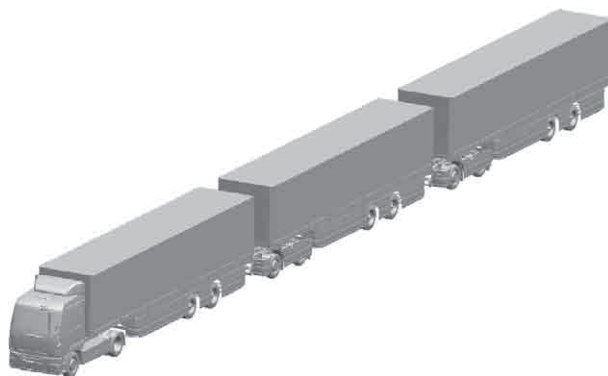


Рисунок 3 — 3D-модель многозвенного автопоезда

ной области выбраны относительно размеров расположенного внутри исследуемого объекта с точки зрения достаточности для реализации движения автопоезда в неограниченном пространстве (рисунок 4).

Создание и описание расчетных сеток. Расчетная сетка строится в программном комплексе FlowVision в два этапа: на первом этапе задается начальная расчетная сетка, на втором этапе начальная расчетная сетка измельчается в зонах, требуемых более детального исследования.

Начальная сетка задается в виде трех одномерных сеток вдоль каждой оси декартовых координат. Одномерные сетки могут быть заданы равномерными (с постоянным шагом) или неравномерными с переменным шагом. В ходе расчета была использована равномерная расчетная сетка с адаптацией в объеме и на поверхности автопоезда (рисунок 5).

Описание начальных и граничных условий моделирования. Обтекание АТС воздушной средой во время его движения происходит в турбулентном режиме (число Рейнольдса $R_e > 10^6$). В этом случае решение прикладных задач моделирования процесса турбулентного обтекания производится с помощью решения системы уравнений Навье–Стокса [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} &= 0; \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right], \end{aligned}$$

где x_i, x_j — направления декартовой системы координат; u_i, u_j — декартовые составляющие скорости в направлении соответствующих осей; p — давление; t — время; ρ — плотность газа; μ — коэффициент динамической вязкости [7].

В рассматриваемой постановке задачи искомыми функциями являются скорость обтекания воздушным потоком поверхности автопоезда и давление на ней. Для



Рисунок 2 — Многозвенный магистральный автопоезд



Рисунок 4 — Расчетная область с моделью автопоезда

решения уравнений Навье—Стокса выбрана к-ε модель турбулентности [7, 8].

Моделирование выполнено для случая движения автопоезда с постоянной скоростью $V = 85$ км/ч. Продольная составляющая скорости равнялась скорости набегающего потока (скорости движения автопоезда). В ходе разработки компьютерных моделей сделаны допущения, что обтекание происходит потоком воздуха при нормальном атмосферном давлении ($p_0 = 10^5$ Па) и постоянной температуре, равной 20 °С. На выходной границе расчетной области поставлены мягкие граничные условия (см. рисунок 4), когда, кроме вытекания, допускается возможность втекания воздуха через данную поверхность. На верхней и боковых поверхностях расчетной области установлены условия стенки (твердое тело), но с нулевым трением (условие скольжения потока у стенки), что позволяло имитировать реальные условия неограниченной области в ограниченном пространстве расчетной области. Для обеспечения корректности моделирования учтено движение дорожного полотна со скоростью движения автопоезда.

Обработка результатов. По результатам расчета были получены: распределения скорости и линий тока вдоль автопоезда, распределение давлений на поверхности автопоезда, значения силы и коэффициента полного аэродинамического сопротивления.

На рисунке 6 приведено распределение скорости и линий тока вдоль автопоезда.

В пространстве между звеньями создается зона пониженного давления. Поэтому воздушные потоки, которые двигаются вдоль поверхности автопоезда, перемещаются в эту зону и образуют две вихревые структуры с противоположным направлением вращения воздуха (рисунок 7). Верхний вихрь образуется потоком, срываемым с крыши, а нижний вихрь — потоком, выбрасываемым из подднищевой зоны.

Результаты моделирования показали, что каждое последующее звено имеет меньшее аэродинамическое сопротивление. Это объясняет уменьшение вихреобразования в пространстве между звеньями (см. рисунок 7).

На основании расчетных данных получена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления

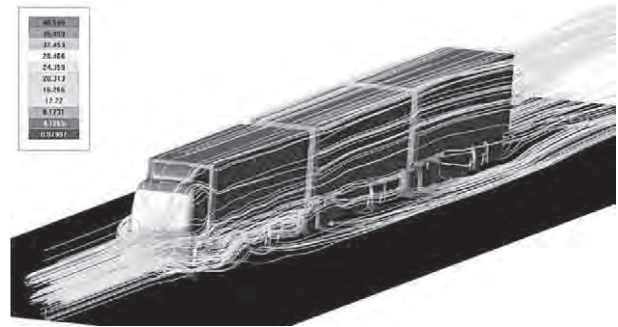


Рисунок 6 — Распределение скорости (м/с) и линий тока вдоль автопоезда

автопоезда C_x от расстояния между звеньями (рисунок 9). Аппроксимируя эти данные, получено уравнение, показывающее зависимость $C_x = f(L)$:

$$C_x = 0,0927L^2 - 0,0249L + 0,6879.$$

Коэффициент корреляции полученной математической зависимости $R^2 = 0,98$.

Из графика (рисунок 8) видно, что наличие расстояния (зазора) между звеньями многозвенного автопоезда увеличивает на 16 % полное аэродинамическое сопротивление автопоезда. Зависимость $C_x(L)$ показывает, что с увеличением расстояния L между звеньями автопоезда увеличивается дополнительное аэродинамическое сопротивление, а соответственно величина общего коэффициента аэродинамического сопротивления автопоезда. При этом увеличение расстояния между звеньями более чем на 1 м вызывает существенное нелинейное возрастание аэродинамического сопротивления.

В эксплуатации важным показателем топливной экономичности автомобиля является расход топлива, выраженный в литрах на 100 км пройденного пути — так называемый путевой расход топлива Q_s . Для расчета путевого расхода топлива Q_s в прикладных задачах используется зависимость [9]:

$$Q_s = 100g_e N_e / \rho_T V,$$

где g_e — удельный расход топлива, определяемый по многопараметровой характеристике двигателя при установленном движении; N_e — мощность, требуемая для преодоления сопротивления движению; $\rho_T = 820$ кг/м³ — плотность топлива; V — скорость движения автомобиля.

Зависимости $Q_s(V)$ (рисунок 9) показывают, что топливные потери многозвенного автопоезда при наличии зазора между звеньями с увеличением скорости растут. При скорости многозвенного автопоезда 90 км/ч топливные потери составляют до 3,5 л/100 км, что составляет 6 % от расхода топлива МАП. Сокращение таких потерь топлива при среднегодовом пробеге 100 тыс. км [10] сэкономит владельцу АТС до 3 500 л топлива.

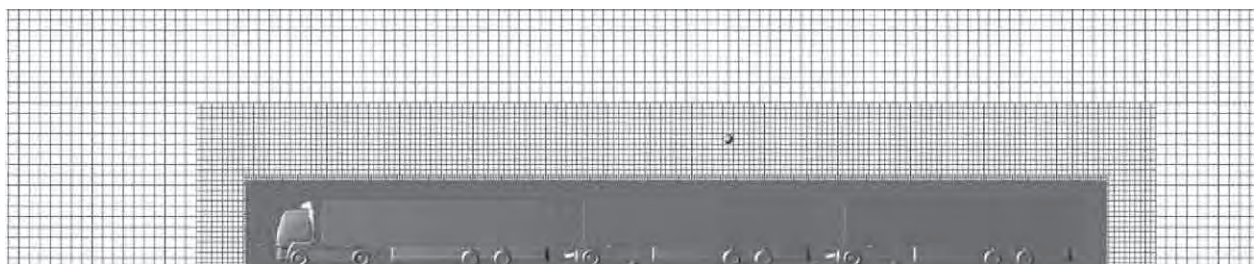
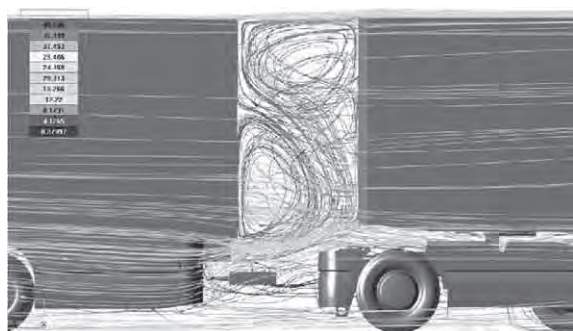
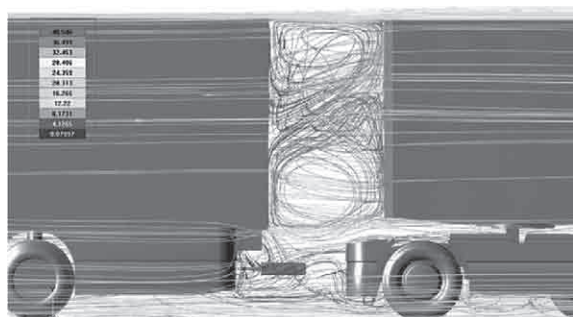


Рисунок 5 — Расчетная сетка в средней плоскости автопоезда



а



б

Рисунок 7 — Распределение скорости (м/с) и линий тока: а — в пространстве между 1-ым и 2-ым звеньями автопоезда; б — в пространстве между 2-м и 3-м звеньями автопоезда

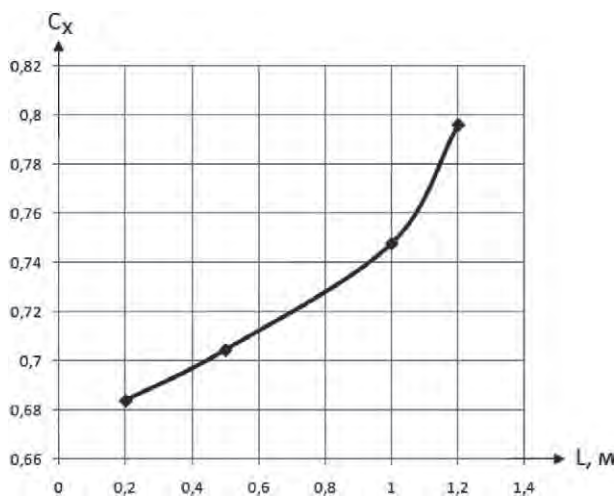


Рисунок 8 — Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления автопоезда от расстояния между звеньями автопоезда

Заключение. В работе описана расчетная методика аэродинамических характеристик многозвенного автопоезда, которая основывается на численном моделировании процессов гидрогазодинамики. В результате моделирования эксперимента в программном комплексе FlowVision были получены распределения скорости и линий тока вдоль автопоезда, распределение давлений на поверхности автопоезда, значения силы и коэффициента полного аэродинамического сопротивления.

Выполнена оценка влияния расстояния между звеньями многозвенного автопоезда на коэффициент аэродинамического сопротивления и расход топлива.

Для снижения аэродинамического сопротивления требуется совершенствование протекания воз-

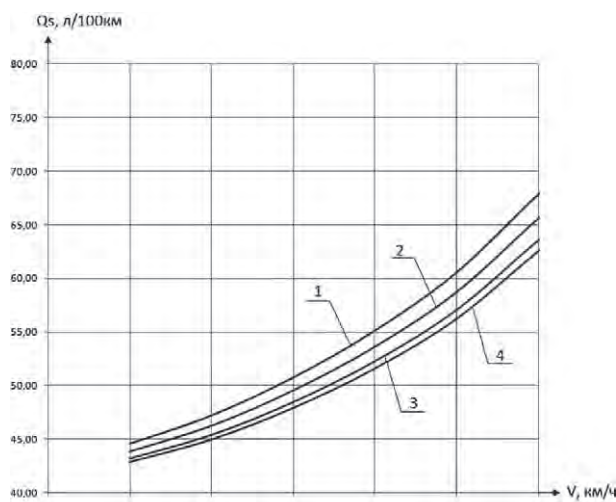


Рисунок 9 — Топливная характеристика установившегося движения на высшей передаче МАП: 1 — путевой расход топлива МАП при наличии 2-х зазоров в 1,2 м между звеньями; 2 — путевой расход топлива МАП при наличии 2-х зазоров в 1 м; 3 — путевой расход топлива МАП при наличии 2-х зазоров в 0,5 м; 4 — путевой расход топлива МАП при наличии 2-х зазоров в 0,2 м

душных потоков в межзвенном пространстве и подднищевой зоне. Полученные результаты указывают, что для снижения потребления топлива необходимо уменьшить расстояние между звеньями либо исключить их, используя специальные устройства или конструктивные элементы.

Список обозначений

АТС — автотранспортные средства;
 МАП — многозвенный магистральный автопоезд;
 R_e — число Рейнольдса;
 x, x_j — направления декартовой системы координат;
 u, u_j — декартовые составляющие скорости в направлениях соответствующих осей;
 p — давление, Па;
 t — время, с;
 ρ — плотность жидкости (газа), Нс²/м⁴;
 μ — коэффициент динамической вязкости;
 p_0 — нормальное атмосферное давление, Па;
 L — величина зазора между звеньями, м;
 C_x — коэффициент полного аэродинамического сопротивления многозвенного автопоезда;
 V — скорость натекания воздушного потока, м/с;
 N_e — мощность, требуемая для преодоления суммарного сопротивления движению, кВт;
 Q_s — путевой расход топлива, л/100 км;
 g_e — удельный расход топлива, г/кВт·ч;
 ρ_T — плотность топлива, кг/м³;
 R — коэффициент корреляции.

Список литературы

1. Топалиди, В.А. Модульный принцип формирования автопоездов для перевозок Европа — Азия / В.А. Топалиди // Автомобил. пром-сть. — 2008. — № 3. — С. 38–40.
2. Голландский эксперимент // Автотрак [электронный ресурс]. — 2012. — Режим доступа: <http://www.autotruckpress.ru/archive/number72/article614>. — Дата доступа: 31.07.2015.
3. Евграфов, А.Н. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий. — Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. — 368 с.

4. Reducing Aerodynamic Drag// Lawrence Livermore National Laboratory [Электронный ресурс]. — 2014. — Режим доступа: https://www.llnl.gov/str/May03/pdfs/05_03.4.pdf. — Дата доступа: 21.05.2014.
5. Aerodynamic Drag of Heavy Vehicles (class 7-8): Simulation and Benchmarking / R. McCallen [et al.]. — Government/Industry Meeting Washington, 2000. — 19 с.
6. Обзор и эволюция методов исследований аэродинамических характеристик автомобилей КамАЗ / Д.Х. Валеев [и др.] // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. междунар. научн.-техн. конф. ОИМ НАН Беларуси, Минск, 30–31 окт. 2008 г. / редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2008. — 492 с.
7. Белов И.А., Исаев С.А., Моделирование турбулентных течений. СПб: Балтийский Государственный технический университет, 2001. — 108с.
8. Сайт FlowVision [Электронный ресурс]. — 2015. — Режим доступа: http://flowvision.ru/phocadownload/PublicDownloads/Documentation/fvrus_30802.pdf. — Дата доступа: 25.06.2015.
9. Тяговая динамика и топливная экономичность автомобиля с механической трансмиссией: учеб.-методич. пособие / О.С. Руктешель [и др.]. — Минск: БНТУ, 2000.
10. Низов, М.А. Проблемы международных автомобильных перевозчиков России / М.А. Низов // Автомобил. пром-сть. — 2007. — № 6. — С. 2–5.

Andreichyk A.F., Shmeliyov A.V., Kharytonchuk S.V.

The estimated assessment of aerodynamic losses into the trailer-trailer gap of the linked road vehicle

The paper discusses the possibility of fuel consumption reduction of the multilink train by reducing of trailer-trailer gaps. The evaluation of the contribution of trailer-trailer gaps in the total aerodynamic drag of the multilink train is performed.

Поступил в редакцию 14.08.2015.