

УДК 629.3.015.3

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОЙ ОЦЕНКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В МЕЖЗВЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ СОЧЛЕНЁННОГО МАГИСТРАЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА

А.Ф. АНДРЕЙЧИК, С.В. ХАРИТОНЧИК, А.В. ШМЕЛЁВ  
ОИМ НАН Беларуси, БНТУ (8.10.375.17 294-90-59)

*Показана связь между динамикой многозвенного автопоезда и его путевым расходом топлива.*

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

Andreichik A.F., Haritonchik S.V., Shmelev A.V.  
METHODOLOGY AND RESULTS OF ESTIMATED ASSESSMENT  
AERODYNAMIC LOSSES INTO THE TRAILER-TRAILER GAP  
THE LINKED ROAD VEHICLE

*Connection between the dynamics of linked road vehicle and his ground expense of fuel is shown.*

*Keywords: aerodynamic drag, trailer, trailer-trailer gap, flow, airflow, modeling.*

Совершенствование аэродинамических качеств большегрузных магистральных автопоездов — одна из реализуемых автомобилестроительными фирмами в настоящее время стратегий повышения их топливной экономичности и улучшения экологических характеристик. Эта задача решается за счёт создания безотрывного обтекания АТС обтекающим воздухом. К числу таких мер относятся различные навесные элементы, обтекатели, спойлеры и т.п., в той или иной мере изменяющие форму АТС [1]. Что вполне объяснимо:

расход топлива при движении АТС очень сильно зависит от аэродинамического сопротивления [2]. Например, доказано: [2, 3] при увеличении скорости грузового автомобиля с 60 до 100 км/ч его расход топлива на преодоление аэродинамического сопротивления возрастает в 2,5...3 раза.

Всё это хорошо известно. Но только применительно к одиночному АТС. Сейчас же на дорогах появляется всё больше автопоездов, причём значительная их часть — автопоезда многозвенные. И вот здесь есть некоторые аэродинамические неясности, главная из которых — течение воздуха в межзвенном пространстве.

Очевидно, что воздушная масса, находящаяся в таком пространстве (зоне), подвержена влиянию потоков воздуха, набегающих с крыши, боковых стенок и поднишевой зоны расположенного перед ним звена автопоезда. Но каковы степень этого влияния и механика связанных с ним аэродинамических потерь, пока фактически никто не знает. Отсюда — нет эффективных и обоснованных решений, позволяющих снизить потери мощности и тем самым — расход топлива.

Чтобы заполнить этот пробел, авторы разработали методику расчётной оценки влияния межзвенного пространства автопоездов и проверили её применимость к прицепному многозвенному магистральному автопоезду, предназначенному для скоростных перевозок больших объёмов грузов на дальние и сверхдальние расстояния по междугородним, международным и трансконтинентальным трассам [3]. Этот автопоезд состоит (рис. 1) из четырёх звеньев — тягача и трёх

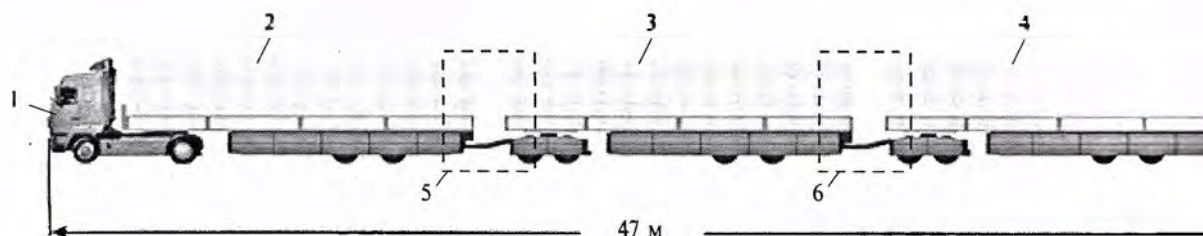


Рис. 1. Многозвенный магистральный автопоезд:  
1 — тягач; 2, 3, 4 — звенья; 5, 6 — области исследования

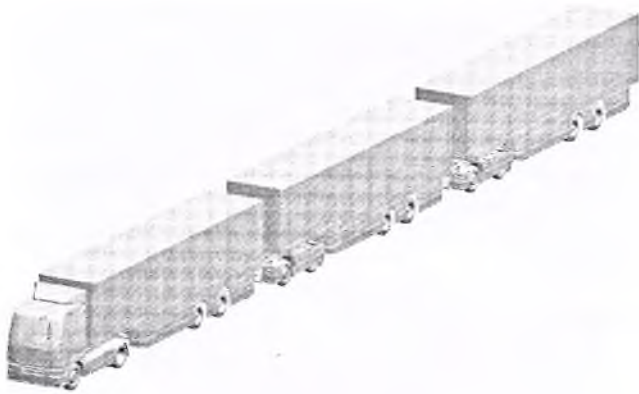


Рис. 2. 3D-модель многозвенного автопоезда

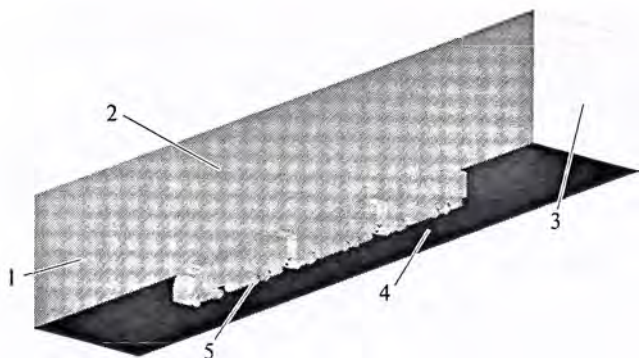


Рис. 3. Расчётная область с моделью автопоезда:  
1 — входная граница; 2, 5 — поверхность; 3 — выходная граница; 4 — дорога

прицепов, т.е. имеет два межприцепных пространства, в которых при его движении на высокой скорости появляются вихри: двигаясь вдоль крыши, боковых стенок и днища второго и третьего звеньев, воздушные потоки достигают зазоров и срываются в них, уплотняясь и завихряясь. Эти вихри, взаимодействуя с основным обтекающим автопоезд потоком, увеличивают его аэродинамическое сопротивление.

Особенности такого взаимодействия, в принципе, можно исследовать тремя способами: натурными испытаниями автопоезда, продувкой его модели в аэродинамической трубе, а также с помощью его компьютерного моделирования. Причём последний из них предпочтительнее, поскольку позволяет варьировать исследуемые параметры, обеспечить повторяемость условий вычислительного эксперимента и быстрее других спо-

собов получить результаты, а главное — стоимость вычислительных экспериментов существенно меньше. Учитывая эти обстоятельства, авторы выбрали именно его.

Проводились расчётные исследования в шесть этапов: составление конструкторской CAD-модели исследуемого объекта; подготовка его расчётной CAD-модели; создание и описание расчётных сеток; описание начальных и граничных условий моделирования; собственно расчёт; обработка и анализ его результатов. Рассмотрим эти этапы.

Результаты первого из них приведены на рис. 2 и в комментариях не нуждаются.

На втором этапе ("подготовка расчётной CAD-модели") выполнялась адаптация трёхмерной геометрической модели автопоезда, суть которой — устранение дублирующихся поверхностей, линий и узлов, слияние поверхностей и их группировка в зависимости от вида граничных условий, задаваемых на них. В результате было уменьшено число граней и откорректирована геометрия модели автопоезда таким образом, чтобы она стала подходящей для построения расчётной сетки. Расчётная область представляла собой (рис. 3) параллелепипед, внешние границы которого были выбраны с учётом размеров расположенного внутри исследуемого объекта и возможности реализации движения автопоезда в неограниченном пространстве.

Расчётная сетка (третий этап) строилась в программном комплексе FlowVision следующим образом: сначала задавали начальный вариант этой сетки, а затем её измельчали в зонах, требующих более детального исследования. При этом начальная сетка задавалась в виде трёх одномерных сеток, расположенных вдоль каждой оси декартовых координат, а в качестве одномерных использованы равномерные (с постоянным шагом) сетки (рис. 4).

Обтекание любого АТС воздушной средой во время его движения — всегда режим турбулентный. Число Рейнольдса  $Re > 10^6$ . Для него прикладные задачи моделирования процесса обтекания решаются, как известно, с помощью системы уравнений Навье — Стокса [4]:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_j u_i} \right]$$

где  $x_i, x_j$  — направления декартовой системы координат;  $u_i, u_j$  — декартовые составляющие скорости в

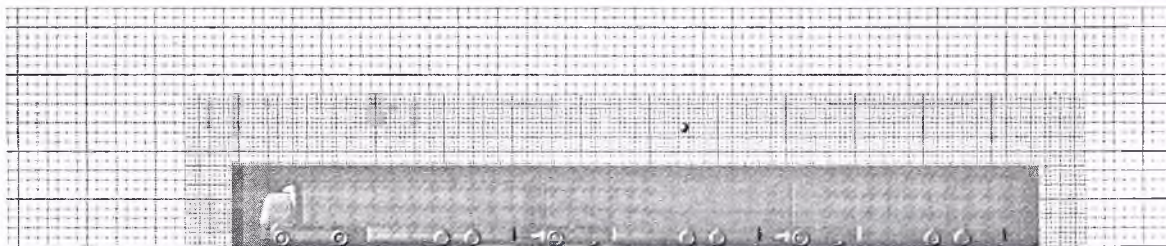


Рис. 4. Расчётная сетка в средней плоскости автопоезда

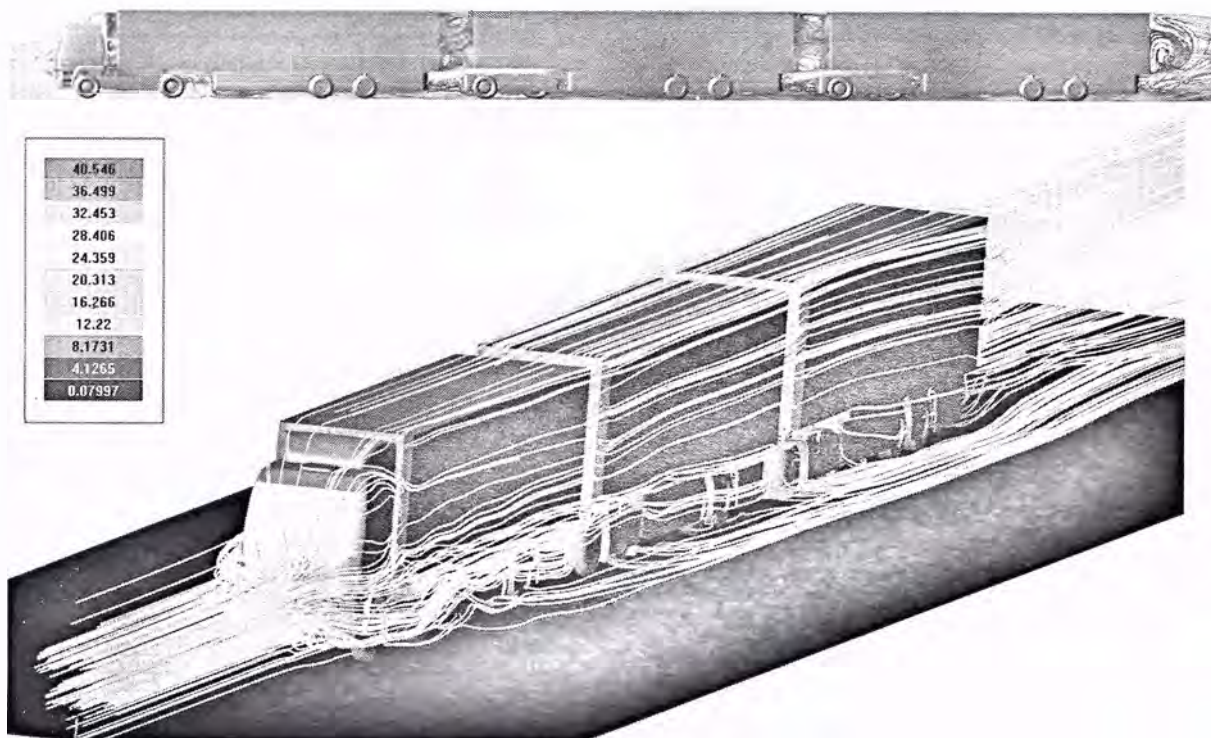
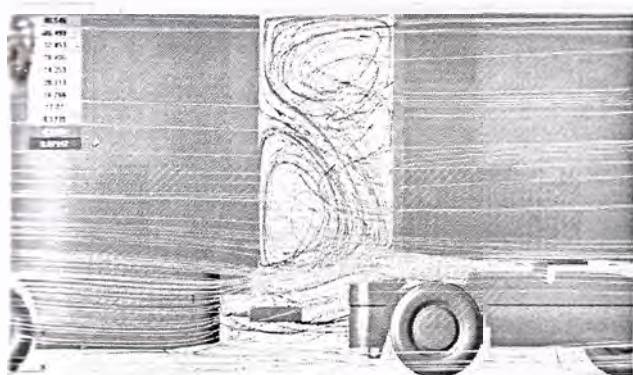


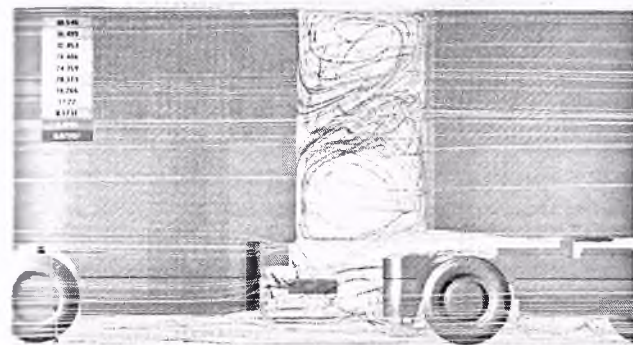
Рис. 5. Распределение скорости и линий тока вдоль автопоезда

...авления соответствующих осей;  $p$  — давление;  $t$  — температура;  $\rho$  — плотность газа;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости. В нашем случае искомыми функциями, очевидно, являются скорость обтекания поверх-

ности автопоезда воздушным потоком и давление на ней. В таком случае для решения уравнений Навье—Стокса лучше всего подходит  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности [5]. Поэтому авторы на ней и останавливались, а моделирование выполняли для движения автопоезда с постоянной скоростью  $v = 85$  км/ч. При этом продольная её составляющая ( $v_x$ ) принималась равной скорости набегающего потока (скорости движения автопоезда).



а)



б)

Рис. 6. Распределение скорости (м/с) и линий тока в пространстве между вторым и третьим звеньями (а) и между третьим и четвёртым (б)

Кроме того, в ходе разработки компьютерных моделей были сделаны и такие допущения: давление воздуха в набегающем потоке равно нормальному ( $p_0 = 10^5$  Па), а температура равна 293 К (20 °С); на выходной границе расчётной области допускается не только вытекание воздуха, но и его втекание; верхняя и боковые поверхности расчётной области рассматриваются как стенки (твёрдые тела), но с нулевым трением (условие скольжения потока у стенки), что позволило имитировать реальные условия неограниченной области в ограниченном пространстве расчётной области. Для обеспечения корректности моделирования было учтено также движение дорожного полотна со скоростью движения автопоезда.

В результате расчёта были получены распределения скорости и линий тока вдоль автопоезда (рис. 5) и в пространстве между его звеньями (рис. 6), а также распределение давлений на поверхности автопоезда, значения силы и коэффициента его полного аэродинамического сопротивления.

Как оказалось, пространства между звеньями представляют собой зоны пониженного давления. Поэтому воздушные потоки, которые двигаются вдоль поверхности автопоезда, действительно перемешиваются в эти зоны и в каждой из них создают две вихревые струк-

туры с противоположным направлением вращения воздуха. Причём верхний вихрь образует поток, срываемый с крыши, а нижний — поток, выбрасываемый из подднищевой зоны.

Результаты моделирования показали (см. таблицу), что основной вклад в аэродинамическое сопротивление автопоезда вносит первое прицепное звено, а каждое последующее создаёт меньшее аэродинамическое сопротивление. Это означает, что интенсивности вихрей в пространстве между звеньями, расположенными друг за другом, становятся всё менее мощными. То есть этот факт доказывает: многозвенный автопоезд выгоднее одиночного АТС не только с точки зрения грузоподъемности, но и аэродинамических потерь.

На основании полученных данных расчётным путём авторы определили зависимость коэффициента  $C_x$  аэродинамического сопротивления автопоезда от расстояния  $L$  между звеньями (рис. 7), а затем, аппроксимируя эти данные, получили уравнение для  $C_x = f(L)$ :

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

(коэффициент корреляции  $R^2 = 0,98$ ).

Из рисунка видно, что зазор между звеньями многозвенного автопоезда существенно увеличивает его полное аэродинамическое сопротивление. Причём эта зависимость явно нелинейная: если при изменении зазора с 0,2 до 1 м  $C_x$  возрастает с 0,69 до ~0,745, т.е. на 8 %, то при увеличении с 1 до 1,2 м — уже с 0,745 до ~0,79, т.е. на 6 %. И это отрицательно сказывается на путевом расходе топлива. Что видно из формулы

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

где  $g_e$  — удельный расход топлива, определяемый по многопараметровой характеристике двигателя при установившемся движении;  $N_e$  — мощность, требуемая для преодоления сопротивления движению;  $\rho_T = 820 \text{ кг/м}^3$  — плотность топлива;  $v$  — скорость движения АТС и рис. 8, на котором приведены подсчитанные по этой формуле зависимости  $Q_s = f(v)$  для рассматриваемого автопоезда, имеющего различные значения  $L$ .

Этот рисунок показывает, кроме того, что топливные потери многозвенного автопоезда при наличии зазора между звеньями с увеличением скорости растут. На-

Звено автопоезда	Сила $F_p$ давления, Н	Сила $F_f$ трения, Н	Полная аэродинамическая сила $F_p$ , Н	Коэффициент $C_p$ давления	Коэффициент $C_f$ трения	Коэффициент $C_x$ полного аэродинамического сопротивления
II	1789,3	105	1894,3	0,484	0,028	0,512
III	461,1	89,6	550,7	0,125	0,024	0,149
IV	431,1	68,9	500	0,117	0,019	0,135

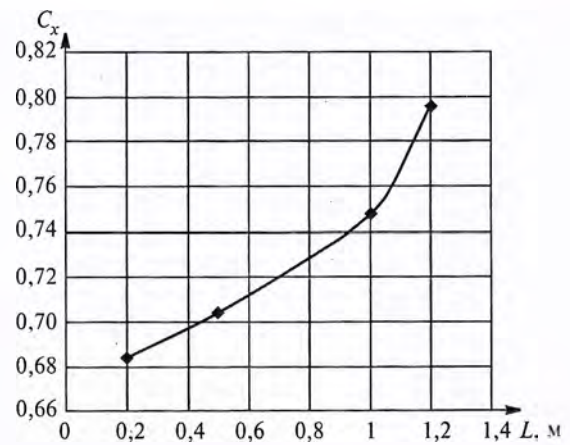


Рис. 7. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления автопоезда от расстояния между его звеньями

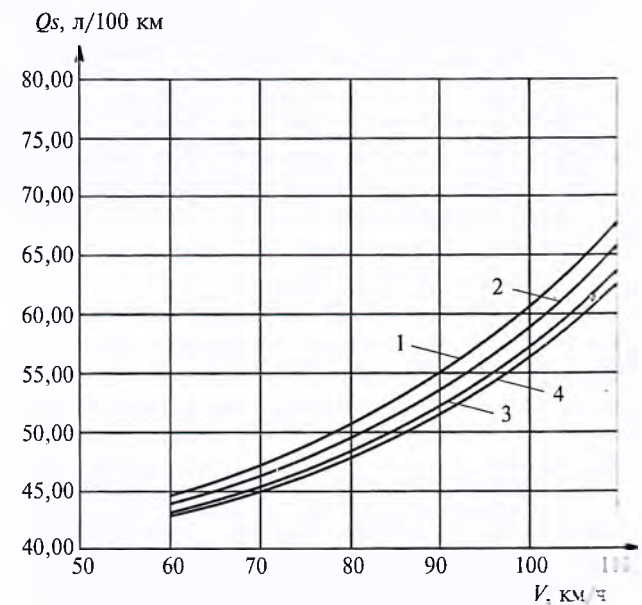


Рис. 8. Зависимость путевого расхода топлива автопоездом при установившемся движении на высшей передаче от скорости и величины зазора между его звеньями:

1 —  $L = 1,2 \text{ м}$ ; 2 —  $L = 1,0 \text{ м}$ ; 3 —  $L = 0,5 \text{ м}$ ; 4 —  $L = 0,2 \text{ м}$

пример, при скорости 90 км/ч они равны ~3,5 л/100 км, т.е. 6 % среднего расхода, что при годовом пробеге 100 тыс. км [6] составит 3500 л.

Вывод из всего того, что сказано выше, очевиден: для снижения потребления топлива многозвенным автопоездом расстояния между его звеньями необходимо уменьшить. И тем больше, чем больше скорость движения. Значит, сцепные устройства должны быть регулируемы по длине: на малых скоростях сцепное устройство может быть длинной, поскольку она обеспечивает необходимую маневренность автопоезда, а на больших скоростях — короткой, уменьшающей аэродинамические потери. Если же сцепное устройство нерегулируемое, то расстояние между звеньями должно находиться в диапазоне 0,4...0,5 м, что позволит снизить, по сравнению с серийными автопоездами, расход топлива на ~5 % и обеспечить непересекаемость элементов звеньев при движении.

## Литература

1. Hirz M. and Stadler S. A New Approach for the Reduction of Aerodynamic Drag of Long-Distance Transportation Vehicles, SAE Int. J. Commer. Veh. 6(2). — 2013. — С. 453...458.
  2. Евграфов А.Н. Аэродинамика колёсного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий. — Минск: НИРУП "Белавтотракторостроение", 2001. — 368 с.  
Высоцкий М.С. Основы проектирования модульных магистральных автопоездов / М.С. Высоцкий, С.И. Кочетов, С.В. Харитончик. — Минск: Беларус. навука, 2011. — 392 с.
  4. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб: Балтийский Государственный технический университет, 2001. — 108 с.
  5. Сайт FlowVision [Электронный ресурс]. — 2015. — Режим доступа: [http://flowvision.ru/phocadownload/PublicDownloads/Documentation/fvrus\\_30802.pdf](http://flowvision.ru/phocadownload/PublicDownloads/Documentation/fvrus_30802.pdf). — Дата доступа: 25.06.2015.
  6. Низов М.А. Проблемы международных автомобильных перевозчиков России / М.А. Низов // Автомобильная промышленность. 2007. № 6. — С. 2...5.
-