

М.С. Высоцкий, академик НАН Беларуси,
С. В. Харитончик, к. т. н.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

В.А. Бабенко, д. ф.-м. н., Т.А. Баранова,

Ю.В. Жукова, к. ф.-м. н., А.Д. Чорный, к. ф.-м. н.

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,

Минск

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ МАГИСТРАЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА

Работа является продолжением исследований по аэродинамике магистральных автопоездов [1], в которой проведено численное моделирование аэродинамики магистрального автопоезда МАЗ с учетом рельефа днища, вращения колес и движения дороги относительно автопоезда, что позволило выявить основные проблемные зоны вихреобразования. Для режимов движения при различных скоростях рассчитанная величина коэффициента аэродинамического сопротивления практически постоянна и составила 0,76. Данное значение находится в пределах указанных в литературе коэффициентов сопротивления современных зарубежных аналогов автопоездов. Полученные результаты могут быть использованы при проведении работ не только по аэродинамической оптимизации как всей конструкции автопоезда, так и внешних аэродинамических устройств и кабины прицепного автопоезда в отдельности

Введение

Большая площадь фронтальной проекции и прямоугольная плохо обтекаемая форма кузова автотранспортных средств (АТС) способствуют возникновению значительного аэродинамического сопротивления. Данный факт особенно важен, если учесть, что современная перевозка грузов связана с большими скоростями, влияющими на рост сопротивления. Максимальная площадь фронтальной проекции таких АТС, как седельный автопоезд или грузовой автомобиль с прицепом, ограничена соответствующими национальными и международными стандартами. Размеры кузовов грузовых автомобилей, прицепов и полуприцепов значительно превышают размер кабины автомобиля. Различие их высот, в частности, оказывает отрицательное влияние на условия обтекания воздухом всей конструкции автопоезда при его движении. Обычно прицепы и полуприцепы превышают тягач как по высоте, так и по ширине и

нарушают безотрывное аэродинамическое обтекание всей системы «седельный тягач — полуприцеп» или «грузовой автомобиль — прицеп».

Иным фактором, ухудшающим аэродинамические свойства рассматриваемых АТС, является широкий зазор между грузовым автомобилем и прицепом или между кабиной седельного тягача и полуприцепом. При движении в зазоре возникает сильное завихрение, вызывающее срыв воздушного потока, в особенности при боковом ветре. В настоящее время уделяется повышенное внимание улучшению аэродинамических характеристик седельных автопоездов или грузовых автомобилей с прицепами, поскольку без существенных изменений в конструкции обтекаемых поверхностей АТС можно заметно уменьшить расход топлива (таблица 1), что очень важно для сокращения затрат на транспортировку грузов [1, 2]. Как показывают исследования, перекрытием зазоров между различными по высоте кабиной и кузовом при одновременном улучшении формы кузова можно снизить аэродинамическое сопротивление на 48 %. Однако на практике этот максимум недостижим. У обычного седельного автопоезда коэффициент общего аэродинамического сопротивления C_d как величины, характеризующей суммарное сопротивление давления C_p и трения C_f , составляет 0,8. Установка аэродинамического обтекателя на крыше кабины улучшает эту величину до 0,56, а полное перекрытие всех зазоров, устраняющее очаги завихрений, — до 0,48 [1].

В настоящей работе приведены полученные на основе численного моделирования результаты исследования аэродинамического сопротивления прицепного автопоезда. В качестве прототипа такого АТС использовался автопоезд в составе грузового автомобиля МАЗ-534019 и прицепа МАЗ-870102 (рисунок 1).

Математическая модель внешнего обтекания прицепного автопоезда при его движении и ее верификация

Обтекание АТС практически всегда происходит в турбулентном режиме. Поэтому исследование аэродинамики АТС необходимо

Таблица 1 — Зависимость расхода топлива от снижения аэродинамического сопротивления

Скорость, км/ч	Требуемое снижение аэродинамического сопротивления для экономии 1 % топлива
95	2 %
60	3 %
30	6 %



Рисунок 1 — Модель исследуемого автопоезда

производить с привлечением эффективных моделей турбулентности [3, 4]. В данной работе предварительно моделированию автопоезда было проведено сравнение моделей турбулентности с точки зрения их способности прогнозирования аэродинамического сопротивления АТС. Для этого использовалась упрощенная модель АТС — так называемая модель Ахмеда [5]. Таблица 2 демонстрирует сравнение коэффициентов сопротивления, рассчитанных по различным моделям, с данными экспериментов [5]. Использованные модели были сконструированы специально для задач внешнего обтекания, аэрокосмических исследований, а также для прогнозирования характеристик пристеночных течений [3, 4]. Поскольку для них требуется надлежащее разрешение зоны пограничного слоя, модели применялись в сочетании с пристеночными функциями.

Очевидно, что модель Спаларта — Аллмареса и SST- $k-\omega$ модель Менстера дают сопоставимую по величине ошибку прогноза аэродинамического сопротивления и значительно ниже, чем стандартная $k-\omega$ модель (таблица 2). Исходя из данного факта, исследование аэродинамики автопоезда производилось посредством моделирования турбулентного обтекания с помощью уравнений неразрывности и Рейнольдса:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right]$$

Таблица 2 — Сравнение различных моделей турбулентности

Модель	C_p	C_f	C_d	Ошибка
Модель Спаларта-Аллмареса	0.257	0.053	0.31	4 %
Стандартная $k-\omega$ модель	0.277	0.056	0.333	10 %
SST- $k-\omega$ модель Менстера	0.235	0.054	0.289	3 %
Эксперимент [5]	0.241	0.057	0.298	

где $\overline{u'_j u'_j}$ – Рейнольдсовы напряжения, которые замыкаются на основе гипотезы Буссинеска [3, 4]. Для замыкания использовалась SST- $k-\omega$ модель Ментера [3, 4]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \omega k,$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \omega}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{\nu_t} P_k - \beta \omega^2 + (1 - F_1) 2\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Здесь член генерации энергии турбулентности определен, как $\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \omega k)$, где P_k задается выражением:

$$P_k = \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}.$$

Функция смешения F_1 вычисляется, как $F_1 = \tanh(\arg_1^4)$, где справедливы соотношения:

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega \nu}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right], \quad CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10} \right).$$

Турбулентная вязкость вычисляется, как $\nu_t = \min \left(\frac{k}{\omega}, \frac{a_1 k}{|S_{ij}| F_2} \right)$, где

$|S_{ij}| = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$ – модуль тензора скоростей деформации, константа $a_1 = 0,31$, а вторая функция смешения $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$ при

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega \nu}; \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right). \quad \text{Константы модели } \sigma_{k1} = 1.76, \quad \sigma_{\omega 1} = 2.0,$$

$\alpha_1 = 0.5532, \beta_1 = 0.075, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 1.168, k = 0.41, \alpha_2 = 0.4403, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09.$

Процедура подготовки расчета включала в себя адаптацию трехмерной геометрической модели прицепного автопоезда для построения сеток, определение геометрических размеров внешней расчетной зоны и построение расчетных сеток на поверхности автопоезда и во внешней зоне. Поскольку масштабирование модели автопоезда не производилось, расчетная область представляла собой параллелепипед с размерами 21x24x80 м. Эти размеры приняты в зависимости от геометрических размеров исследуемого объекта. Для реализации условий движения автопоезда в неограниченном пространстве внешние границы расчетной области выбраны достаточно далеко от зон возмущения потока. Для повышения точности моделирования сетка на

поверхности корпуса автопоезда выполнена более мелкой с использованием двух типов ячеек — квадратных и треугольных. В остальной части расчетной области применялись сетки с тетрагексагональными и гибридными ячейками. Общая мощность сетки составляла порядка 2 млн. ячеек, что позволяло, с одной стороны, провести моделирование на современном персональном компьютере за допустимое время (около четырех часов), а с другой — повторить геометрию реального автопоезда в необходимых деталях, достаточных для адекватного натурным испытаниям моделирования с учетом вращения колес и движения дороги относительно автопоезда.

Результаты моделирования внешнего обтекания прицепного автопоезда

Моделирование проводилось для движения автопоезда при различных характерных скоростях — от 20 до 90 км/ч. В качестве примера рассмотрим результаты при скорости 80 км/ч. При иных скоростях картина обтекания будет аналогична, за исключением величины исследуемых характеристик (давления, скорости, турбулентной вязкости).

На рисунке 2 показано распределение избыточного давления на поверхности автопоезда при его движении со скоростью 80 км/ч, а на рисунке 3 приведено распределение продольной компоненты скорости в вертикальной срединной плоскости, где отчетливо выделяются зоны торможения потока на лобовых поверхностях кабины, а также кузова автомобиля и прицепа. Здесь значения продольной компоненты скорости уменьшаются (рисунок 3), а давление возрастает (рисунок 2). Отрыв потока на крыше кабины происходит достаточно гладко, форма пограничного слоя монотонно растущая, без завихрений и обратных потоков, интенсивного вихреобразования не наблюдается.

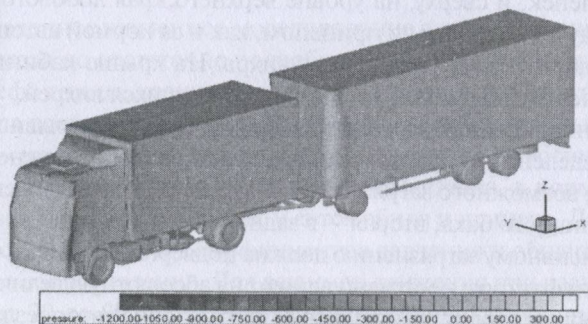


Рисунок 2 — Распределение давления по поверхности автопоезда при его движении со скоростью 80 км/ч

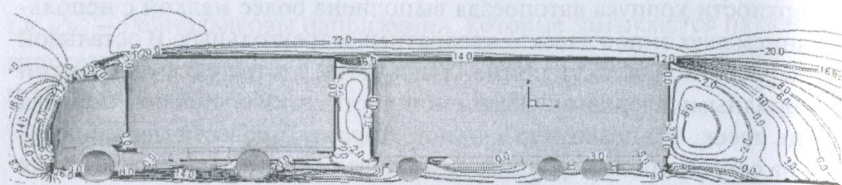


Рисунок 3 — Распределение продольной скорости в вертикальной срединной плоскости при движении автопоезда со скоростью 80 км/ч

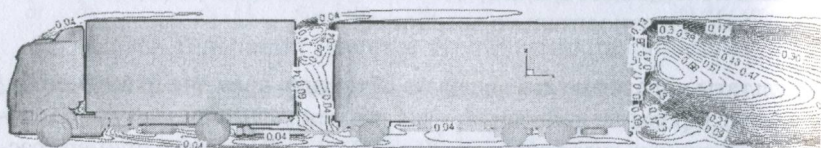


Рисунок 4 — Распределение турбулентной вязкости в вертикальной срединной плоскости при движении автопоезда со скоростью 80 км/ч

Распределение турбулентной вязкости (рисунок 4) является самым точным индикатором интенсивного вихреобразования. Наиболее интенсивное вихреобразование отмечено за кормой автопоезда. Здесь существуют два вихря: один, больший по размеру, размещается от половины высоты и выше, другой, с противоположным направлением вращения воздуха, прижат к задней поверхности в районе номерного знака. Более мелкие вихри создаются вращением каждого из колес. В пространстве между кабиной и кузовом грузового автомобиля вихреобразование практически отсутствует, а вихревая зона организуется внизу между кабиной и кузовом грузового автомобиля. Основные проблемные зоны вихреобразования на поверхности кабины на боковой ее поверхности снизу, на уровне ступенек, и сверху, на уровне верхнего края лобового стекла. В зазоре между автомобилем и прицепом, как и за кормой автопоезда, существует значительный по размеру вихрь. На крыше кабины имеется система относительно мелкомасштабных катящихся вихрей.

Обтекание передней части кузова практически безотрывное. Из анализа распределения скорости и турбулентной вязкости можно отметить также зоны возможного загрязнения. Одна из них расположена выше и правее топливного бака, вторая — в задней части кузова. При этом наиболее интенсивному загрязнению должна подвергаться задняя часть прицепа. Все эти факторы негативно влияют на абсолютную величину и увеличивают общее аэродинамическое сопротивление автопоезда.

Как показано на рисунке 5, коэффициент сопротивления давления C_p и коэффициент общего аэродинамического сопротивления C_d

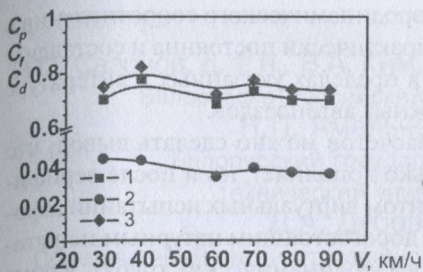


Рисунок 5 — Коэффициенты сопротивления давления C_p (1), сопротивления трения C_f (2) и общего аэродинамического сопротивления C_d (3) в зависимости от скорости движения автопоезда

практически постоянны во всем исследуемом диапазоне скоростей. Значения коэффициента C_d находятся на уровне 0,76, что соответствует данным для автопоездов Scania и MAN [6]. Согласно рисунку 5, коэффициент общего аэродинамического сопротивления C_d почти не отличается от коэффициента сопротивления давления C_p . Как и следовало ожидать, для плохообтекаемого тела, каким является автопоезд в целом, аэродинамическое сопротивление определяется сопротивлением формы, а не трения.

Данный факт находится в соответствии со значениями коэффициента сопротивления трения C_f (рисунок 5). Его величина невелика. Изменение коэффициента сопротивления трения C_f связано с интенсивным вихреобразованием между кузовом грузового автомобиля и прицепом, а также на боковой поверхности кабины, что приводит к пренебрежимо малому коэффициенту сопротивления трения для рассматриваемого автопоезда. Изменение C_f носит немонотонный характер. В диапазоне скоростей 30–60 км/ч коэффициент сопротивления трения падает. Это связано с ростом скорости и уменьшением толщины пограничного слоя.

Выводы

Проведенное численное моделирование аэродинамики прицепного автопоезда по достаточно подробной геометрической модели с учетом рельефа днища, вращения колес и движения дороги относительно автопоезда позволило выявить основные проблемные зоны вихреобразования — на боковой поверхности кабины снизу, на уровне ступенек, и сверху, на уровне верхнего края лобового стекла, в кормовой части прицепа и в зазоре между кузовом автомобиля и прицепа. Данный факт отражается в значениях коэффициентов давления и общего аэродинамического сопротивления. Для режимов движения при различных скоростях (от 20 до 90 км/ч) коэффициент общего аэродинамического сопротивления незначительно отличается от коэффициента сопротивления давления и обусловлен сопротивлением формы. Рассчитанная

величина коэффициента общего аэродинамического сопротивления в диапазоне скоростей 30—90 км/ч практически постоянна и составляет 0,76. Данное значение находится в пределах указанных в литературе значений для современных зарубежных автопоездов.

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что численное моделирование не только дополняет, но и после верификации методик является инструментом виртуальных испытаний аэродинамики АТС, адекватных более дорогостоящим натурным испытаниям [8] и тем более испытаниям в аэродинамических трубах. Кроме того, полученные данные могут быть использованы при проведении работ по аэродинамической оптимизации не только конструкции автопоезда в целом, но и внешних аэродинамических устройств в отдельности. Прежде всего это относится к кабине прицепного автопоезда и зазорам между грузовым автомобилем и прицепом. Установка аэродинамических спойлеров между грузовым автомобилем и прицепом позволит снизить аэродинамическое сопротивление на 15 % [2, 6]. Улучшение обтекания элементов кабины (зеркала, ступени, обтекатель и т. д.) также является очень важным элементом оптимизации, поскольку четверть общего сопротивления прицепного автопоезда составляет сопротивление кабины [1, 2, 6].

Список литературы

1. Евграфов, А.Н. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий. — Минск: Белавтотракторостроение, 2001. — 368 с.
2. Wood, R. Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks / R. Wood, S. Bauer // SAE International Report. — 2003. — № 01-3377. — 18 p.
3. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. — СПб.: Балтийский Гос. технич. ун-т, 2001. — 108 с.
4. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров [и др.]. — СПб.: Судостроение, 2005. — 392 с.
5. Ahmed, S. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake / S.R. Ahmed, G. Ramm, G. Faltin // SAE International Report. — 1984. — № 840300. — 31 p.
6. Kopp, S. The aerodynamic development of the new MAN trucks TGX & TGS / S. Kopp // MAN Nutzfahrzeuge AG Report. — 2008. — № F2008-04-001. — 7 p.
7. Полещук, С.В. Отчет по аэродинамике МАЗ-5440А9 / С.В. Полещук, Д.Н. Сидоренко. — Минск: ИЦ МАЗ, 2008. — 23 с.