

УДК 629.331

ФАКТОРЫ, СВЯЗЫВАЮЩИЕ АЭРОДИНАМИКУ АВТОМОБИЛЯ С ЕГО ВНУТРЕННЕЙ АЭРОДИНАМИКОЙ

А. П. Петров, к. т. н., доц. / Курганский государственный университет

Аэродинамическое сопротивление легкового автомобиля складывается из нескольких частей, и достаточно большая доля в нём связана с прохождением воздуха через его внутреннее пространство. Этот воздух в первую очередь необходим для обдува радиатора системы охлаждения двигателя. По некоторым данным, эта доля аэродинамического сопротивления легкового автомобиля может составлять 10 % [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Аэродинамическое сопротивление, связанное с внутренними потоками воздуха, — наименее изученная область аэродинамики автомобиля. В публикациях часто встречается механистическое представление о влиянии внутренних течений на аэродинамическое сопротивление автомобиля, которое основано на законе сохранения количества движения [1]. При этом отмечается, что прохождение воздуха внутри автомобиля приводит к изменению внешнего потока, но считается, что это второстепенный фактор, который можно игнорировать. Такое представление о влиянии внутренней аэродинамики на внешнюю приводит к не совсем адекватной интерпретации результатов некоторых аэродинамических исследований и неправильному представлению о принятии мер по снижению аэродинамического сопротивления автомобиля. Недооценивается потенциал мер по снижению аэродинамического сопротивления автомобиля.

Иногда высказывается мнение о том, что механизм этого явления находится где-то внутри воздушного тракта автомобиля. Так ли это на самом деле? Если мы говорим о влиянии внутренней аэродинамики на внешнюю, то необходимо рассматривать граничные условия этого взаимодействия. Взаимодействие внутреннего и внешнего потоков происходит на границе, разделяющей эти потоки, то есть в плоскости воздухозаборных и выпускных отверстий воздушного тракта системы охлаждения и вблизи них [7, 8, 9]. Воздушный тракт необходимо оценивать по расходу воздуха, проходящего через него, а значит, и через радиатор системы охлаждения. В результате проведённых исследований было установлено, что чем больше расход воздуха через

внутренний канал, тем больше доля аэродинамического сопротивления внутренних потоков [9]. Такой подход позволяет напрямую рассматривать только те факторы, которые влияют на аэродинамику автомобиля, с учётом обеспечения заданного расхода воздуха через радиатор системы охлаждения.

Главная причина, вызывающая увеличение аэродинамического сопротивления автомобиля при прохождении внутри него потока воздуха, связана с интерференцией внешнего и внутреннего потоков. Интерференция главным образом наблюдается в передней части автомобиля. На рис. 16 показано распределение давления в продольной плоскости при закрытых 1 и открытых 2 воздухозаборных отверстиях. Как видно из рисунка, при прохождении воздуха через моторный отсек в зоне воздухозаборных отверстий давление снижается. Вследствие того, что часть потока воздуха проходит внутри автомобиля, доля воздуха, проходящего снаружи, уменьшается, поэтому срыв потока и разрежение на кромках капота сверху и снизу также уменьшаются. В связи с этим удельные силы аэродинамического сопротивления f_x , действующие на поверхность кузова, также изменяются. В данном случае удельная сила аэродинамического сопротивления равна $f_x = c_p \cdot \cos(\Theta) \cdot A_e / A$, где $c_p = (p - p_\infty) / \rho V_\infty^2 / 2$ — коэффициент давления; Θ — угол между нормалью к поверхности капота в точке измеренного давления и продольной осью автомобиля; A_e — площадь участка поверхности приложения силы аэродинамического сопротивления; A — площадь миделя автомобиля; p — давление на поверхности капота; p_∞ — нормальное статическое давление; ρ — плотность воздуха; V_∞ — скорость движения автомобиля. Последствия прохождения воздуха через моторный отсек можно оценить, сравнивая силы, действующие на поверхность кузова автомобиля, когда через его внутреннее пространство проходит поток воздуха и когда проход воздуха перекрыт. Для этого используем формулу $\Delta f_x = f_{x2} - f_{x1}$, где f_{x1} и f_{x2} — удельные силы аэродинамического сопротивления, когда нет и когда есть внутреннее течение.

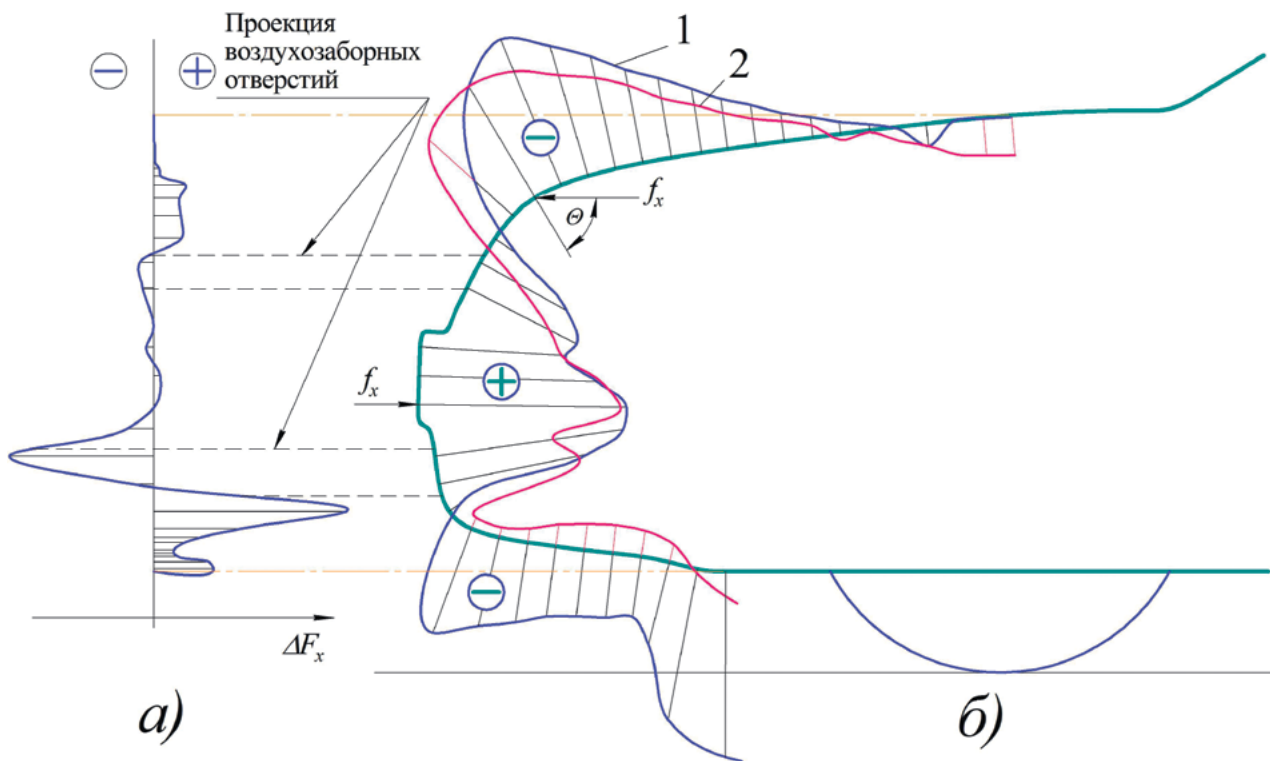


Рисунок 1. Влияние внутреннего потока воздуха на аэродинамику автомобиля: а — разность сил аэродинамического сопротивления ΔF_x ; б — распределение давления в передней части автомобиля; 1 — внутренний поток отсутствует; 2 — через моторный отсек протекает поток воздуха

Проинтегрировав разность удельных сил аэродинамического сопротивления ΔF_x относительно площади поверхности кузова в проекции вертикальной плоскости, мы получим эпюру разности сил ΔF_x , действующих на переднюю часть автомобиля (рис. 1а). По ней видно, как изменяется сила аэродинамического сопротивления, действующая на переднюю часть автомобиля при прохождении потока воздуха внутри него. Видно, что в проекции воздухозаборных отверстий вектор ΔF_x направлен в сторону движения автомобиля, а на участках изгиба поверхности капота вследствие уменьшения разрежения вектор ΔF_x направлен навстречу движению автомобиля. Результирующий вектор сил аэродинамического сопротивления направлен навстречу движению автомобиля, то есть при прохождении потока воздуха через моторный отсек вследствие интерференции, вызванной этим потоком, аэродинамическое сопротивление автомобиля в значительной мере увеличится. Аналогичная картина будет наблюдаться и в горизонтальной плоскости автомобиля.

Здесь изложено несколько идеализированное представление о влиянии внутренних потоков. В данном случае представлены факты, связанные с обтеканием лишь передней части автомобиля, на самом деле интерференция потоков воздуха наблюдается и дальше вдоль потока. Достаточно большие интер-

ференционные явления наблюдаются под днищем автомобиля, они могут быть настолько большими, что нейтрализуют негативное влияние интерференции на передних панелях автомобиля, но это отдельная тема для исследований [9].

Представленная теория в полной мере объясняет многочисленные результаты экспериментов с различными автомобилями, и даже такие единичные результаты, когда оказывалось, что автомобиль, продуваемый в аэродинамической трубе, имел один и тот же коэффициент аэродинамического сопротивления с открытыми и закрытыми воздухозаборными отверстиями.

Результатом применения механистической теории явилось предположение о том, что можно создать определённые условия для прохождения воздуха через воздушный тракт системы охлаждения, которые приведут к снижению аэродинамического сопротивления автомобиля [1, 13]. В связи с этим рассматривается несколько схем организации воздушного тракта системы охлаждения, где предлагается осуществлять забор воздуха и выпуск его в различных зонах кузова автомобиля [5, 6, 10, 11, 12]. В результате таких изменений, конечно, наблюдается заметное изменение аэродинамического сопротивления автомобиля. При этом игнорируется, что в каждом конкретном случае изменяется расход воздуха и имен-

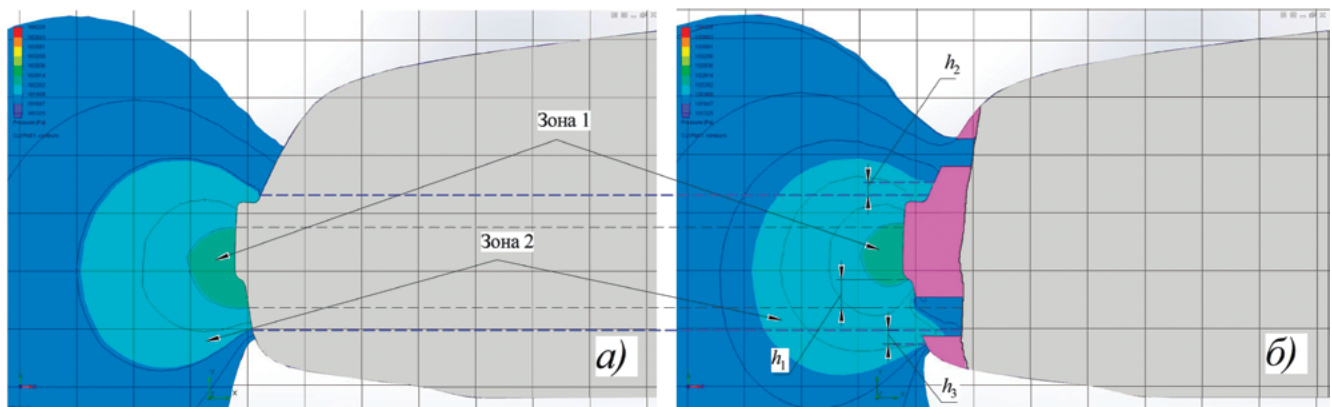


Рисунок 2. Распределение давления в передней части автомобиля: а — воздух через моторный отсек не проходит; б — через моторный отсек проходит поток воздуха

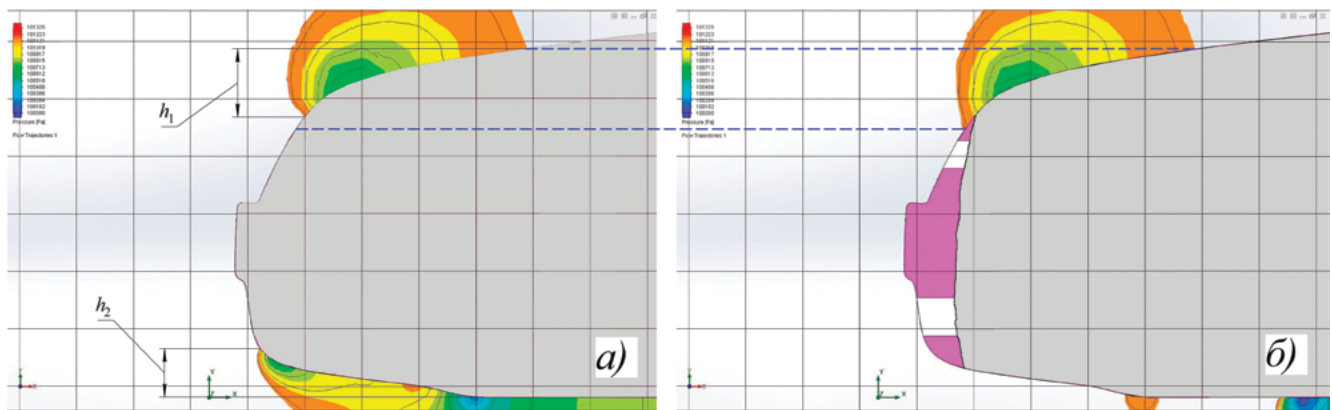


Рисунок 3. Разрезание в передней части автомобиля: а — через моторный отсек воздух не проходит; б — через моторный отсек проходит поток воздуха

но это обстоятельство влияет на c_x . Если взглянуть на все эти схемы с точки зрения интерференционных явлений, то станет ясно, что представленные результаты экспериментов обусловлены изменяющимся расходом воздуха и интерференцией потока воздуха с различными частями кузова автомобиля.

Чтобы понять, какое влияние оказывают внутренние потоки на аэродинамику автомобиля, необходимо исследовать механизм интерференционных явлений. Будем сравнивать результаты обтекания автомобиля в двух случаях: когда через моторный отсек не проходит воздух и когда воздух проходит. На рис. 2 показано распределение давления, которое превышает атмосферное. Это давление действует на передние панели и создаёт силы, направленные навстречу движению автомобиля. На рис. 2а и б зоны одинакового давления имеют одинаковый цвет. Как видно из рисунка, при прохождении воздуха через внутреннее пространство автомобиля картина распределения давления существенно меняется. На линии полного торможения потока, которая расположена в зоне бампера, создаётся самое высокое давление (зона 1). При прохожде-

нии воздуха через моторный отсек размеры этой зоны уменьшаются (на величину h_1), а это значит, что сила аэродинамического сопротивления будет меньше. Это вызвано тем, что часть воздуха из этой зоны движется по пути наименьшего сопротивления, то есть через моторный отсек, поэтому этот воздух удалён из потока, находящегося «выше по течению» вдоль поверхности кузова. Как уже было сказано, при прохождении потока воздуха внутри автомобиля давление в зоне воздухозаборных отверстий также уменьшается. Вместе с тем по периметру воздухозаборных отверстий давление, наоборот, увеличивается, площадь этого воздействия значительная. Как видно, в результате прохождения воздуха через моторный отсек на передних панелях капота возникают такие участки, где давление увеличивается, и такие, где оно уменьшается.

В местах искривления линий капота сверху и снизу поток отрывается, и в этих зонах возникает разрежение (то есть давление ниже атмосферного), поэтому вектор силы аэродинамического сопротивления на этой поверхности направлен в сторону движения автомобиля. На рис. 3 показаны зоны

разрежения на поверхности капота. Как видно, картина распределения разрежения существенно меняется, когда через моторный отсек протекает воздух, особенно это заметно в нижней части капота. Степень интерференции зависит от того, насколько снижается количество воздуха, идущего в обход того или иного участка поверхности автомобиля. На линии полного торможения поток набегающего воздуха разделяется на две части: одна идёт сверху над автомобилем, вторая — снизу. Поскольку через верхнее отверстие проходит небольшое количество воздуха, поток, обтекающий автомобиль сверху, теряет малую часть воздуха, поэтому разрежение на верхней кромке капота изменяется незначительно. Большая часть набегающего потока воздуха проходит через нижнее отверстие, поэтому нижнюю кромку капота обтекает меньшее количество воздуха, вследствие чего разрежение в этой части существенно уменьшается. Поскольку фронтальные проекции приложения сил аэродинамического сопротивления (h_1 и h_2) достаточно велики, аэродинамические силы, действующие на эту поверхность, играют заметную роль, причём эти силы направлены в сторону движения автомобиля. Это значит, что при прохождении воздуха через моторный отсек сила аэродинамического сопротивления, действующая на эту поверхность, возрастает.

ВЫВОДЫ

Воздух, протекающий через моторный отсек легкового автомобиля, способствует созданию дополнительного аэродинамического сопротивления. Механизм этого влияния достаточно сложен. Главная причина, вызывающая это явление, состоит в том, что поток воздуха, проходящий внутри автомобиля, вызывает изменение внешнего потока. В результате этого в тех местах, где уменьшается количество воздуха, обтекающего внешнюю поверхность кузова автомобиля, изменяется давление, а значит, сила аэродинамического сопротивления. Причём силы, действующие на этих участках, могут быть направлены как навстречу движению автомобиля, так и в обратную сторону. Доля аэродинамического сопротивления, связанного с прохождением воздуха внутри автомобиля, главным образом зависит от расхода воздуха через его внутреннее пространство. Конструкция воздушного тракта (внутреннего канала), его отдельных элементов и местного сопротивления тракта прямого отношения к аэродинамическому сопротивлению автомобиля не имеет, но может влиять на расход воздуха через него. Интерференция потоков воздуха зависит от многих факторов: формы элементов передней части авто-

мобиля, размеров и расположения воздухозаборных отверстий, нижнего спойлера, дорожного просвета и т. д.

Действенными мерами по снижению аэродинамического сопротивления автомобиля могут быть рациональное использование набегающего потока воздуха, протекающего внутри автомобиля, и ограничение избыточного поступления воздуха через воздушный тракт системы охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Аэродинамика автомобиля / под ред. В. Г. Гухо. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
2. Hucho W. H. Aerodynamics of Road Vehicles. — 4th Edition. — SAE International, 1998.
3. Williams J. An Automotive Front-End Design Approach for Improved Aerodynamics and Cooling // SAE Technical Paper Series 850281, International Congress & Exposition. — Detroit, Michigan, 1985.
4. Carr G. W. The Influence of Engine Cooling Airflow on Car Performance and Stability // C496/079/95. — IMechE, 1995. — P. 491–498.
5. Baeder D., Indinger T., Adams N., Unterlechner P. Aerodynamic Investigation of Vehicle Cooling-Drags // SAE Technical Paper 2012-01-0170. — 2012.
6. D'Hondt M. Theoretical, Experimental and Numerical Study of the Cooling Airflow and its Effects on the Aerodynamics of Road Vehicles // Engineering Sciences. — Universities Orleans, 2010.
7. Петров А. П. Исследование механизма влияния внутренних потоков воздуха на общую аэродинамику автомобиля // Известия МГТУ «МАМИ». — 2014. — № 1 (19). — Т. 1. — С. 55–62.
8. Петров А. П., Петров К. А. Взаимосвязь внутренней и внешней аэродинамики легкового автомобиля // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров: материалы междунар. науч.-тех. конф. ААИ. — М.: МГТУ «МАМИ». — 2010. — С. 250–257.
9. Петров А. П. Влияние внутренних потоков на аэродинамику легкового автомобиля // Автотракторостроение-2009: материалы междунар. симпозиума. — М.: МГТУ «МАМИ». — 2009. — С. 235–245.
10. Williams J. Aerodynamic Drag of Engine-Cooling Airflow with External Interference // SAE Technical Paper 2003-01-0996. — 2003.
11. Wickern G., Wagner A., Zoerner C. Cooling Drag of Ground Vehicles and its Interaction with Ground Simulation // SAE Technical Paper 2006-01-0339. — 2006.
12. Garrone A., Masoero M. Car Underside, Upperbody and Engine Cooling System Interactions and Their Contributions to Aerodynamic Drag // SAE Technical Paper 860212. — 1986.
13. Аэродинамика автомобиля: сб. статей / под ред. Э. И. Григорука. — М.: Машиностроение, 1984. — 376 с.