

Исследование механизма влияния внутренних потоков воздуха на общую аэродинамику автомобиля

к.т.н. доц. Петров А.П.
Курганский государственный университет
alex_p2@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема, связанная с влиянием внутренних потоков воздуха на коэффициент аэродинамического сопротивления легкового автомобиля. Основная часть потока воздуха, проходящего через внутреннее пространство автомобиля, используется для обдува радиатора системы охлаждения двигателя, при этом аэродинамическое сопротивление автомобиля увеличивается. Исследован механизм этого явления. Установлено, что основным фактором является интерференция потока воздуха обтекающей переднюю часть автомобиля. Она вызвана уменьшением количества этого воздуха, поскольку часть воздуха проходит внутри. Таким образом, доля аэродинамического сопротивления, связанная с прохождением потока воздуха через моторный отсек, зависит от его расхода.

Ключевые слова: коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля, внутренний поток воздуха, система охлаждения двигателя.

Достаточно большую долю в общем аэродинамическом сопротивлении легкового автомобиля имеет сопротивление внутренних потоков. Основная часть потока воздуха, проходящего через внутреннее пространство автомобиля, используется для обдува радиатора системы охлаждения двигателя. По некоторым данным, доля лобового аэродинамического сопротивления легкового автомобиля, связанная с прохождением охлаждающего воздуха через внутреннее пространство легкового автомобиля, может составлять более 10% [1-5]. Сопротивление внутренних потоков - это наименее изученная область аэродинамики автомобиля. В связи с этим существуют взаимно противоположные мнения о механизме влияния этих потоков на аэродинамику автомобиля и высказываются ошибочные точки зрения о мерах по снижению доли этого сопротивления в общем аэродинамическом сопротивлении автомобиля [6-8]. Существует наиболее распространенное предположение о том, что можно создать определенные условия для прохождения воздуха через воздушный тракт системы охлаждения, что приведет к снижению сопротивления. Так, например, предлагается особое внимание уделять воздухозаборным отверстиям (решетке радиатора [1]), снижать сопротивление воздушного тракта и т.д. Предполагается, что может существовать какой-то идеальный воздушный тракт, который позволит снизить влияние внутреннего потока на общую аэродинамику автомобиля [5, 8, 9]. Так ли это на самом деле анализируется в этой статье.

Многочисленные результаты исследований демонстрируют, что при перекрытии поступления воздуха через радиатор системы охлаждения аэродинамическое сопротивление автомобиля уменьшается. Уже этот факт ставит под сомнение вышеперечисленные предположения. Когда перекрывается проход воздуха через воздушный тракт системы охлаждения, коэффициент сопротивления тракта равен бесконечности. Поэтому снижение сопротивления воздушного тракта напрямую никак не может способствовать снижению доли внутреннего потока на общую аэродинамику автомобиля.

Чтобы ответить на вопрос, какое влияние оказывают внутренние потоки на аэродинамику автомобиля, необходимо знать механизм взаимодействия внутреннего и внешнего потоков. Для этого были проведены специальные исследования. Поскольку автомобиль имеет очень сложную геометрическую форму, определить механизм взаимодействия потоков практически невозможно. Поэтому в качестве объекта исследования была использована модель простой геометрической формой.

Исследования проводились с помощью программного модуля Computational Fluid Dynamics (CFD), предназначенного для решения задач аэро- и гидродинамики, в которой применяется метод конечных объемов и нестационарные уравнения Навье-Стокса.

Для проведения исследований была создана трехмерная геометрическая модель. Модель имела цилиндрическую осесимметричную конструкцию (рисунок 1).

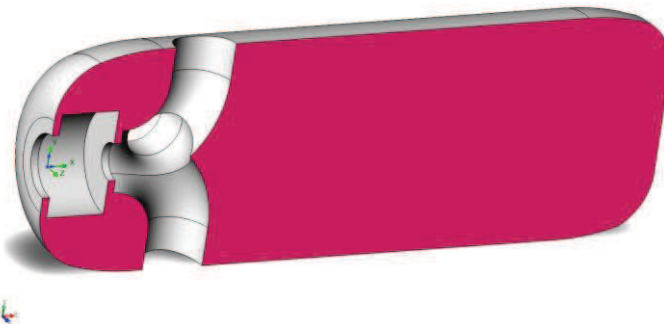


Рисунок 1. Геометрическая модель исследуемого объекта

При построении модели необходимо было выполнить противоречивые требования. С одной стороны, модель должна иметь простую геометрическую форму, для того, чтобы исключить посторонние факторы, влияющие на процесс обтекания модели набегающим воздухом, а с другой стороны, модель должна иметь характерные параметры (которыми обладает реальный автомобиль), определяющие процесс взаимодействия внешнего и внутреннего потоков воздуха. С этой точки зрения внешняя форма модели должна иметь умеренно обтекаемую форму передней и задней частей. Реальный автомобиль имеет определенные скругления при переходе от одной поверхности к другой. Это скругление по линии капота, крыши впереди и сзади и по линии багажника. В этих точках происходит срыв потока и завихрение, сопровождаемое разряжением в этих областях. Немаловажное значение имеет моделирование воздушного тракта для прохождения воздушного потока внутри модели. Воздухозаборник воздушного тракта располагался в головной части модели в области наивысшего давления. Необходимо было найти такое местоположение отверстий для выпуска воздуха, чтобы выявить взаимодействие струи выпускаемого воздуха и потока воздуха, обтекающего автомобиль. При этом необходимо было свести к минимуму влияние потока обтекающего головную часть на вытекающий поток. Еще более важно было снизить влияние струи выпускаемого воздуха на обтекание внешним потоком воздуха кормовой части модели. Для этого выпускные отверстия должны находиться как можно дальше от кормовой части, что также соответствует выпуску воздуха из подкапотного пространства реального автомобиля. Для снижения энергии струи выпуск воздуха осуществлялся через два (четыре) отверстия на боковой поверхности цилиндрической части. Регулирование расхода воздуха через внутреннее пространство модели осуществлялось с помощью изменения сечения диафрагмы, расположенной на перегородке, разделяющей внутреннюю камеру и выпускные каналы.

Для обеспечения автомодельности процесса взаимодействия набегающего потока воздуха с моделью, она имела размеры, соответствующие легковому автомобилю среднего класса. Таким образом, была задана длина. Диаметр модели был выбран в соответствии с размером миделя выбранного автомобиля. Исследования проводились на скорости движения 150 км/ч.

Анализировались три модели: модель с двумя выпускными отверстиями; модель с четырьмя выпускными отверстиями и модель, имеющая увеличенную длину. На рисунке 2 представлены результаты расчетов. Как видно, коэффициент аэродинамического сопротивления c_x всех моделей по мере увеличения расхода воздуха G через внутренний канал существенно возрастает. Точки на графиках при нулевом расходе соответствуют моделям, у которых отсутствовал внутренний канал. Как показал анализ, механизм обтекания модели, не имеющей внутреннего канала, и механизм обтекания объекта с внутренним течением принципиально отличаются друг от друга. Картина обтекания модели (без внутреннего канала) потоком воздуха характеризуется несколькими особенностями (рисунок 3). На передней панели, имеющей плоскую поверхность и расположенную перпендикулярно потоку, образуется область максимального давления. По мере продвижения потока дальше по поверхности модели давление снижается. На кромке перехода двух сферических поверхностей происхо-

дит срыв потока и возникает разряжение. По мере смещения к цилиндрической части модели разряжение уменьшается. В кормовой части при переходе от цилиндрической поверхности к сферической вновь наблюдается срыв потока воздуха и разряжение. На задней поверхности модели возникает определенное разряжение. Именно разность давлений, действующих на обтекатель и кормовую часть, приводит к возникновению так называемого аэродинамического сопротивления давления или сопротивления формы. Кроме этого, на модель действует поверхностное сопротивление, т.е. сопротивление трения.

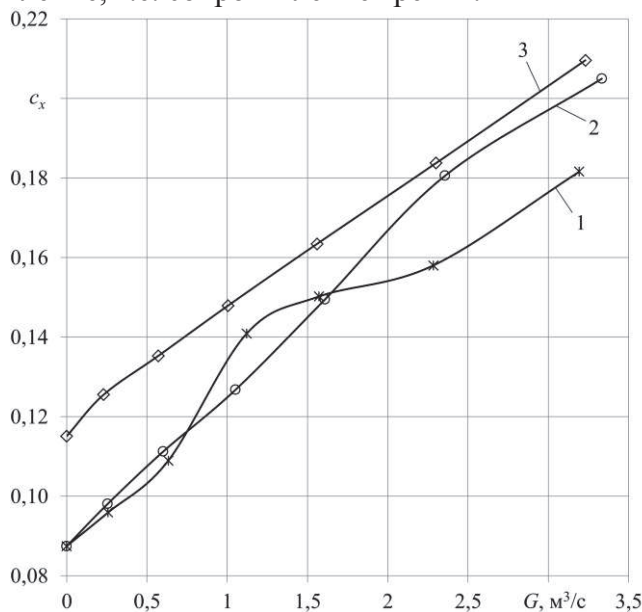


Рисунок 2. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления моделей от расхода воздуха через внутренний канал: 1 – модель с двумя выпускными отверстиями; 2 – модель с четырьмя выпускными отверстиями; 3 – модель, имеющая увеличенную длину

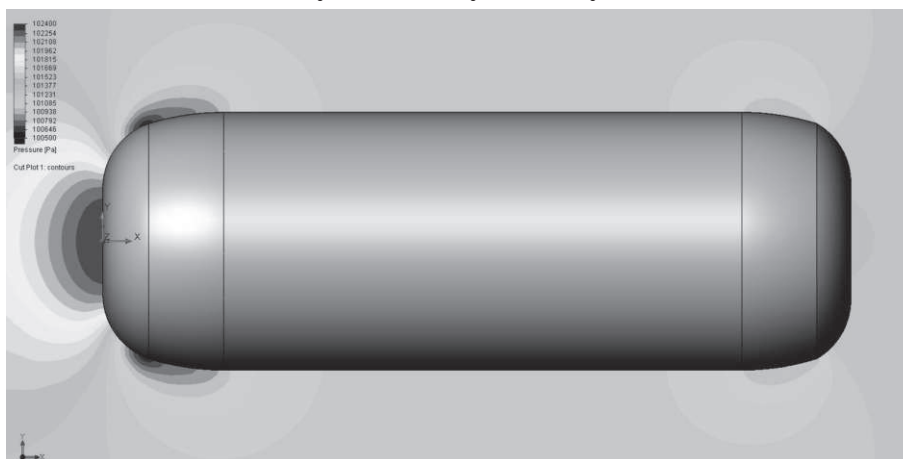


Рисунок 3. Картина обтекания модели, не имеющей внутреннего канала

Картина обтекания моделей с внутренним каналом принципиально отличается от вышеописанной. Вначале рассмотрим процесс обтекания головной части. Поскольку часть воздуха идет через внутренний канал, давление в области воздухозаборного отверстия снижается (рисунок 4). У модели без воздушного тракта зона полного торможения воздуха находится на оси обтекателя. В этой точке поток разделяется и обтекает модель со всех сторон, а у моделей, у которых воздух идет через внутренний канал, зона полного торможения смещается от центра к кромкам воздухозаборного отверстия. Эта кольцеобразная зона вокруг воздухозаборного отверстия, на которой происходит разделение потоков. Часть потока идет внутри модели, а остальная часть обтекает модель снаружи со всех сторон. Торможение потока в этой зоне происходит из-за искривления линий тока. На рисунке 5 видно, что струя воздуха перед воздухозаборным отверстием больше по диаметру, чем само отверстие, поэтому при

входе в отверстие струя деформируется. Таким же образом деформируются струйки, обтекающие модель снаружи. Поскольку часть потока воздуха идет внутри модели, эта часть воздуха не попадает на головной обтекатель. Уменьшение количества воздуха, обтекающего наружную поверхность, приводит к тому, что отрыв потока от поверхности обтекателя и разряжение в этой зоне становятся меньше, чем при обтекании модели без внутреннего канала (рисунок 4). В результате этого сила аэродинамического сопротивления, действующая на переднюю часть, в значительной степени возрастает (рисунок 6).

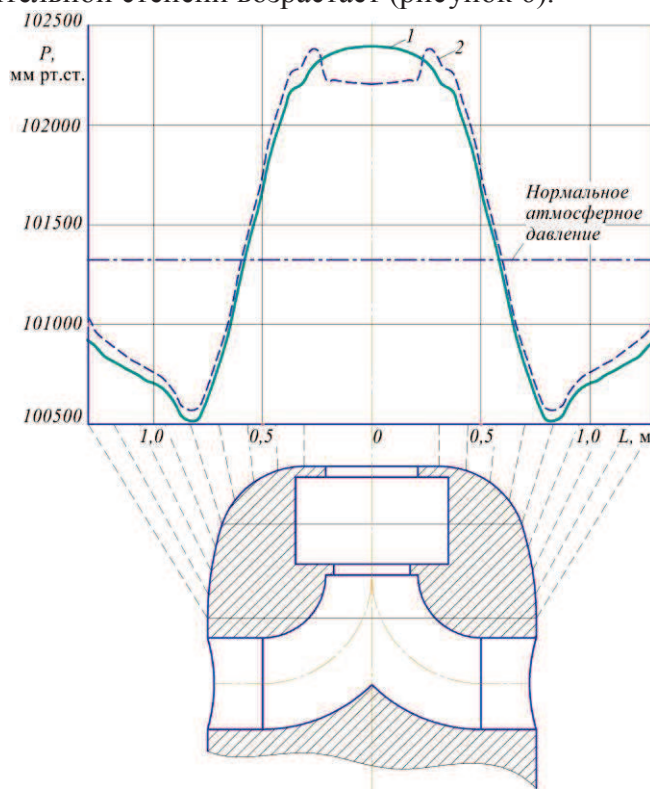


Рисунок 4. Распределение давления по поверхности головного обтекателя: 1 – модель без внутреннего канала; 2 – модель с внутренним каналом

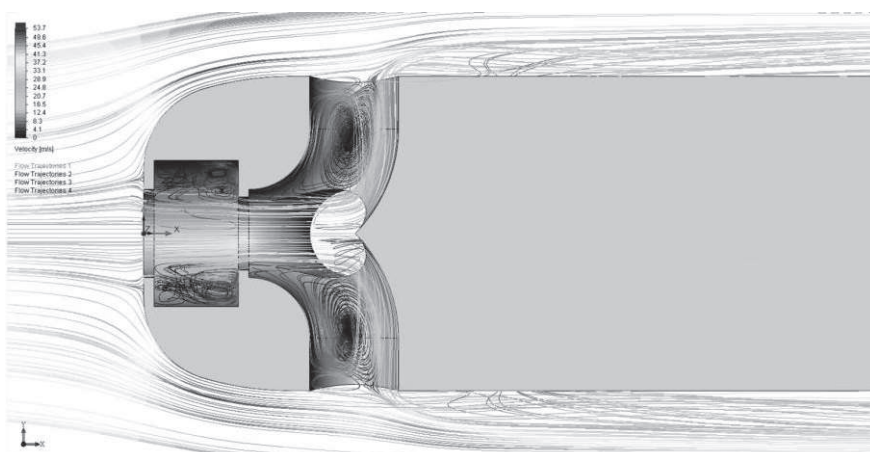


Рисунок 5. Траектории струек потока воздуха, обтекающих модель при наличии внутреннего течения

Поток воздуха, выходящий из выпускных отверстий, также оказывает немаловажное влияние на обтекание моделей. На выходе струя вытесняет поток, обтекающий модель снаружи, и он вынужден изменить траекторию, этот след остается до кормы. В этом месте струя разрушает ламинарный слой внешнего потока, и вследствие этого несколько снижается сопротивление трения. Поток воздуха, выходящий из выпускных отверстий, в существенной мере изменяет картину течения воздуха в кормовой части, результаты этого хорошо видны на рисунке 7. Модель 3 в отличие от остальных имеет увеличенную в два раза длину. Возду-

хозаборные отверстия у этой модели находятся на большом расстоянии от кормы, поэтому струи воздуха, выходящие из выпускных отверстий, практически не оказывают влияние на течение воздуха в кормовой части, что нельзя сказать о моделях 1 и 2. Именно это обстоятельство приводит к тому, что графики 1 и 2 на рисунке 2 отличаются по форме. Изгибы кривых на графиках 1 и 2 обусловлены процессами, связанными с влиянием струй воздуха, выходящих из выпускных отверстий. Они в противофазе совпадают с изгибами кривых на графиках 1 и 2 на рисунке 7. Можно выделить три режима этого процесса. Первый режим происходит при небольших расходах воздуха через воздушный тракт. При этом струи воздуха, выходящие из выпускных отверстий, имеют небольшую энергию и не могут преодолеть воздействия потока, обтекающего модель снаружи. Поэтому, достигая корму, оба потока перемешиваются и от струй, выходящих из выпускных отверстий, почти не остается следа. При увеличении расхода воздуха струи, выходящие из выпускных отверстий, достигают кормовой части и экранируют проникновение основного потока воздуха к периферийным зонам кормы. Вследствие этого в этих зонах еще больше повышается разрежение, которое приводит к увеличению аэродинамической силы, действующей на корму, и к увеличению коэффициента аэродинамического сопротивления (рисунки 2 и 7).

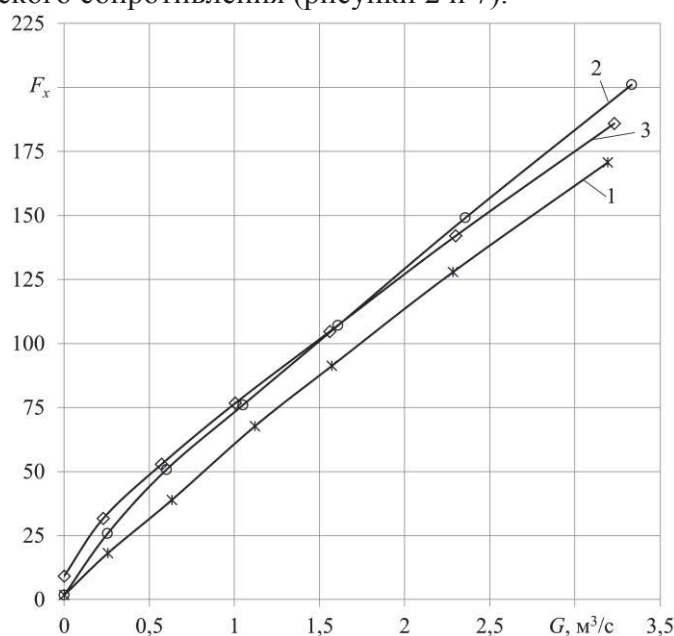


Рисунок 6. Зависимость силы аэродинамического сопротивления передней части моделей от расхода воздуха через внутренний канал (обозначения соответствуют рисунку 2)

Это особенно сильно проявляется у модели 1 (первая точка перегиба). У модели 2 этот эффект наступает при большем расходе. Это связано с тем, что энергия выходящего воздуха распределена уже между четырьмя отверстиями. Энергия струи каждого отдельного отверстия будет меньше, и они в меньшей степени экранируют внешний поток. Третья фаза у модели 1 характеризуется тем, что струи воздуха, выходящие из выпускных отверстий, имеют высокую энергию и отрываются от поверхности модели. В результате этого внешний поток воздуха имеет возможность обогнуть струи выходящего воздуха и у кормы замкнуть разрыв. Таким образом, при больших расходах воздуха через воздушный тракт обтекание кормы происходит примерно так же, как у модели без внутреннего канала. У модели 2 даже при больших расходах этот режим слабо выражен.

Используя результаты исследований обтекания рассматриваемых моделей, можно проанализировать механизм взаимодействия потока воздуха, обтекающего автомобиль, и потока, проходящего внутри него. Нельзя сказать, что эти процессы абсолютно идентичные, но многие из них имеют одну и ту же природу. В результате этих исследований было установлено, что доля аэродинамического сопротивления внутреннего течения на общее аэродинамическое сопротивление моделей и автомобилей зависит от расхода воздуха через воздуш-

ный тракт. При этом абсолютно очевидно, что конструкция и сопротивление воздушного тракта напрямую не влияют на лобовое аэродинамическое сопротивление автомобилей. Расход воздуха - это заданный параметр, который необходимо обеспечить для охлаждения на всех режимах эксплуатации, причем не имеет значения, за счет чего этот расход обеспечивается: за счет набегающего потока воздуха или за счет вентилятора. Поэтому, каким бы ни было сопротивление воздушного тракта, включая воздухозаборные отверстия, радиатор и т.д., заданный расход воздуха должен быть обеспечен. В этом случае необходимый расход воздуха обеспечивается за счет правильного выбора конструкции и размеров воздухозаборных отверстий, их местоположения на передней панели, за счет производительности вентиляторной установки и т.д.

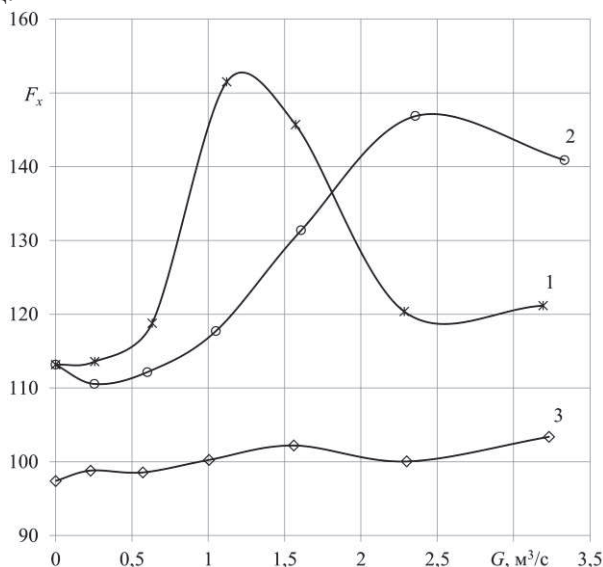


Рисунок 7. Зависимость силы аэродинамического сопротивления задней части моделей от расхода воздуха через внутренний канал (обозначения соответствуют рисунку 2)

Таким образом, получается, что главной причиной, вызывающей увеличение аэродинамического сопротивления автомобиля при прохождении внутри него воздушного потока, является интерференционное сопротивление. Интерференция возникает вследствие того, что часть потока воздуха вынуждена идти внутри автомобиля, а значит, уменьшается количество воздуха, обтекающего некоторые части кузова автомобиля. Для обеспечения работы системы охлаждения двигателя легкового автомобиля существенная часть от общего потока воздуха, обтекающего переднюю часть автомобиля, идет через внутреннее пространство автомобиля. Эта доля может варьироваться в достаточно широких пределах. Если рассматривать современные тенденции развития автомобилей, то эта проблема становится все более актуальной, поскольку растет удельная мощность двигателей. Кроме того, кондиционирование воздуха является практически штатной опцией, поэтому для охлаждения требуется большее количество охлаждающего воздуха [10].

Основываясь на проведенных исследованиях, сравним картину обтекания автомобиля при наличии и отсутствии внутреннего потока (рисунок 8). При движении автомобиля набегающий поток воздуха обтекает его с разных сторон. В том случае, когда часть потока воздуха проходит внутри автомобиля, уменьшается количество воздуха, обтекающего автомобиль снаружи. Наибольшие изменения наблюдаются в передней части автомобиля.

В результате прохождения воздуха внутри автомобиля, в районе нижнего воздухозаборного отверстия давление снижается и, наоборот, вследствие торможения потока при входе вокруг воздухозаборных отверстий давление возрастает. В связи с тем, что снижается количество воздуха, идущего вверх и вниз, уменьшается разрежение на верхней передней кромке капота, то же самое наблюдается на нижней кромке. Изменяется картина обтекания капота и в горизонтальной плоскости. Аналогичным образом уменьшается разрежение по боковым кромкам капота. Вследствие этого увеличивается аэродинамическое сопротивление

автомобиля.

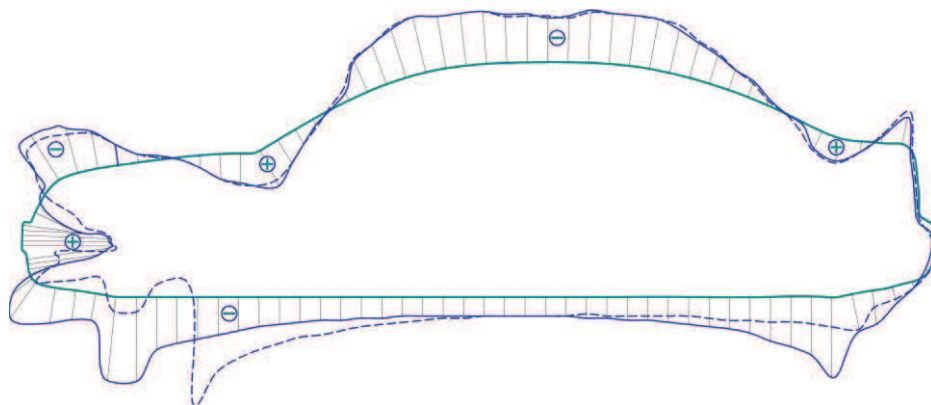


Рисунок 8. Распределение давления на поверхности модели автомобиля в продольной плоскости, сплошная линия соответствует модели автомобиля без воздушного тракта, пунктирная линия соответствует модели с расходом воздуха через подкапотное пространство $1,6 \text{ м}^3/\text{с}$

Значительные изменения происходят при обтекании нижней части автомобиля. В данном случае наблюдаются два взаимно противоположных явления. С одной стороны, уменьшается разрежение в нижней части, что ведет к увеличению общего аэродинамического сопротивления автомобиля. С другой стороны, струя воздуха, вытекающая из воздушного тракта в подднищевую зону, создает экранирующий эффект, который снижает количество воздуха, проходящего под автомобилем. Этот фактор способствует некоторому снижению аэродинамического сопротивления.

Как видно, картина обтекания передней части автомобиля во многом аналогична картине обтекания цилиндрической модели при прохождении внутри них потока воздуха, результат такого обтекания аналогичен. В первом и во втором случае интерференционные процессы являются главной причиной увеличения общего аэродинамического сопротивления под воздействием внутреннего потока воздуха. Обтекание задней части этих моделей разное. Дело в том, что при обтекании модели автомобиля интерференционное влияние внутреннего потока распространяется на небольшую глубину вдоль потока, поскольку автомобиль имеет достаточно сложную форму и при взаимодействии с разными частями кузова автомобиля потоки разрушаются и перемешиваются. Исключением является прохождение потока под днищем автомобиля. Это обусловлено общим снижением расхода воздуха в подднищевом пространстве.

Выводы

7. Основной причиной, вызывающей увеличение аэродинамического сопротивления легкового автомобиля вследствие прохождения воздуха внутри автомобиля, является интерференционное сопротивление. Интерференционные процессы во внешнем потоке вызваны уменьшением количества воздуха обтекающего капот снаружи, в том числе в подднищевой зоне. Уменьшается разрежение (увеличивается давление) в этой области. Сила аэродинамического сопротивления, действующая на поверхность капота, в этих зонах увеличивается.
8. В проекции воздухозаборных отверстий давление уменьшается, но вокруг них увеличивается [11].
9. Выход воздуха из подкапотного пространства создает дополнительную интерференцию потоку, протекающему под днищем автомобиля [12].
10. Интерференция зависит от формы передней части капота автомобиля.
11. Чем больше расход воздуха через внутреннее пространство автомобиля, тем больше доля аэродинамического сопротивления внутренних потоков.

Представленная теория полностью согласуется со всеми результатами, представленными в различных публикациях, а значит объясняет причины высоких значений доли аэродинамического сопротивления внутренних потоков в общем сопротивлении автомобилей,

большого разброса этих значений для разных автомобилей и т.д.

Рекомендации

Основываясь на представленных выводах, можно сделать следующие рекомендации:

- 1) не следует допускать избыточного поступления охлаждающего воздуха: необходимо выбрать оптимальные размеры воздухозаборных отверстий; необходимо определять оптимальный баланс между степенью использования набегающего потока воздуха и вентилятора, в первую очередь с энергетической точки зрения; необходимо регулировать поступление охлаждающего воздуха с помощью принудительных систем, вплоть до полного закрытия (Ford Mondeo EConetic 2011);
- 2) необходимо обеспечить эффективное использование набегающего потока воздуха: не допускать проникновения воздуха в обход радиатора; принять меры по снижению неравномерности поля скоростей воздуха по фронту радиатора [13, 14]; использовать вентиляторную установку с клапанами принудительного управления, для обеспечения эффективного использования набегающего потока и вентилятора [15].

Литература

1. Аэродинамика автомобиля/ под ред. Гухо В.Г. 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, pages 491-498.
5. Baeder D., Indinger T., Adams N., and Unterlechner P. Aerodynamic Investigation of Vehicle Cooling-Drag, SAE Technical Paper 2012-01-0170, 2012, doi:10.4271/2012-01-0170.
6. Marion D'Hondt1 and Patrick Gilliéron, Aerodynamic drag and flow rate through engine compartments of motor vehicles, 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference 28 June - 1 July 2010, Chicago, Illinois.
7. Williams, J., Aerodynamic Drag of Engine-Cooling Airflow With External Interference, SAE Technical Paper 2003-01-0996, 2003, doi:10.4271/2003-01-0996.
8. Wickern, G., Wagner, A., and Zoerner, C., Cooling Drag of Ground Vehicles and Its Interaction with Ground Simulation, SAE Technical Paper 2006-01-0339, 2006, doi:10.4271/2006-01-0339.
9. Garrone, A. and Masoero, M., Car Underside, Upperbody and Engine Cooling System Interactions-and Their Contributions to Aerodynamic Drag, SAE Technical Paper 860212, 1986, doi:10.4271/860212.
10. Bonis, B., Della Rolle, C., and Bangle, C., Cooling and Aerodynamics Simultaneous Optimization, SAE Technical Paper 910013, 1991, doi:10.4271/910013.
11. Петров А.П., Петров К.А. Взаимосвязь внутренней и внешней аэродинамики легкового автомобиля. Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовки кадров. Материалы международной научно-технической конференции ААИ. М.: МГТУ «МАМИ». 2010. – С. 250-257.
12. Петров А.П. Влияние внутренних потоков на аэродинамику легкового автомобиля. Авто-тракторостроение-2009. Материалы международного симпозиума. М.: МГТУ «МАМИ». 2009. – С. 235-245.
13. Петров А.П. Аэродинамическое сопротивление радиатора в неравномерном потоке воздуха. Известия МГТУ «МАМИ» № 1(15), 2013, т. 1. – С. 158-162.
14. Петров А.П. Влияние неравномерности поля скоростей воздушного потока по фронту пористых объектов на их аэродинамическое сопротивление. «Труды МАИ». Выпуск №70, 2013.
15. Петров А.П. Вентиляторная установка автомобиля с клапанами принудительного управления. Патент на полезную модель № 111196. Заявка № 2011120957, 2011.