

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТУННЕЛЕЙ ВЕНТУРИ НА ПРИЖИМНУЮ СИЛУ БОЛИДА ФОРМУЛЫ 1

Химич Ф.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Ларькин А.Д. – ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье рассматриваются физические механизмы генерации прижимной силы в болидах Формулы 1 через использование туннелей Вентури. На основе уравнений Бернулли и неразрывности потока проводится анализ влияния геометрии каналов на перепад давления. Рассмотрены оптимальные углы схождения и расхождения потока, взаимодействие с пограничным слоем и влияние турбулентного следа колес.

Ключевые слова: аэродинамика, прижимная сила, эффект Вентури, граунд-эффект, уравнение Бернулли, диффузор.

Введение. Основная цель аэродинамики гоночного болида – максимизация прижимной силы (downforce) для увеличения сцепления с трассой, при одновременной минимизации сопротивления воздуха на прямых [1]. За счет увеличения прижимной силы возрастает скорость во время прохождения поворотов благодаря улучшению сцепления резины с трассой. Одним из наиболее эффективных методов достижения этой цели является «эффект земли» (ground effect). «Эффект земли» основан на ускорении потока под днищем болида, что создает зону низкого давления [3]. Физическая аналогия данного процесса наблюдается у птиц, которые летят низко над водой: близость поверхности мешает воздуху хаотично растекаться, что увеличивает эффективность крыла [1].

Основная часть. Работа современных туннелей Вентури в Формуле 1 описывается законами механики жидкости. При движении воздуха через сужающийся канал (горловину туннеля) его скорость должна возрастать, для выполнения уравнения неразрывности:

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (1)$$

где Q – объемный расход, A – площадь поперечного сечения трубки Вентури, V – скорость потока [2].

Согласно принципу Бернулли, для несжимаемого потока (которым считается воздух на скоростях движения болида) рост кинетической энергии сопровождается падением статического давления [1]:

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot V_2^2 - V_1^2 \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха [2].

Разность давлений между атмосферой над болидом и разреженным воздухом в туннелях Вентури порождает прижимную силу. Эффективность этого процесса оценивается коэффициентом давления C_p . В зоне максимального сужения туннеля C_p принимает наиболее низкие отрицательные значения, что свидетельствует о пике прижимной силы [1].

Форма туннеля критически важна для предотвращения отрыва потока. Для эффективной работы системы профиль днища разделен на три функциональные зоны, которые формируют полноценный туннель Вентури:

1 Входная часть (приемник): располагается за передними колесами, благодаря этому осуществляется забор воздуха под днище.

2 Горловина (узкая часть): критическая точка в районе кокпита, где минимальный зазор между днищем и трассой обеспечивает пиковую скорость потока и максимальное разрежение.

3 Диффузор (расширяющаяся часть): область в задней части болида, где происходит контролируемое замедление потока и восстановление давления, что создает эффект

«вытягивания» воздуха из-под всей машины. Конструкция позволяет генерировать прижимную силу с наименьшим лобовым сопротивлением, а форма туннеля критически важна для предотвращения отрыва потока. Исследования показывают, что использование плавных обводов трубы Вентури более эффективно, чем резкие сужения. Коэффициент расхода для Вентури составляет около 0,98, для обычных отверстий до 0,6 [2].

Численное моделирование устанавливает, что для минимизации потерь давления и предотвращения турбулентности оптимальный угол схождения в передней части туннеля должен составлять 18° , а угол расхождения в области диффузора – 6° [2].

Эффективность туннелей Вентури сильно зависит от состояния пограничного слоя – тонкого слоя воздуха, замедляющегося трением о трассу и днище [1]. При слишком малом дорожном просвете пограничные слои смыкаются, вызывая резкую потерю прижимной силы и «дельфинирование» (автоколебания корпуса) [3]. Важен и «грязный воздух» от передних колёс: вращаясь, шина выталкивает турбулентные потоки в стороны, и при попадании в туннели эффективность граунд-эффекта резко падает [3]. Для изоляции туннелей инженеры используют направляющие пластины (strakes) как «воздушные занавески» [3, 4].

Свобода инженеров в проектировании ограничивается регламентом FIA (Federation Internationale de l'Automobile) для обеспечения безопасности. Согласно правилам 2026 года, вся геометрия под днищем должна быть заключена в справочный объем RV-FLOOR-BODY [4]. Важнейший элемент – контрольная планка (Plank) толщиной $10 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$, которая устанавливается вдоль центральной оси [4]. Планка ограничивает минимальный клиренс. В ходе гонки из-за трения об асфальт планка может стираться, если она сотрется более чем на 1 мм, болид будет дисквалифицирован [4]. Это вынуждает команды делать выбор между максимальным разрежением в туннелях и риском контакта планки с трассой.

Заключение. Туннели Вентури один из мощных инструментов управления аэродинамикой. Угол в 18° в передней части туннеля и угол в 6° в области диффузора, а также контроль пограничного слоя позволяют достигать высокой прижимной силы [2]. Высокая чувствительность системы и регламент ставят перед инженерами задачу максимально точной настройки подвески, чтобы стабилизировать воздушные потоки под днищем [3, 4].

Список литературы

1. Katz, J. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed* / J. Katz. – Bentley Publishers, 1995. – 300 p.
2. Singhal, A. *Air Flow Optimization via a Venturi Type Air Restrictor* / A. Singhal, M. Parveen // *Proceedings of the World Congress on Engineering 2013 Vol III*. – London, U.K., 2013.
3. Newey, A. *How to Build a Car: The Autobiography of the World's Greatest Formula 1 Designer* / A. Newey. – HarperCollins Publishers, 2017. – 400 p.
4. FIA 2026 Formula 1 Technical Regulations (Issue 8). – *Fédération Internationale de l'Automobile*, 2024. – 207 p.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF VENTURI TUNNELS ON THE DOWNFORCE OF A FORMULA 1 CAR

Khimich F.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Larkin A.D. – Assistant Professor of the PICS Department

Annotation. The article examines the physical mechanisms of downforce generation in Formula 1 cars through the use of Venturi tunnels. Based on the Bernoulli and continuity equations, the influence of the channel geometry on the pressure drop is analyzed. Optimal flow convergence and divergence angles, interaction with the boundary layer, and the influence of the turbulent wheel wake are considered.

Keywords: aerodynamics, downforce, Venturi effect, ground effect, Bernoulli's equation, diffuser, pressure coefficient.