

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА БЕРНУЛЛИ В АЭРОДИНАМИКЕ БОЛИДА FORMULA-1

*Иванис Павел Владимирович*

*Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Сергеенко В. А.  
(Белорусский национальный технический университет)*

Цель статьи – рассказать о сущности закона Бернулли и применении его при разработке форм аэродинамических элементов болидов Formula-1.

Закон Бернулли играет огромную роль в действиях аэродинамических поверхностей болидов F1. Он является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости (газа).

Согласно закону сохранения энергии, энергия замкнутой системы сохраняется во времени. Проще говоря, энергия не может возникнуть из ничего и не может в никуда исчезнуть, она может только переходить из одной формы в другую. Это выражается формулой:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (газа),  
 $v$  – скорость потока,  
 $h$  – высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости (газа),  
 $p$  – давление.

При рассмотрении относительного движения газа (или жидкости), энергия делится на три части:

- 1) давление в воздухе;

- 2) кинетическая энергия воздуха (энергия движения);
- 3) потенциальная энергия воздуха.

Болид F1, находящийся в неподвижном или подвижном относительно него воздушном потоке, испытывает со стороны последнего давление. В первом случае (когда воздушный поток неподвижен) – это статическое давление; во втором случае (когда воздушный поток подвижен) – это динамическое давление, которое чаще называется скоростным напором.

Статическое давление в струйке воздуха аналогично давлению покоящейся жидкости (вода, газ). Вода в трубе может находиться в состоянии покоя или движения, но в обоих случаях стенки трубы испытывают давление со стороны воды. В случае движения воды давление будет несколько меньше.

Энергия струи воздушного потока в различных сечениях есть сумма кинетической энергии потока, потенциальной энергии сил давления, и энергии положения тела, причем эта сумма – величина постоянная:

$$E_{кин} + E_p + E_n = const . \quad (2)$$

Кинетическая энергия  $E_{кин}$  – способность движущегося воздушного потока совершать работу равна

$$E_{кин} = \frac{mV^2}{2} , \quad (3)$$

где  $m$  – масса воздуха, кг;  $V$  – скорость воздушного потока, м/с.

Если вместо массы  $m$  подставить массовую плотность воздуха  $\rho$ , то получим формулу для определения скоростного напора  $q$ , в  $\frac{Н}{м^2}$ :

$$q = \frac{\rho V^2}{2} . \quad (4)$$

Потенциальная энергия  $E_p$  – способность воздушного потока совершать работу под действием статических сил давления. Она равна

$$E_p = PFS, \quad (5)$$

где  $P$  – давление воздуха,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$F$  – площадь поперечного сечения струйки воздушного потока,  $\text{м}^2$ ;

$S$  – путь, пройденный 1 кг воздуха через данное сечение, м; произведение  $SF$  называется удельным объемом и обозначается  $\nu$ , подставляя значение удельного объема воздуха в формулу (4), получим

$$E_p = P\nu. \quad (6)$$

Энергия положения ( $E_n$ ) - способность воздуха совершать работу при изменении положения центра тяжести данной массы воздуха, при подъеме на определенную высоту и равна

$$E_n = mgh, \quad (7)$$

где  $h$  - изменение высоты, м.

Так как на трассах, где проходят гонки F1, уровень ландшафта обычно меняется не слишком сильно, то последнюю величину (энергию положения) можно принять за константу.

Рассматривая во взаимосвязи все виды энергии применительно к определенным условиям, можно сформулировать закон Бернулли, который устанавливает связь между статическим давлением в струе воздушного потока и скоростным напором. Рассмотрим трубу (рисунок 1) переменного диаметра (1, 2, 3), в которой движется воздушный поток.

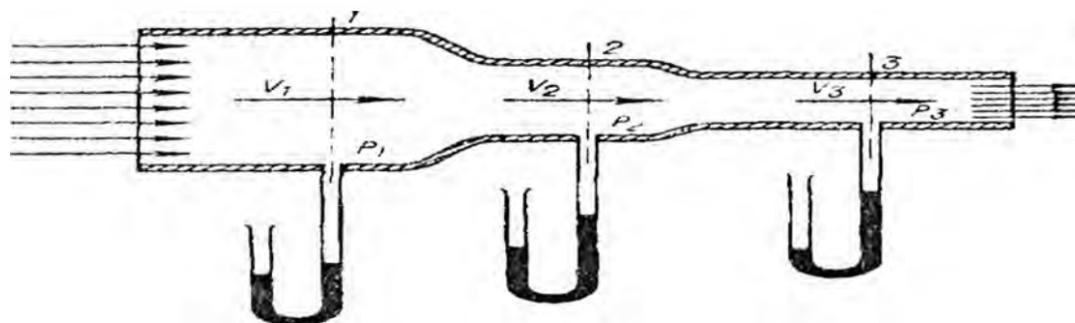


Рисунок 1 – Объяснение закона Бернулли

Если через поперечное сечение  $S_1$  за одну секунду в трубу входит объем воздуха  $v_1 = S_1 \cdot V_1$ , то, очевидно, что через сечение  $S_2$  такой же объем  $v_2 = S_2 \cdot V_2$  воздуха за одну секунду выходит, иначе поток воздуха где-то внутри трубы должен либо расширяться, либо сжаться. Поскольку и то, и другое невозможно, то сказанное справедливо для любого сечения трубы. Следовательно,  $v_1 = v_2 = v_3 = const$ . Иначе говоря, через все сечения трубы за одну секунду проходит одинаковый объем воздуха (закон постоянства секундных объемов)

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 = S_3 \cdot V_3 = const . \quad (8)$$

Поскольку поперечные сечения различны (см. рисунок 1)  $S_1 > S_2 > S_3$ , то и скорости воздуха в разных сечениях не одинаковы:  $V_1 < V_2 < V_3$ .

Для измерения давления в рассматриваемых сечениях используются манометры, одна трубка которых соединена с атмосферой. Анализируя показания манометров (см. Рисунок 1), можно сделать заключение, что наименьшее статическое давление (по сравнению с атмосферным) показывает манометр в сечении 3-3.

Значит, при сужении трубы (увеличивается скорость воздушного потока) статическое давление падает. Причиной падения статического давления является то, что воздушный поток не производит никакой работы (без учета работы сил трения) и по-

этому полная энергия воздушного потока остается постоянной. Значит, в данном случае возможен только переход кинетической энергии воздушного потока в потенциальную и наоборот.

Именно по этой причине передний носовой обтекатель болида, который первым начинает рассекать воздушный поток, имеет зауженную в начале форму (рисунок 2).

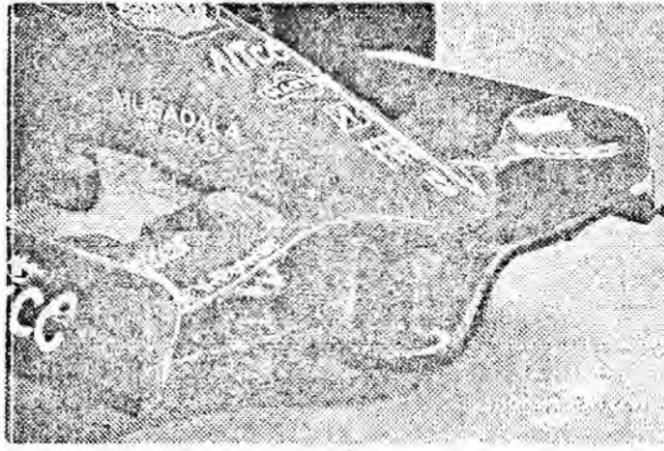


Рисунок 2 - Передний обтекатель болида