

Откуда берется тяга у турбореактивного двигателя

Якубовский Е.Г.

e-mail yakubovski@rambler.ru

Центр тяжести турбореактивного двигателя, самолета, струи и Земли является неподвижным, если не учитывать движение Земли относительно Солнца. Разложим скорости самолета и струи при движении в одной плоскости на два перпендикулярных направления. При движении струи и самолета по одному направлению, Земля движется в противоположном направлении и центр тяжести всей системы неизменен. Но надо сказать, что для создания реактивного горения и выброса струи используется турбулентный процесс. Ламинарный пограничный слой турбулизуется и поток становится турбулентным. Не существует реактивного двигателя с ламинарным потоком. Это следует из рассмотрения квадрата скорости потока, проинтегрированного по замкнутой поверхности, который определяет действующую силу. Квадрат скорости на задней части объема меньше, чем на передней, так как задняя часть турбулентная и ее действительная часть содержит отрицательный квадрат мнимой части турбулентной комплексной скорости. Мнимая часть квадрата скорости приводит к высокочастотному колебанию силы. Без комплексной скорости сила тяги не возникает, так как в случае ламинарного реактивного потока, его скорость больше на задней части, и, следовательно, реактивная сила ламинарного потока направлена по направлению задней части, т.е. ламинарный поток толкает систему по направлению своей скорости. Турбулентный реактивный поток толкает тело в направлении обратном своей средней скорости.

Сила, действующая на тело со стороны реактивного двигателя, определяется по формуле

$$F_i = \oint (p\delta_{ik} + \rho V_i V_k) df_k.$$

Где интеграл берется только по замкнутой поверхности. Так как действительная часть скорости в турбулентном режиме равна константе, то действительная часть силы линейно зависит от квадрата мнимой скорости выходящего потока в двигателе $\text{Re } F_i \sim R_{cr}^2 - (\text{Im } R)^2 < 0$, причем мнимая часть квадрата скорости среды $2iR_{cr} \text{Im } R$ приводит к колебанию силы, с амплитудой равной мнимой части силы. Это приводит к отрицательной силе, обуславливающей действительную тягу двигателя. Чтобы мнимая часть тяги $(\text{Im } R)^2$ была больше действительной тяги R_{cr}^2 критическое число Рейнольдса двигателя должно быть малым. Это означает, что поверхности внутри двигателя должны состоять из материала с большой шероховатостью, тогда критическое число Рейнольдса будет малым $\text{Re } R_i = R_{cr} \ll \text{Im } R_i$, тогда $\text{Re } F_i \sim R_{cr}^2 - (\text{Im } R)^2 < 0$, что обеспечит отрицательную силу, т.е. тягу двигателя. Или лопатки компрессора обеспечивают необходимую шероховатость.

Существует два типа реактивных двигателя. Одни из замкнутого объема выбрасывают струю и по закону сохранения импульса тело движется в противоположном направлении. Центр тяжести струи и тела неподвижен. Поэтому необходима большая начальная масса системы, чтобы получить неизменный центр тяжести у замкнутой системы струя тело. Другие турбореактивные двигатели принимают струю воздуха, нагревают ее до турбулентного состояния, впрыскивая в сжатый воздух топливо и выбрасывают в противоположную сторону. Согласно закону сохранения массы, сколько поступило массы, столько и было выброшено плюс масса топлива. Причем скорость и масса струи из-за ее непрерывности почти не изменилась. Топливо имеет малую массу и не может обеспечить тягу двигателя, центр тяжести системы неизменен. Масса топлива меньше массы самолета, но импульс топлива переходит в импульс Земли, так как струя в

атмосфере тормозится. Центр тяжести у замкнутой системы неподвижен, и Земля движется в противоположном направлении.

Но энергия на образование турбулентного потока расходовалась, и выходящий из двигателя турбулентный газ отличается от входящего. Энергия расходуется на колебание размеров системы, ведь самолет движется по окружности. У выходящего потока более сильные пульсации, за счет чего его энергия больше. Раз энергия газа больше, следовательно он приобрел дополнительную массу по формуле $E = m_{il}c_F^2 / \sqrt{1 - V^2/c_F^2}$, где c_F^2 квадрат фазовой турбулентной скорости звука, где используется присоединенная масса тела в среде m_l . Существование релятивистского знаменателя с фазовой скоростью звука см. в [1]. Причем присоединенная масса растет по мере движения тела как величина $m_{il} = m_l Vt/a$, где a характерный размер тела. Величина расходуемой энергии топлива равна энергии присоединенной массы. откуда определяем мнимую часть скорости потока. Действительная часть скорости соответствует критическому числу Рейнольдса в соответствии с формулой для числа Рейнольдса потока $R = R_{cr} - i\sqrt{T^2\alpha - R_{cr}T}$, где величина T безразмерное давление потока. При условии $T\alpha = R_{cr}$ образуется граница между ламинарным и турбулентным режимом, между действительным числом Рейнольдса и комплексным. Равна эта величина критическому числу Рейнольдса. Таким образом учтем шероховатость поверхности, или влияние лопаток компрессора, которые определяют шероховатость. Критическое число Рейнольдса определяется молекулярной степенью шероховатости и равно $R_{cr} = l/\delta = 1/|da/dz|$, где используется величина, обратная модулю среднего тангенса наклона молекулярной шероховатости $|da/dz|$. В случае лопаток в компрессоре молекулярная шероховатость заменится потоком, обтекающим лопатки и критическое число Рейнольдса определяется модулем среднего значения тангенса наклона радиуса системы $|da/dz|$. Кроме изменения фазовой скорости среды имеется и другой источник энергии

уменьшение действительной части квадрата комплексной турбулентной скорости.

Комплексное значение скорости среды определяет силу тяги по формуле

$$F_i = \oint \rho V^2 df_k = 2 \oint \rho_l c_F^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 + [(\text{Im} V)^2 - (\text{Re} V)^2] / c_F^2}} - 1 \right] df_k$$

Причем на переднюю часть тела действует действительная большая сила, обусловленная действительной скоростью потока $(\text{Re} V)^2$, а на заднюю меньшая сила с мнимой скоростью с добавкой $(\text{Im} V)^2$. Эта величина отрицательная и создает тягу двигателя, направленную против скорости газа в жидкости. Где используется вместо плотности кинетической энергии подставлена его релятивистский аналог. Величина ρ_l это плотность присоединенной массы. Мнимая часть квадрата скорости среды приводит к турбулентному колебанию жидкости и тяги. Отмечу, что влияние нагрева температуры среды и тела учитывает энергия горючего, а влияние лопаток степень шероховатости. Формулы учитывают истинное происхождение возникающей силы, поэтому они упрощаются.

Литература

1. Якубовский Е.Г. По поводу преобразований Лоренца. «Энциклопедический фонд России», 2017, 108 стр. http://russika.ru/userfiles/390_1530060950.pdf