

## Вычисление крутящего момента от системы вращающихся сопел

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

В статье рассмотрен пример работы несущего винта вертолета с реактивным приводом. При этом при этом реактивный момент, вращающий винт создается за счет истечения струи газа поступающего по каналам внутри лопастей через сопла, размещенные на их концах. Рассмотрены различные случаи прохождения газа по этим каналам и получены формулы для расчета, возникающего при этом момента кориолисовых сил, который является моментом сопротивления вращению и который, как показано в статье, необходимо учитывать при проектировании вертолетов аналогичной схемы.

**Ключевые слова:** несущий винт, сопло, канал, сила кориолиса, момент кориолисовых сил.

### Введение

В настоящее время в авиации проявляется стойкая тенденция к возврату к ранее отброшенным, по разным причинам, и, в то же время, перспективным схемам и аэродинамическим формам летательных аппаратов.

Примером одного из таких решений является схема вертолета с реактивным приводом несущего винта. При такой схеме вертолета крутящий момент несущего винта создается силой реакции газов вытекающих из установленных на концах лопастей реактивных двигателей или реактивных сопел.

При таком типе привода несущего винта вертолета отсутствует сложная механическая трансмиссия, которая помимо источника прямых потерь мощности еще и обладает значительной массой. Вторым важным следствием применения данной схемы является практически полное отсутствие реактивного момента на фюзеляже и, как следствие, уменьшение размеров рулевого винта и хвостовой балки. Как результат – повышение весового и аэродинамического совершенства вертолета.

Данный пример отражает общую тенденцию в современной авиационной технике, когда становится возможным применение ранее разработанных технически-эффективных решений.

Схема вертолета с реактивными двигателями на концах лопастей была применена при создании вертолетов «Ariel I» и «Ariel II» компанией SNCASO (1949 г.). Схема вертолета с реактивными соплами на концах лопастей и турбокомпрессором, размещенным внутри фюзеляжа, была применена этой же компанией при создании вертолета SO-1221 "Djinn" (1953 г.). В общей сложности было построено более 170 этой марки [1].

В данном вертолете воздух из турбокомпрессора, приводимого в движение силовой установкой подавался через втулку специальной конструкции и полые лопасти к реактивным соплам расположенным на концах лопастей.

К недостаткам данной схемы можно отнести высокий расход топлива, высокий уровень шума и сложность конструкции лопастей и втулки.

Авторам данной статьи хотелось бы обратить внимание на еще один аспект, связанный с данной схемой привода несущего винта – потерю мощности, связанную с кориолисовыми силами, возникающими при прохождении рабочего тела (воздуха из компрессора) по лопастям от втулки к реактивным соплам.

Данный аспект учитывался при проектировании реактивного привода несущего винта [2], однако только для случая прямолинейного канала постоянного сечения.

В статье рассмотрены различные расчетные случаи, как прямолинейный канал, так и сверхзвуковой канал криволинейной формы. По нашему мнению данная методика оценки окажет несомненную пользу при возможном последующем проектировании вертолетов данной схемы.

### 1. Винт с прямолинейным каналом

Рассмотрим двухлопастной винт у которого из концов лопастей в плоскости вращения вытекают две струи, направленные в противоположные стороны (рис. 1).

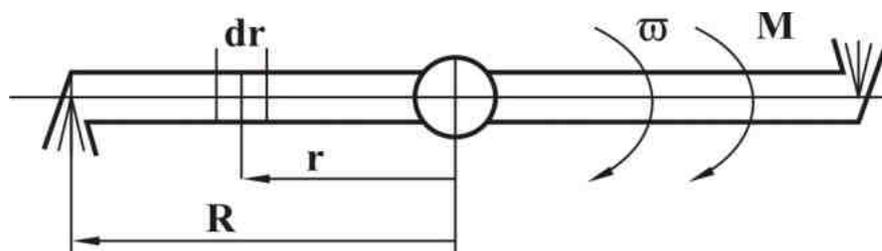


Рис. 1. Прямолинейный канал

Согласно подходу, описанном в монографии А.И. Борисенко [3] для определения давления в газе во вращающейся круговой системе, можно к силам, действующим в абсолютной системе координат, добавить центробежную силу  $\omega^2 r m$ , направленную по радиусу, и кориолисову силу  $2\vec{\omega} \times \vec{V}_r m$ . При таком подходе течение получается стационарным, и давление можно вычислять из уравнения Бернулли. (В отличие от нестационарных задач, в которых необходимо находить производную  $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ , где  $\phi$  – потенциал скорости). В этом случае преобразования становятся менее громоздкими. Момент от суммарной центробежной силы равен нулю, так как эта сила направлена вдоль радиуса, а течение имеет осевую симметрию, поэтому приоритетного радиуса не существует.

Рассмотрим течение несжимаемого газа ( $\rho = const$ ) в прямолинейном канале.  $S$  – площадь сечения канала,  $M$  – суммарный крутящий момент,  $M_c$  – момент от сопел,  $M_k$  – момент от кориолисовых сил. Суммарный момент определяется по формуле

$$M = M_c - M_k. \quad (1)$$

Секундный расход массы (секундная масса) записывается в виде

$$m_s = \rho V_r S. \quad (2)$$

Момент от сопел определяется по формуле

$$M_c = m_s V_c R, \quad (3)$$

где  $V_c$  – скорость газа, вытекающего из сопла, относительно вращающегося среза сопла.

Введены следующие обозначения:  $\vec{j}_k = 2\vec{\omega} \times \vec{V}_r$  – кориолисово ускорение,  $r$  – координата по длине канала вдоль радиуса,  $dr$  – элемент интегрирования,  $dM_k$  – элементарный момент, действующий на отрезок канала длины  $dr$ .  $dm = Spdr$  – масса газа в элементе  $dr$ .

Элементарный момент кориолисовых сил, действующий на него равен

$$dM_k = dmj_k r = Spdr2\omega V_r r = 2\rho V_r S\omega r dr = 2m_s \omega r dr. \quad (4)$$

Момент, действующий на всю лопасть равен, в свою очередь,

$$M_k = 2m_s \omega \int_0^R r dr = m_s \omega R^2 = m_s V_\omega R, \quad (5)$$

где  $R$  – расстояние от оси вращения до среза сопла,  $V_\omega$  – линейная скорость среза сопла во вращательном движении ( $V_\omega = \omega R$ ), поэтому с учётом равенства (2) получим:

$$M_k = m_s V_\omega R. \quad (6)$$

В итоге можно записать выражение для суммарного момента, действующего на лопасть в целом:

$$M = M_c - M_k = m_s V_c R - m_s V_\omega R = m_s R (V_c - V_\omega). \quad (7)$$

Обозначим  $V = V_c - V_\omega$ , где  $V$  – скорость газа, вытекающего из сопла, относительно неподвижного воздуха.

Окончательное выражение для суммарного момента принимает вид

$$M = m_s VR. \quad (8)$$

## 2. Винт с криволинейным каналом

Будем рассматривать показанный на рис. 2 непрерывный канал в лопасти винта. Канал изогнутый, площадь его поперечного сечения  $S = const$ ; плотность газа  $\rho = const$ ;  $l$  – криволинейная координата, имеющая размерность длины и проходящая через центры поперечных сечений канала;  $V_l$  – скорость газа вдоль криволинейного канала;  $S$  – нормальная к координате  $l$  площадь сечения канала.

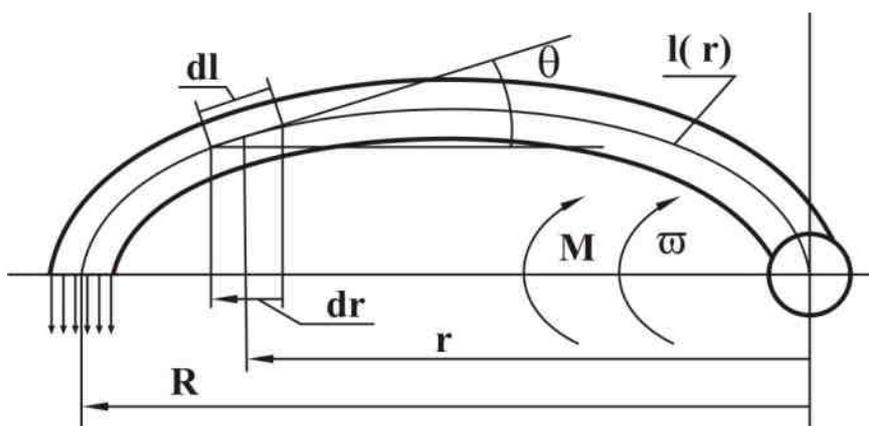


Рис. 2. Элемент канала винта криволинейной формы

Масса газа в элементе канала длины  $dl$ :

$$dm = S\rho dl. \quad (9)$$

Вычислим момент кориолисовых сил и суммарный момент, действующий на лопасть так, как это делалось в случае прямолинейного канала используя формулы (2) - (5):

$$m_s = \rho V_l S, \quad dl = \frac{dr}{\cos \theta}, \quad V_r = V_l \cos \theta,$$

$$dM_k = dm j_k r = S\rho dl 2\omega V_r r = S\rho \frac{dr}{\cos \theta} 2\omega V_l \cos \theta r = (\rho V_l S) 2\omega r dr = 2m_s \omega r dr,$$

Суммарный момент от кориолисовых сил:

$$M_k = 2m_s \omega \int_0^R r dr = m_s \omega R^2 = m_s V \omega R,$$

а суммарный момент, действующий на лопасть:

$$M = m_s V R. \quad (10)$$

Таким образом, у изогнутого канала момент от кориолисовых сил такой же, как и у прямолинейного канала (8), поэтому и суммарный момент определяется по такой же формуле.

### 3. Общий случай канала переменного сечения

Чтобы полностью исследовать изучаемое явление рассмотрим общий случай движения сжимаемого газа в криволинейном канале, имеющем переменную площадь поперечного сечения (рис. 3).

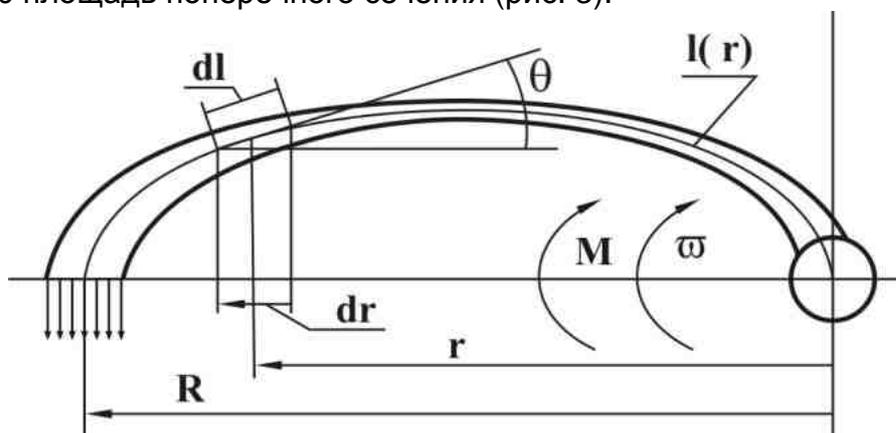


Рис. 3. Случай канала переменного сечения:

- $l$  – криволинейная координата, имеющая размерность длины и проходящая через центры поперечных сечений канала;
- $S$  – площадь нормального к координате сечения канала;
- $\theta$  – угол между координатой и радиусом.

Канал может быть сверхзвуковым, поэтому в нём необходимо предусмотреть сужающуюся дозвуковую часть и расширяющуюся – сверхзвуковую. Обозначения всех параметров в п. 3 такие же, как и в п. 2, но плотность газа и площадь поперечного сечения канала изменяются вдоль радиуса –  $\rho = f(r)$  и  $S = f(r)$ .

Все преобразования, проведенные в пункте 2, и помещенные между формулами (9) и (10) можно перенести на течение, показанное на рис.3.

Следовательно, и в общем случае, суммарный крутящий момент тоже определяется по формуле (10):

$$M = m_s VR.$$

Таким образом результирующая формула для вычисления момента не зависит, в общем случае, от формы канала и характера течения в нем.

### Заключение

В статье рассмотрен общий случай движения газа (в данном случае воздуха) по каналу произвольной формы внутри несущего винта вертолета с реактивным приводом и получена формула для расчета момента кориолисовых сил, возникающих при прохождении потока газа по этому каналу. Это позволяет учесть влияние кориолисовых сил, как сил сопротивления при проектировании вертолетов данной схемы. При этом формула для вычисления суммарного крутящего момента для лопасти не зависит от формы внутреннего канала и скорости движения в нем рабочего тела.

### Список литературы

1. Sud-Ouest SO.1221 "Djinn" [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.aviastar.org/helicopters\\_rus/snias\\_jinn-r.html](http://www.aviastar.org/helicopters_rus/snias_jinn-r.html).
2. Берхли, Ю.Г. Компрессорная система реактивного привода несущего винта вертолета [Текст] / Ю.Г. Берхли. – М.: Оборонгиз, 1969. – 101с.
3. Борисенко, А.И. Газовая динамика двигателей [Текст] / А.И. Борисенко – М.: Оборонгиз, 1962. – 793 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с

Поступила в редакцию 14.06.2016

### Обчислення обертаючого моменту від системи обертаючих сопел

В статті розглянуто приклад роботи несучого гвинта вертольота з реактивним приводом. При цьому реактивний момент, що обертає гвинт, створюється за рахунок витікання повітря, яке подається по каналах всередині лопастей через сопла, розміщені на їх кінцях. Розглянуто різні випадки проходження повітря по даних каналах та отримані формули для розрахунку, виникаючого при цьому моменту кориолисових сил, який є моментом опору обертання лопастей і який, як показано в статті, необхідно враховувати при проектуванні вертольотів аналогічної схеми.

**Ключові слова:** вертоліт, несучий гвинт, сопло, канал, сила кориоліса, момент кориолисових сил.

## **Calculation of Spin Moment of System of Spinning Jet Pipes**

In article the working principles of helicopter rotor with jet reaction drive are considered. In this design the jet moment, rotating the rotor creates by the jet efflux of air through the jet nozzles on the tips of blades of helicopter's rotor. The different design cases of motion of air stream in the channels inside the blades have been considered. The formulas for calculation of Coriolis moment which is resistant one have been obtained. We hope, that theoretical results introduced in this article will be useful for designing of helicopters with rotor with jet reaction drive.

**Keywords:** helicopter, rotor, nozzle, channel, Coriolis force, Coriolis moment.

### **Сведения об авторах:**

**Виктор Васильевич Тюрев** – д-р техн. наук, профессор, проф. каф. 101, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Захаренко Владимир Александрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф 101, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.