



Аппараты вертикального взлёта с реактивно-вихревыми генераторами подъёмной силы



Николай ОСТРОУХОВ
Nikolai N. OSTROUKHOV

Екатерина ЧУМАКОВА
Ekaterina V. CHUMAKOVA



Остроухов Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической электротехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, Россия.
Чумакова Екатерина Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерной математики МАИ, Москва, Россия.

Vertical Take-off Devices with Jet-Vortex Lift Generators

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 53)

Представлено расчётно-теоретическое обоснование возможности реализации качественно новой конструктивной схемы летательного аппарата (ЛА) вертикального взлёта, в котором подъёмная сила инициируется одиночным вихрем над ЛА и вследствие этого перепадом статического давления под и над аппаратом. Проанализированы решения о вихревых течениях воздуха, генерируемых вращающимся диском, и вихрей типа «торнадо», возникающих в атмосфере. Предложены компоновочные схемы аппаратов вертикального взлёта двух типов – с вихревыми и реактивно-вихревыми генераторами подъёмной силы. В обеих схемах предполагается использовать устанавливаемые вертикально бироторные приводные двигатели, в которых вращаются и ротор, и статор, но во взаимно противоположных направлениях.

Ключевые слова: летательные аппараты, вертикальный взлёт, вихревые течения в газах, вихри типа «торнадо», способы генерации вихрей, бироторные турбореактивные двигатели, подъёмная сила.

Цель исследования – оценка (анализ) возможности реализации конструктивных схем летательных аппаратов вертикального взлёта, отличных от единственно используемой в практике – вертолётной, когда подъёмная сила создаётся несущим винтом [1, с. 23].

Актуальность темы объясняется, по меньшей мере, двумя причинами:

- во-первых, схема коптера с несущим винтом, по сути, исключает существенные изменения массогабаритных характеристик аппарата по сравнению с традиционной вертолётной схемой: в частности параметр ωl (ω – угловая скорость вращения винта, l – длина лопасти винта) не может превышать скорости звука в воздухе [2, с. 866];
- во-вторых, из механики сплошных сред [3, с. 295–298] известно наличие в природных условиях сравнительно устойчивых вихревых течений, в том числе одиночных изолированных типа «торнадо» [4, с. 49–51], в которых (во всём объёме вихря) реализуется пониженное статическое давление ($\Delta p = 1/2 \rho v^2$).

При искусственной генерации подобного вихря над ЛА перепад давления под и над аппаратом должен приводить к возникновению подъёмной силы, увеличи-

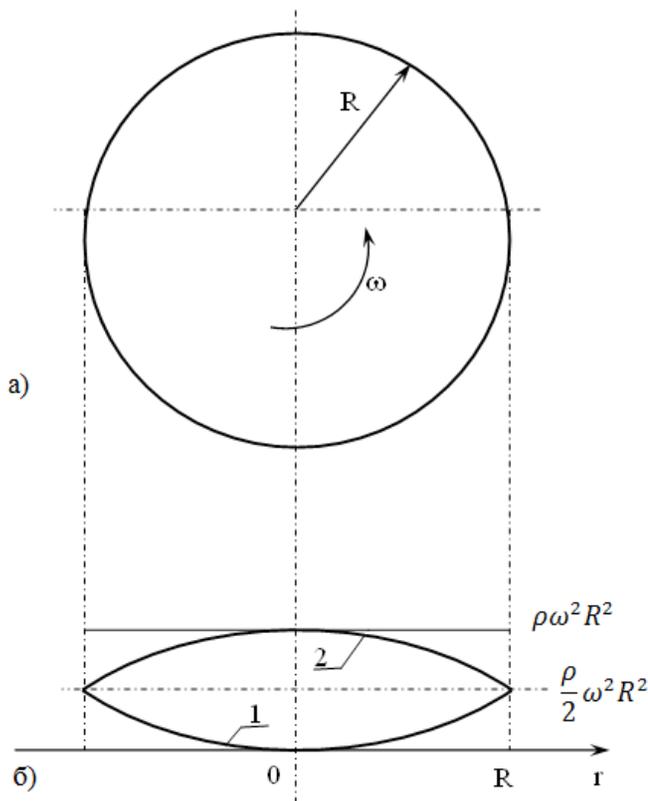


Рис. 1. Иллюстрация к задачам о вихревых течениях: а) диск радиуса R , вращающийся с угловой скоростью ω , б) распределение перепада статического давления по радиусу (1 – на поверхности вращающегося диска, 2 – в вихре типа «торнадо»).

вающейся с ростом размеров вихря и скорости воздуха в нём. То есть генератор одиночного вихря, локализованный над ЛА, представляется перспективным для условий вертикального взлёта. При этом реализация самой идеи сводится в основном к проблеме генерации устойчивого локального вихря, по масштабам сравнимого с размером верхней оболочки ЛА.

1. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА, УВЛЕКАЕМОГО ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИСКОМ

В научной литературе [5, с. 97–100] дано аналитическое решение задачи о течении газа, увлекаемого вращающимся диском. Схематическая иллюстрация задачи представлена на рис. 1.

Диск радиусом R и толщиной $t \ll R$ вращается с угловой скоростью ω (рад/с). Вследствие вязкости диск увлекает в движение прилегающие слои газа, так что в обоих полупространствах, разделённых диском, формируются два трёхмерных течения с отличными от нуля (в цилиндрических координатах) компонентами ско-

рости – радиальной v_r , круговой v_ϕ и осевой v_z и граничными условиями:

- на поверхности диска $z = 0$, $v_\phi = \omega r$, остальные 0;
- на бесконечности $z = \infty$, $v_z = v_r = v_\phi = 0$.

В указанных научных источниках численно решается система уравнений Навье–Стокса для компонент скорости v_z , v_r , v_ϕ и статического давления p .

Граничные условия на поверхности диска позволяют оценить верхнюю границу подъёмной силы, создаваемой вихрем, а именно – статическое давление в точках окружности радиусом r по уравнению Бернулли:

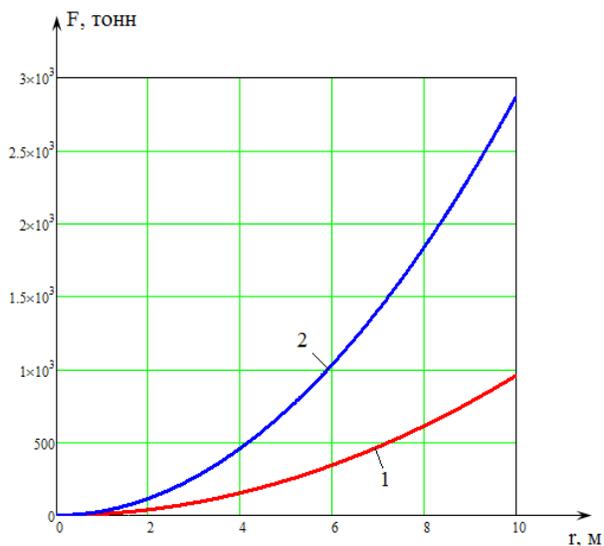
$$p = p_0 - \frac{\rho}{2} v^2 = p_0 - \frac{\rho}{2} \omega^2 r^2,$$

так что $\Delta p = p_0 - p = \frac{\rho}{2} \omega^2 r^2$,

где p_0 – полное давление (покоя).

Если вихрь создаётся лишь с одной стороны диска, то суммарная сила, обусловленная перепадом статического давления между поверхностями диска:

Рис. 2. Зависимость верхней границы подъёмной силы от радиуса диска (1 – верхняя граница подъёмной силы при инициировании вихря вращающимся диском, 2 – вихревая составляющая подъёмной силы, инициируемой вихрем типа «торнадо»).



$$F = \int_0^R \Delta p(r) ds = \pi \rho \int_0^R \omega^2 r^3 dr = \frac{\pi \rho \omega^2}{4} R^4, \quad (1)$$

где $ds = 2\pi r dr$ – кольцевой элемент площади.

При реализации линейная скорость на периферии диска не должна превышать скорости звука, т.е. $\omega R \leq v_{\text{звук}} \cong 300 \text{ м/с}$, и в этом случае:

$$F_{\text{max}} = \frac{\pi \rho v_{\text{за}}^2}{4} R^2. \quad (2)$$

На рис. 2 показана зависимость верхней границы F от радиуса R , рассчитанной по (2). Верхняя граница подъёмной силы, генерируемой диском над ЛА, по меньшей мере не уступает подъёмной силе несущего винта вертолётов традиционной компоновки сравнимых размеров. Одно это обстоятельство оправдывает проводимый анализ, особенно с учётом того, что вихрь, создаваемый вращающимся диском, является простейшим из известных.

Чисто вращательное движение воздуха с окружной скоростью $v_\phi = \omega r$ и равенством нулю радиальной и аксиальной компонент ($v_z = v_r = 0$) реализуется только на поверхности вращающегося диска. По мере удаления от поверхности окружная компонента быстро убывает, а две другие составляющие становятся отличными от нуля, но небольшими по абсолютным значениям. Характерным размером, на котором происходит существенное изменение скорости, является толщина пограничного слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \quad [6], \text{ где } \nu \text{ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, } \omega \text{ – угловая скорость вращения диска, при } \omega \cong 10 \text{ рад/с – } \delta \cong 1\text{--}1,5 \text{ мм.}$$

Из решений, приведённых в [5, с. 97–100; 6, с. 111–113], следует, что уже на расстояниях в 3–5 толщин пограничного слоя скорость воздуха меньше окружных скоростей соответствующих точек диска в несколько раз, так что уменьшение статического давления становится пренебрежимо малым.

Вращающийся диск инициирует вращение газа с обеих сторон (плоскостей), а значит, в случае изолированного диска никакого перепада давления на нём самом не возникает.

Два описанных обстоятельства существенно осложняют техническую реализацию генератора (создание) подъёмной силы только вращающимся диском.

В модели, схема которой представлена на рис. 3, простейшим способом решения названных проблем может стать минимизация зазора между диском и корпусом ЛА. При уменьшении этого зазора до толщины пограничного слоя перепада статического давления на самом диске не будет, но разрежение над диском, а потому и над ЛА сохранится. Причём подъёмная сила будет возникать вследствие перепада давления под и над аппаратом.

Идеальным, предельным случаем уменьшения зазора является вариант, при

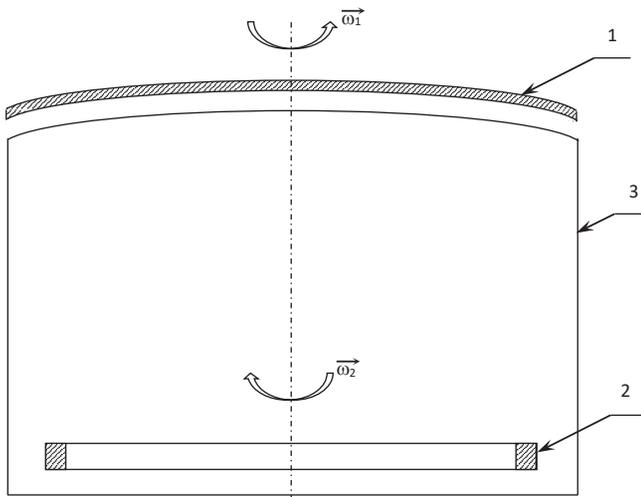


Рис. 3. Модель устройства с дисковым генератором вихря над верхней поверхностью (1 – корпус устройства, 2 – диск-генератор вихря, 3 – маховик-компенсатор кинетического момента).

котором диск вращается вплотную к верхнему днищу корпуса ДА. Однако решение задачи об устранении перепада давления на самом диске порождает не менее сложную инженерную проблему минимизации трения между диском и корпусом ЛА.

На рис. 3 представлена схема модельного устройства, реализующего вихревое течение, создаваемое диском, вращающимся над корпусом устройства. Модель позволяет имитировать различные режимы вращения диска, варьировать зазор между диском и верхней оболочкой корпуса и допускает прямые измерения подъёмной силы, действующей на аппарат.

Модель имеет пустотелый герметичный корпус цилиндрической формы с плоским нижним и плоским или слабо выпуклым верхним днищами. Над верхним днищем установлен диск, радиальный профиль которого повторяет профиль днища. Приводной двигатель (не показанный на рисунке) смонтирован внутри корпуса, его ось вращения ориентирована по вертикали, и он является бироторным, ротор и статор двигателя вращаются во взаимно противоположных направлениях. Вращение одного из них передаётся на диск, второй служит компенсатором кинетического момента.

2. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БИРОТОРНЫЙ «ТОРНАДО»

Из рис. 1б видно, что в вихре типа «торнадо» снижение статического давления значительно больше, чем даже на повер-

ности диска, имеющего одинаковую с вихрем угловую скорость. Поэтому использование «торнадо» для создания подъёмной силы представляется весьма перспективным.

В природе торнадо в средних широтах Земли инициируются локальным снижением атмосферного давления. Возникающие радиальные течения, направленные в зону пониженного давления под действием кориолисовой силы, закручиваются, и в результате формируется квазиустойчивый вихрь с выбросом воздуха через приосевую зону. При искусственной генерации и закрутке потока отбор воздуха из осевой области необходимо осуществлять принудительно. Для решения такой задачи нами предложена комбинация модифицированного турбореактивного двигателя (ТРД) и диска, приводимого во вращение наружной обечайкой ТРД.

На рис. 4 и 5 показаны два эскизных варианта ЛА с описанной схемой.

ЛА содержит корпус 1, выполненный в виде герметичной тонкостенной оболочки, имеющий форму прямоугольной призмы, ось которой ориентирована по вертикали.

Соосно корпусу установлен турбореактивный двигатель 2, общая длина которого от передней кромки воздухозаборника до среза сопла приблизительно равна длине (высоте) летального аппарата.

Внешняя обечайка 3 двумя рядами подшипников качения 6 закреплена или



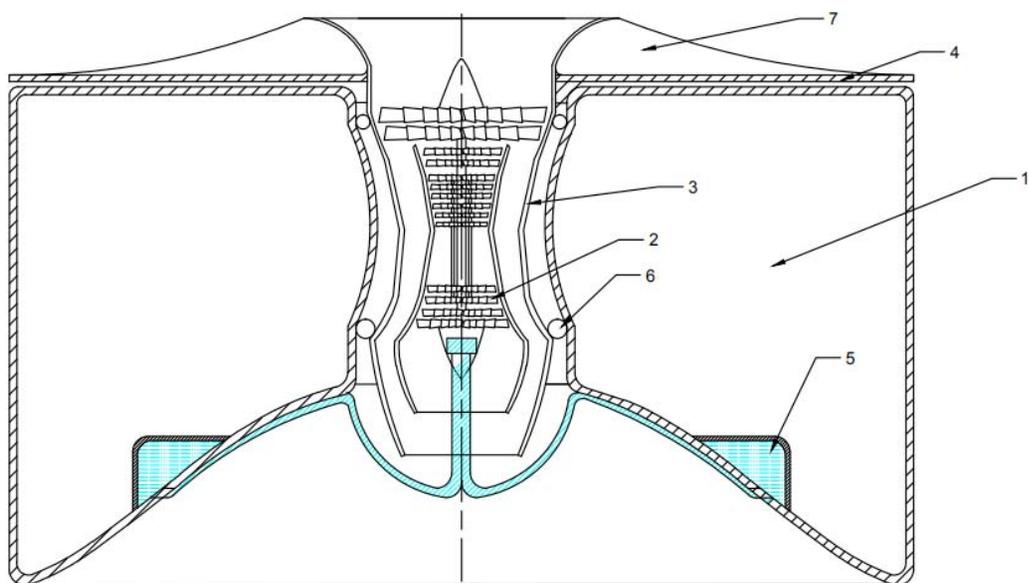


Рис. 4. Схема ЛА с фиксированным расположением диска (1 – корпус ЛА, 2 – ТРД, 3 – наружная обечайка, 4 – вращающийся диск, 5 – топливная ёмкость, 6 – подшипники, удерживающие обечайку, 7 – ребро жёсткости диска).

в корпусе ЛА (общий случай – рис. 4) или в гильзе 8 (рис. 5), которая в свою очередь закреплена в корпусе посредством шарнирно-стержневого узла 9 с возможностью отклонения ТРД от вертикального положения на угол до 15° во всех направлениях (азимутах).

Закрепление ТРД в корпусе ЛА или в гильзе двумя рядами подшипников, с одной стороны, жёстко фиксирует положение двигателя в осевом направлении, а с другой – обеспечивает возможность вращения обечайки вокруг общей продольной оси ТРД в направлении, противоположном вращению его ротора (вентилятора, компрессора и турбины).

На передней кромке внешней обечайки ТРД по периметру воздухозаборного устройства закреплены диск или пластина 4 малой кривизны выпуклостью вверх, являющиеся генератором одиночного вихря над всей поверхностью ЛА.

Толщина диска или пластины составляет $0,5\text{--}1\%$ их радиуса, она выбирается для обеспечения прочности при максимальной скорости вращения обечайки ТРД. Во избежание потери устойчивости, связанной с возможностью возникновения кольцевых упругих колебаний диска, его крепление к обечайке выполнено с использованием рёбер жёсткости 7.

Ширина зазора между нижней поверхностью диска (пластины) и верхней, эквидистантной ей, поверхностью корпуса ЛА не превышает половины толщины диска (пластины). Чем меньше ширина зазора, тем меньше вероятность возникновения в зазоре (за границей пограничных слоёв на диске и корпусе ЛА) течений, снижающих подъёмную силу. Оптимальным является монтаж устройства с минимальной шириной зазора, допускаемой технологией изготовления, в частности переменной по радиусу диска с минимумом вблизи оболочки ТРД.

При описываемой компоновке ЛА подача топлива в ТРД через блок сопел, установленных на наружной оболочке двигателя, невозможна. Сугубо теоретический вариант размещения топливной ёмкости и системы подачи топлива в самой вращающейся оболочке (соответствующей суммарной толщины) практически неприемлем, поскольку предполагает, во-первых, устройство полости значительного объёма в самой оболочке, а во-вторых, крайне нежелательное размещение самого топлива внутри быстро вращающегося тела, осложняющее впрыск топлива в направлении, противоположном действующей на него центробежной силе. Кроме того, масса топлива в обечайке увеличивает момент инерции системы

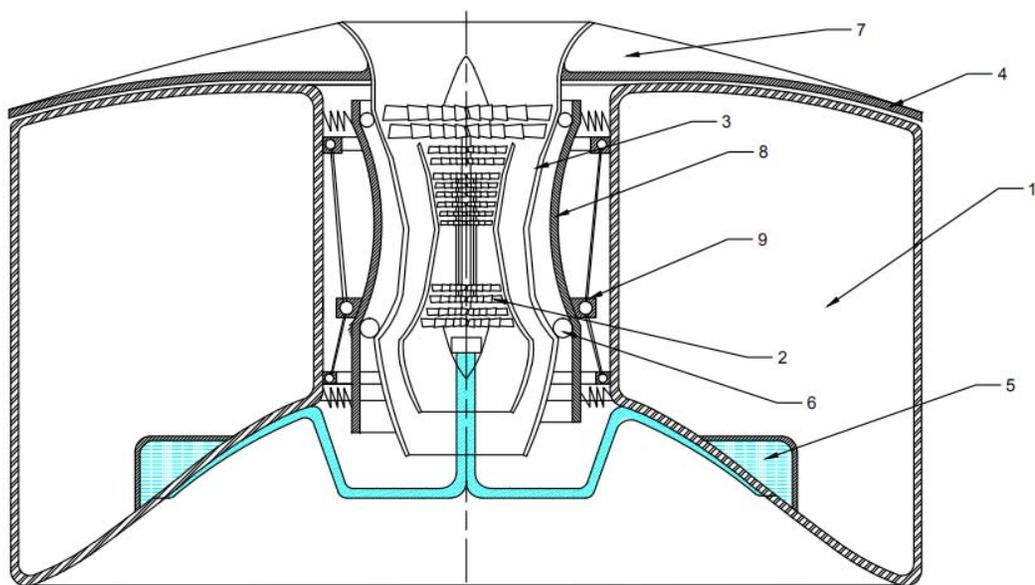


Рис. 5. Схема ЛА с поворотной пластиной (1 – корпус ЛА, 2 – ТРД, 3 – наружная обечайка, 4 – вращающийся диск, 5 – топливная ёмкость, 6 – подшипники, удерживающие обечайку, 7 – ребро жёсткости диска, 8 – качающаяся гильза, 9 – шарнирно-стержневое крепление гильзы).

«обечайка–диск» и соответственно уменьшает скорость вращения диска – один из важнейших параметров. В заявке на изобретение топливный бак 5 в форме тороидальной полости размещён на нижнем днище корпуса ЛА, а топливопроводы в виде нескольких трубок подведены к центральному валу ТРД.

Оптимизация компоновки лопастей вентилятора воздухозаборника и лопаток компрессора и турбины выполняется известными способами [7].

При подаче топлива через радиальные отверстия основного вала ТРД лопатки компрессора и турбины монтируются на внутренней поверхности обечайки, а лопасти вентилятора воздухозаборника (не участвующего в раскрутке ротора ТРД) предпочтительно монтировать на валу. В целом оптимальная компоновка лопаток компрессора и турбины, лопастей вентилятора выполняется не ради создания максимальной реактивной тяги ТРД, а с учётом максимальной скорости вращения обечайки (совместно с диском или пластиной) и максимального расхода воздуха через воздухозаборник.

ЛА функционирует следующим образом. При запуске ТРД его ротор, включающий основной вал с системой подачи топлива и вентилятором, и внешняя обечайка (формально статор) с лопатками

компрессора и турбины начинают вращаться во взаимно противоположных направлениях. Поток продуктов сгорания и воздуха из второго контура ТРД создаёт реактивную тягу, которая в ЛА является составляющей подъёмной силы.

Обечайка ТРД вращается в направлении, противоположном вращению ротора, и вращает жёстко соединённый с ней диск (пластину). Вращающийся диск, вследствие вязкости, увлекает воздух, в результате чего над ЛА возникает вихревое движение воздуха. Существенной особенностью этого движения является внешний по отношению к нему отсос воздуха из центральной (осевой) области, обусловленный воздухозабором ТРД. Есть основания считать, что радиальное распределение статического давления формирующегося над ЛА течения, близкого к вихрям типа «торнадо», описывается соотношением

$$p = p_0 - \rho\omega^2 R^2 + \frac{\rho\omega^2 r^2}{2} \quad [3],$$

что принципиально отлично от того же распределения над вращающимся диском без отбора газа из приосевой области и малых чисел Рей-

$$\text{нольдса } p = p_0 - \frac{\rho\omega^2}{2}.$$

Перепад статического давления над и под ЛА приводит к возникновению второй составляющей подъёмной силы:





$$F = \int \Delta p ds,$$

$$\text{где } \Delta p_{(2)} = \rho \omega^2 R^2 - \frac{\rho}{2} \omega^2 r^2,$$

так что подъёмная сила:

$$F = \rho \omega^2 \int_0^R R^2 2\pi r dr - \frac{\rho \omega^2}{2} \int_0^R 2\pi r^3 dr =$$

$$= \pi \rho \omega^2 R^4 - \frac{\pi \rho \omega^2}{4} R^4 = \frac{3}{4} \pi \rho \omega^2 R^4. \quad (3)$$

Принимая, как и ранее, $\omega R_{\max} = v_{\text{звук}}$, имеем $F = \frac{3}{4} \pi \rho v_{\text{зв}}^2 R^2$, что в три раза больше

верхней границы подъёмной силы, инициируемой вращающимся диском. Зависимость этой составляющей подъёмной силы (без учёта реактивной составляющей) представлена на рис. 2 (кривая 2). Для расчёта можно использовать соотношение $F \cong 21R^2$, где F в тоннах.

По оценкам эта составляющая подъёмной силы, по крайней мере, на два порядка больше подъёмной силы, обусловленной реактивной тягой ТРД.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено расчётно-техническое обоснование возможности реализации ЛА вертикального взлёта конструктивной схемы, принципиально отличной от традиционной вертолётной, а именно – аппарата, в котором подъёмная сила возникает как следствие искусственно создаваемого над аппаратом одиночного вихря; обоснование включает:

- сравнительный анализ параметров двух вихревых течений – формируемого вращающимся диском и вихря типа «торнадо»;
- расчёт подъёмной силы при создании над ЛА вихря типа «торнадо» и верхней границы подъёмной силы, возникающей при создании над ЛА вихря вращающимся диском.

2. Разработана принципиальная схема модели ЛА, в котором вихрь создаётся вращающимся диском, причём в качестве приводного может использоваться бироторный двигатель любого типа (при том,

что у него ротор и статор вращаются во взаимно противоположных направлениях). Использование бироторного двигателя снимает проблему компенсации кинетического момента. Показано, что расчётная верхняя граница подъёмной силы ЛА с вращающимся диском в качестве генератора вихря, по меньшей мере, не уступает подъёмной силе вертолётов традиционной компоновки сравнимых размеров.

3. Предложен эмпирический вариант комплексного решения задачи создания над ЛА вихря типа «торнадо» (с минимумом давления в центре). В качестве приводного в таком ЛА используется модифицированный бироторный турбореактивный двигатель, в котором на передней кромке наружной обечайки, выполненной с возможностью вращения относительно корпуса ЛА, закреплён диск, инициирующий вихрь, причём воздухозаборник турбореактивного двигателя, отбирая воздух с оси вихря, понижает давление в центре.

4. При ограничении максимальной окружной скорости на периферии вихря скоростью звука ($v_{\text{звук}} \cong 300$ м/с) для двух рассмотренных вариантов получены расчётные формулы максимальной подъёмной силы в тоннах: $F_{\max} \cong 7R^2$ – для верхней границы подъёмной силы с вихрем, инициируемым вращающимся диском, и $F_{\max} \cong 21R^2$ – для реактивно-вихревого двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривцов В. С., Карпов Я. С., Лосев Л. И. Проектирование вертолётов. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет, 2003. – 344 с.
2. Джонсон У. Теория вертолёта: Пер. с англ. – Т. 2. – М.: Мир, 1983. – 1020 с.
3. Седов Л. И. Механика сплошной среды. – Т. 2. – М.: Наука, 1970. – 568 с.
4. Политов В. С. Аналитическая модель смерча (торнадо) // Труды V Забабахинских научных чтений. – Снежинск, 1998. – С. 46–54.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 744 с.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие: В 10 т. – Т. VI: Гидродинамика. – 5-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 736 с.
7. Бакулев В. И., Голубев В. А. и др. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. – Изд. 3-е. – М.: МАИ-Сатурн, 2003. – 688 с. ●

Координаты авторов: **Остроухов Н. Н.** – vtvnukde@mail.ru, **Чумакова Е. В.** – ekat.v.ch@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 24.09.2018, принята к публикации 03.11.2018.