

THE PROBLEMS
OF AIRCRAFT VERTICAL
TAKE-OFF AND LANDING

V. A. PAVLOV

The analysis of existing aircrafts with vertical take-off and landing as well as of rescue systems is presented. The conclusions are drawn about perspectives of such aircrafts and systems.

Предлагается анализ существующих летательных аппаратов с вертикальным взлетом и посадкой, а также систем спасения. Делаются выводы о перспективах развития таких летательных аппаратов и систем.

© Павлов В.А., 1998

**О ПРОБЛЕМАХ
ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА
И ПОСАДКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

В. А. ПАВЛОВ

Казанский государственный технический университет
(авиационный институт)

ВВЕДЕНИЕ

Первые сведения о применении винта для создания летательного аппарата типа вертолета (геликоптера) связывают с именем Леонардо да Винчи. Он предложил использовать винт в виде несущей системы, которая может подниматься с грузом, лететь на какие-то расстояния, а затем мягко приземляться. Предложение XV века было осуществлено лишь в XX в отличие от самолета, у которого от идеи до реализации прошло совсем немного времени. Оказалось, что для создания геликоптера (что значит “винт + крыло” или, как у Леонардо, “спираль + перо”) необходимо сначала осознать крыло, что было сделано лишь в XX веке.

Если раньше казалось, что для полета на крыле необходимо создавать ему машущие движения (как у птицы), то на основе теории Н.Е. Жуковского ученые пришли к выводу, что при определенной форме сечения крыла набегающий поток воздуха создает подъемную силу, даже если крыло при этом не делает никаких движений (парящий полет птицы). И если несколько таких крыльев соединить в несущий винт, придать ему вращательное движение, при котором каждое крыло (лопасть) получит скорость и будет обдуваться воздухом, то появится подъемная сила винта, на котором возможно осуществлять взлет, посадку и горизонтальный полет.

ОГРАНИЧЕНИЯ В РАЗВИТИИ ВЕРТОЛЕТОВ

Главным направлением в развитии несущего винта является, конечно, вертолетостроение, где винты осуществляют и создание подъемной силы и силы для горизонтального полета, и функции управления. Основные достоинства вертолета – вертикальный взлет и посадка. Для вертолета не нужна взлетная полоса, которая для современных самолетов достигает 3–4 км, он может висеть и над водной поверхностью. Однако в развитии вертолетов много ограничений.

1. Классический вертолет не может развивать скорость более 350 км/ч. Это связано с тем, что в горизонтальном полете лопасти несущего винта, находящиеся в момент вращения с одного борта, имеют

большую скорость обтекания, в то время как с противоположного — маленькую, которая при скоростях полета более 300 км/ч может стать отрицательной, то есть лопасть обтекается с хвостовой части. Появляется момент, который может опрокинуть вертолет.

2. Лопасть вертолета представляет собой гибкую конструкцию, и это видно (рис. 1) тогда, когда на стоянке лопасти свисают почти касаясь корпуса — стояночный свес, который тем больше, чем больше длина лопасти. Лопасть длиной более 20 м становится настолько тяжелой, что вертолет как грузоподъемное устройство становится просто невыгодным. Теоретически предел грузоподъемности около 35 т, а практически это вертолет МИ-26, который поднимает 25 т.

Если у кого-то возникнет вопрос, почему нигде в мире нет серийных вертолетов грузоподъемностью более 25 т, не верьте, что это никому не нужно. Ведь есть же самолеты грузоподъемностью и в 250 т, но самолет доставит этот груз лишь туда, где есть соответствующий аэродром. А дальше, а туда, где горы, где вечная мерзлота, болота или очень ранимая тундра, где как раз и очень пригодились бы собранные на “материке” конструкции? Даже простейшие газоперекачивающие станции имеют вес более 100 т и перевозятся на Север в собранном состоянии. А конструкции, которые сооружаются на шельфах? Думаю, не стоит перечислять дальше.

3. Ограничение по удельной нагрузке — каждый квадратный метр площади круга, ометаемого винтом, несет вес не более 30 кг. При большей удельной нагрузке поток от винта будет так силен, что не позволит производить работы под несущим винтом.

4. Еще одним ограничением считают передачу большой мощности через один вал, а точнее, через редуктор от двигателя к несущему винту. Считается, что предел возможной передачи мощности через коническую пару шестерен редуктора равен 8000 лошадиных сил (л.с.), а таких пар в редукторе от вала одного двигателя может быть две, значит, мы не можем создать одновинтовой вертолет, имеющий два двигателя мощностью более 32 000 л.с.



Рис. 1. Свес лопастей вертолета на стоянке

Если мы находимся в области нескольких ограничений, это не значит, что мысль об увеличении скорости, грузоподъемности, области применения, может остановиться.

БОРЬБА ЗА СКОРОСТЬ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

На протяжении последних 30–40 лет, то есть с момента, когда стало ясно, что вертолет утвердился как достаточно надежное транспортное средство, идут интенсивные работы по созданию летательных аппаратов (ЛА), объединяющих качества самолета и вертолета.

Наиболее характерным летательным аппаратом такого типа является вертолет-самолет, называемый винтокрылом (рис. 2). На режиме взлета или посадки, когда горизонтальной скорости нет и крыло неэффективно, винты, объединенные с двигателями в общем блоке и укрепленные на конце крыла, поворачиваются так, что создают подъемную силу. В режиме горизонтального полета крыло создает подъемную силу, а винты — горизонтальную тягу. Появление винтокрылов выявило проблемы, препятствующие их развитию.

1. Винты, расположенные в вертикальном поле над крылом, не могут реализовать свою подъемную силу, так как крыло мешает движению воздуха, отбрасываемого винтами, поэтому существуют винтокрылы, у которых крыло поворачивается вместе с винтами и двигателями, что достаточно сложно.

2. Винты больших диаметров, позволяющие взлететь, затем работают в горизонтальном полете как тянущие, ограничивая скорость полета на уровне 500–550 км/ч.

3. На традиционных несущих винтах могут взлетать только винтокрылы малого веса ввиду ограниченной способности несущих винтов по грузоподъемности.

За рубежом придается большое значение работам в области создания скоростных вертолетов,



Рис. 2. Винтокрыл

винтокрылов и преобразуемых винтокрылых аппаратов. В США, Англии, Франции и ФРГ разрабатываются программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, ставящие целью определить оптимальные конфигурации скоростных вертолетов, винтокрылов и преобразуемых винтокрылых аппаратов, а также разработку конкретных проектов. Большинство этих программ финансируется вооруженными силами, по заказам которых ведутся исследования возможностей увеличения скорости существующих типов вертолетов и разрабатываются новые типы скоростных вертолетов, винтокрылов и преобразуемых винтокрылых аппаратов. Из военных программ в первую очередь следует отметить программу разработки для армии США усовершенствованного боевого летательного аппарата для огневой поддержки с воздуха. Характерно также, что схема винтокрыла считается перспективной и для авиалиний малой и средней протяженности, для которых разработаны проекты винтокрылов фирмами “Локхид” и “Сикорский” в США и “Сюд Авиасьон” во Франции.

Проекты преобразуемых винтокрылых аппаратов с поворотными и убираемыми несущими винтами разрабатывались в США в соответствии с концепцией SARA, предусматривающей создание летательного аппарата для спасения экипажей сбитых самолетов. Проекты таких аппаратов исследуются и для возможного их применения на авиалиниях малой и средней протяженности, где они смогут обеспечить достижение скоростей полета, приближающихся к скоростям обычных самолетов.

Кроме того, всеми вертолетостроительными фирмами, а также многими самолетостроительными фирмами на свои средства ведутся исследования новых схем скоростных вертолетов и винтокрылов, а также преобразуемых винтокрылых аппаратов. Особенно большой объем проектных и экспериментальных работ по новым схемам аппаратов проводится в США фирмами “Белл”, “Боинг”, “Вертол” и “Сикорский”.

ПОСАДКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НЕСУЩИХ ВИНТАХ

Каждому из нас наиболее привычно представление посадки космических спускаемых аппаратов, в том числе и с космонавтами, на парашютных системах, которые в момент приземления гасят скорость с помощью двигателей мягкой посадки. В 50-е годы как альтернатива парашютам начались проектирование и экспериментальные исследования средств спасения с торможением на складных несущих винтах, названных ротошютами. К использованию несущих винтов склонялся в то время и С.П. Королев, однако в 70-х годах эти исследования в нашей стране прекратились.

Развитие новейших отраслей промышленности, техники, биологии и медицины иногда становится невозможным без использования уникальных материалов и препаратов, производство которых в настоящее время возможно только в условиях космического пространства. Промышленное использование космических технологий предъявляет дополнительные требования к системам возвращения полезной нагрузки с баллистических траекторий.

Кроме того, в условиях новых экономических отношений значительно увеличились размеры компенсаций за отчуждение земель для осуществления запуска многоступенчатых ракетносителей и посадки спускаемых аппаратов, что влечет за собой и увеличение стоимости созданных в условиях космического пространства материалов и препаратов. В этой связи представляет интерес разработка принципиально новых систем посадки, обеспечивающих приведение спускаемого аппарата в заданный район, что не всегда возможно традиционным способом (парашютным).

В последнее время, с появлением новых конструктивных материалов, внимание разработчиков систем приземления и спасения вновь привлекают системы посадки на базе роторных несущих систем. Удобство такой системы состоит в том, что начальное торможение и стабилизация летательного аппарата, регулирование и управление сопротивлением и подъемной силой на всей траектории спуска, а также конечное торможение, то есть обеспечение мягкой посадки, создаются единой системой.

Использование роторной системы в качестве альтернативы парашютным системам имеет существенные преимущества:

- возможность обеспечения заданных перегрузок при широком диапазоне изменения скорости спускаемого аппарата;
- устойчивость и точное управление положением летательного аппарата на всех режимах полета;
- способность обеспечить безопасную посадку на неподготовленную площадку;
- возможность планирования точно к месту посадки;
- возможность уменьшения вертикальной скорости в момент касания с поверхностью Земли без привлечения дополнительных энергетических источников (за счет накопленной кинетической энергии вращения винта);

Начало работ над роторными системами посадки (РСП) было положено европейскими и американскими фирмами. Исследовались РСП с жесткими лопастями. Для подтверждения потенциальных возможностей РСП фирмой “Каман” (США) была разработана и испытана в аэродинамической трубе и летном эксперименте установка “Ротошют”. Испытания проводились с целью исследования

работоспособности РСП на больших высотах при высоких начальных скоростях обтекания, управления РСП, а также режимов посадки с нулевой скоростью.

Испытания в аэродинамической трубе показали возможность осуществления раскрытия ротора в широком диапазоне скоростей (при числах Маха M от 0,5 до 3,0) и высот (от 12 000 до 36 000 м), летные испытания продемонстрировали надежную работу РСП при начальных скоростях, соответствующих числам M , равным 0,95–1,2, и высотам от 150 до 1300 м. Экспериментальные установки типа “роташют” с диаметром роторов от 0,3 до 7,4 м прошли комплекс летных испытаний и успешно применялись для мягкого приземления со скоростью до 6 м/с грузов весом от 2,7 до 410 кг.

Известные автору отечественные исследования по РСП проводились в начале 70-х годов и ограничивались исследованиями РСП с жесткими лопастями на малоразмерных моделях в аэродинамических трубах при гиперзвуковых и околокосмических скоростях.

Следствием положительных результатов отечественных и зарубежных исследований РСП стала разработка различных проектов роторных систем спасения и посадки для конкретных спускаемых аппаратов. В частности, один из первых вариантов системы спасения и посадки первого спускаемого аппарата космического корабля “Восток” проектировался с РСП. Однако в силу некоторых обстоятельств он не пошел в серию как альтернатива парашютной системе.

Подобные системы не были доведены до промышленных образцов в основном вследствие неудовлетворительных габаритно-массовых характеристик и неприемлемой компоновки при проектировании конкретных спускаемых аппаратов.

Обобщая изложенное, можно заключить, что использование роторных систем в качестве систем торможения и посадки возможно, однако необходимо решить некоторые проблемы, связанные с уменьшением габаритно-массовых характеристик РСП до сравнимости их с характеристиками парашютных систем и созданием приемлемой компоновки РСП в спускаемом аппарате. Как один из вариантов решения этих проблем можно предложить использование РСП со сворачиваемым несущим винтом.

СВОРАЧИВАЕМЫЕ НЕСУЩИЕ ВИНТЫ (СНВ)

Идея создания несущего винта, лопасти которого не имеют собственной изгибной и крутильной жесткости, существует уже около 100 лет. С понятием эффективной изгибной жесткости мы уже как-то смирились и понимаем, что лопасть вертолета, представляющая собой на стоянке внешне очень ненадежное сооружение, при вращении приобрета-

ет большую изгибную жесткость, способную нести тяжелые винтокрылые машины. Такого понимания в отношении эффективной крутильной жесткости, можно сказать, нет не только в кругах обывателей, но и на уровне КБ и НИИ, занимающихся вертолетостроением, хотя теоретические разработки на эту тему существуют как применительно к стержням, так и к лопасти.

Достаточно бурное развитие эти нежесткие или эластичные лопасти получили в 60-е годы в США в связи с появлением изобретения, которое предполагает перед остановкой несущего винта каждую лопасть сворачивать на отдельный барабан (рис. 3), а процесс разворачивания начинать тогда, когда втулка несущего винта раскручена до определенных оборотов и концевые грузы лопастей имеют инерционные силы, способные вытянуть лопасть, накрученную на барабан. Сворачиваемый несущий винт (СНВ) привлекателен своей компактностью, которую можно использовать в ротошютах космических аппаратов, летательных аппаратах других классов как дополнительное устройство для выполнения висения, авторотации, вертикального взлета и посадки.



Рис. 3. Сворачиваемая лопасть модели несущего винта

Однако в 70-х годах бум развития СНВ в США прекратился. Для развития СНВ в России это стало непреодолимым препятствием. Мы привыкли все оценивать с оглядкой на Запад и, если развитие СНВ в США зашло в тупик, значит, и мы не должны этим заниматься как чем-то ненужным и даже вредным...

А может быть, что-то можно изменить, улучшить. По этому поводу вспоминается рассуждение известного советского авиаконструктора, итальянца по происхождению Роберта Людвиговича Бартини. Он говорил: “У вас не решается шахматная задача, и вы достаете из кармана дополнительную пешку. В шахматах это запрещено, а в технике?!”

ВЗЛЕТ И ПОСАДКА НА РЕАКТИВНЫХ СТРУЯХ. СИСТЕМА “Δ-КЛИППЕР”

Идея торможения при посадке реактивной силой двигателя достаточно очевидна. Она используется для уменьшения пробега самолета после посадки, но в отличие от взлета и пробега посадка на реактивных струях — очень сложная задача. Однако в последнее время появилась Американская программа “Δ-клиппер”, ставящая целью разработку дешевых перспективных космических транспортных систем, которая пытается реализовать единую систему взлета и посадки на реактивных струях (рис. 4).

Обоснованием новой программы является то, что издержки космических перевозок в настоящее время главным образом состоят из эксплуатационных издержек системы, которые включают предпусковой монтаж, сборочные и проверочные работы в случае невозвращаемого ЛА и стоимость восстановительных, сборочных (монтажных) работ между полетами в случае наполовину повторно используемых космических систем “Шаттл” (космические челноки). Полностью многократно используемый Δ-клиппер, одноступенчатая (SSTO) система (от англ. Single Step Take-Off system), разрабатывается с целью уменьшить либо устранить многие из этих дорогостоящих операций, что приводит к значительному снижению стоимости и повышению безопасности текущих перевозок в космическое пространство и обратно. Снижение стоимости одного полета для транспортной системы, предназначенной для подъема ракеты-носителя средней грузоподъемности на околоземную орбиту, до величины ниже 10 млн долл. позволит открыть новую эру в использовании космического пространства в военных, государственных, гражданских, а главное — в общечеловеческих областях и расширяющемся коммерческом рынке.



Рис. 4. Одноступенчатый космический корабль Δ-КЛИППЕР

При поддержке ВМДО (оборонная организация-спонсор) команда McDonnell Douglas выполняет программу одноступенчатой ракетной технологии (SSRT), чтобы продемонстрировать характеристики низкоскоростного полета и возможность достичь самолетноподобной эксплуатации, возможность выполнить полет с одноступенчатой системой на криогенном ракетном топливе. Эту программу называют ДС-Х (Δ-клипперная, экспериментальная). Разработка средств обслуживания и эксплуатации была с самого начала совмещена с разработками как ДС-Х, так и соответствующих наземных систем в ходе всего цикла проектирования. Была проанализирована самолетная практика, а затем результаты внедрены в разработку ДС-Х, для уменьшения времени техобслуживания с целью доказать, что время восстановления для ракеты многократного использования может быть уменьшено и сделано почти равным времени, которое требуется для систем эксплуатации в самолетной индустрии.

Чтобы оценить успешность ДС-Х в том, что касается концепции самолетноподобной эксплуатации, перед испытательной программой была выполнена приближенная оценка сервисных и эксплуатационных требований, а также требований надежности.

Заявлено, что “продемонстрированы летные характеристики полностью возвращаемого ЛА с автономным управлением, с двигателем на жидком кислороде либо жидком водороде, вертикального взлета и посадки, который в полной сохранности возвращается в свой космопорт в случае чрезвычайной ситуации, включая отключение двигателя. Успешно продемонстрирована реальная вынужденная посадка”.

Бортовые системы наведения и система управления полетом позволяют совершать полет на ветру как при посадке, так и при приземлении; ветер и его порывы больше не являются помехой при эксплуатации. Δ-клиппер возвращается из космоса в позиции носом вперед (до 2 км); после того как он замедляется примерно до $M = 0,2$, он разворачивается кормой вперед для посадки. Бортовая глобальная система ориентирования (GPS) обеспечит точную посадку рядом со стартовыми стойками. От двух до четырех из восьми основных двигателей используются для торможения и управления вертикальной посадкой ЛА на небольшую площадку по соседству со стартовой установкой.

Процесс “восстановления” должен начинаться сразу же после приземления и автоматического выключения систем. Наземная бригада буксирует аппарат назад на стартовую позицию для того, чтобы выгрузить груз или пассажиров, выполнить техобслуживание, дозаправку и погрузку, необходимые для следующего полета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели основные возможности вертикального взлета и посадки и каждая из них имеет явные недостатки: вертолет — малую скорость полета; винтокрыл — и скорость, и взлетный вес меньше, чем у самолетов; преобразуемые летательные аппараты, представляющие собой одновременно и вертолет и самолет, пока не нашли наилучшего воплощения, так как в их взлетный вес входят паразитные агрегаты (крыло — на взлете и посадке, а несущий винт — в горизонтальном полете), которые делают их малорентабельными.

Средство спасения на ротошюте громоздкое и тяжелое; СНВ, у которого каждая лопасть сворачивается на отдельный барабан, имеет тяжелые редукторы, трансмиссию и даже двигатели для сворачивания лопастей после посадки, перед остановкой их вращения; использование для взлета и посадки ракетных двигателей, по-видимому, может иметь место, как у Δ -клиппера, хотя имеет большой недостаток: на такую посадку необходимо много топлива, посадка невозможна при выходе двигателей из строя, невозможно возвращение ракеты прямо на стартовую площадку.

Наилучшим средством для вертикального взлета и посадки, а также средством спасения были бы несущие винты, так как они могут служить средством

спасения при отказе двигателей, отсутствии топлива, способны осуществить посадку на аэродром или неподготовленную площадку, а также на место будущего старта ракеты. Они были бы наилучшим средством, если бы были свободны от описанных выше недостатков.

Такие системы вертикального взлета и посадки на винтах предложены в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева. Они компактны, легки, так как не имеют редукторов и трансмиссий, удачно объединяют винт с крылом и практически не имеют эффекта паразитных грузов.

* * *

Владимир Александрович Павлов, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительной механики летательных аппаратов Казанского государственного технического университета, действительный член Академии нелинейных наук. Область научных интересов: строительная механика летательных аппаратов, аэроупругость, приложения теории катастроф, конструкции и проектирование летательных аппаратов с вертикальным взлетом и посадкой.