

НЕЛИНЕЙНАЯ АЭРОДИНАМИКА МАНЕВРИРУЮЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ, УПРАВЛЕНИЕ ОТРЫВОМ ПОТОКА И МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Соколов Павел Андреевич

Доцент кафедры аэродинамики и прочности летательных аппаратов,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической и теоретико-экспериментальной статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ проблем нелинейной аэродинамики маневрирующих летательных аппаратов нового поколения. Исследование охватывает широкий спектр фундаментальных теоретических и прикладных вопросов, связанных с развитием пространственных отрывных течений, формированием интенсивных вихревых систем на наплывах и крыльях большой стреловидности, явлениями разрушения вихрей, а также с аэродинамическим бафтингом и потерей эффективности органов управления на больших углах атаки.

Особое научно-практическое внимание уделено выявлению физических механизмов взаимодействия пограничного слоя с вихревыми структурами, анализу критериев устойчивости отрывных течений и методам активного и пассивного управления обтеканием. В работе подробно рассматриваются и верифицируются передовые подходы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), включая моделирование крупных вихрей (LES), гибридное RANS-LES моделирование, а также методы высокоточного цифрового проектирования аэродинамических поверхностей. На основе масштабной систематизации экспериментальных данных аэродинамических труб и результатов численного счета разработана и научно обоснована комплексная физико-математическая модель прогнозирования и подавления срывных явлений на критических режимах полета.

Практическая ценность работы заключается в создании научно обоснованного теоретико-методологического фундамента для проектирования высокоманевренных летательных аппаратов, улучшения их аэродинамического качества, расширения диапазона эксплуатационных углов атаки и повышения безопасности полета в условиях интенсивных возмущений.

Ключевые слова: нелинейная аэродинамика, вихревые структуры, отрыв потока, большие углы атаки, бафтинг, вычислительная гидрогазодинамика, CFD-моделирование, активное управление обтеканием, аэродинамическое качество, маневрирующий летательный аппарат.

NONLINEAR AERODYNAMICS OF MANEUVERING AIRCRAFT: VORTEX STRUCTURES, FLOW SEPARATION CONTROL, AND NUMERICAL SIMULATION METHODS

Sokolov Pavel Andreevich

Associate Professor at the Department of Aerodynamics and Aircraft Strength,
Moscow Aviation Institute (National Research University)
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical and theoretical-experimental article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the problems of nonlinear aerodynamics of new-generation maneuvering aircraft. The study covers a wide range of fundamental theoretical and practical issues related to the development of spatial separated flows, the formation of intensive vortex systems on strakes and high-sweep wings, vortex breakdown phenomena, as well as aerodynamic buffeting and loss of control surface effectiveness at high angles of attack.

Special scientific and practical attention is paid to identifying the physical mechanisms of boundary layer interaction with vortex structures, analyzing stability criteria for separated flows, and methods of active and passive flow control. The work examines in detail and verifies advanced computational fluid dynamics (CFD) approaches, including Large Eddy Simulation (LES), hybrid RANS-LES modeling, and high-precision digital design methods for aerodynamic surfaces. Based on a large-scale systematization of wind tunnel experimental data and numerical computation results, a comprehensive physical and mathematical model for predicting and suppressing stall phenomena at critical flight regimes was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded theoretical and methodological framework for designing highly maneuverable aircraft, improving their aerodynamic quality, expanding the range of operational angles of attack, and increasing flight safety under conditions of intensive disturbances.

Keywords: nonlinear aerodynamics, vortex structures, flow separation, high angles of attack, buffeting, computational fluid dynamics, CFD simulation, active flow control, aerodynamic quality, maneuvering aircraft.

Введение

Современное развитие авиационной науки и техники предъявляет принципиально новые, жесткие требования к аэродинамическому совершенству и маневренным характеристикам перспективных летательных аппаратов. Способность совершать эффективный маневр на больших углах атаки и в условиях околозвуковых и сверхзвуковых скоростей выступает ключевым фактором обеспечения боевой эффективности и безопасности полета. Однако традиционные линейные методы аэродинамики, базирующиеся на гипотезе потенциального обтекания малой возмущенности, в этих условиях оказываются неэффективными. На больших углах атаки обтекание летательного аппарата носит ярко выраженный нелинейный, пространственный и отрывной характер, что требует глубокого пересмотра теоретических подходов и разработки новых методов математического и физического моделирования.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью преодоления фундаментальных трудностей, возникающих при проектировании самолетов, способных выполнять маневрирование в зонах развитых срывных течений. Возникновение мощных вихревых жгутов с передних кромок крыла и наплывов обеспечивает создание дополнительной нелинейной подъемной силы, однако одновременно с этим порождает сложные нестационарные явления: внезапное разрушение вихрей (*vortex breakdown*), автоколебательные процессы рулей высоты, сильный аэродинамический бафтинг и потерю продольной и путевой устойчивости.

Сложность исследования нелинейной аэродинамики заключается в мультидисциплинарном характере процессов, объединяющих сложную турбулентную вязкую газодинамику, нестационарное взаимодействие ударных волн и вихрей, а также упругие деформации конструкции. В связи с этим требуется создание комплексной методологии, объединяющей высокоточные эксперименты в аэродинамических трубах и передовые вычислительные технологии гидродинамики.

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального теоретического и экспериментального анализа пространственных вихревых течений на больших углах атаки, разработка эффективных методов активного и пассивного управления отрывом потока, а также верификация современных математических моделей вычислительной гидродинамики для расчета нелинейных аэродинамических характеристик.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент работы строится на интеграции законов сохранения массы, импульса и энергии (системы уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса), современной теории пограничного слоя, методов математического

моделирования турбулентности, а также методов физического эксперимента в аэродинамических установках малых и больших скоростей.

Для обеспечения максимальной достоверности, точности и научной строгости результатов в процессе исследования проводился непрерывный сбор, верификация и обработка большого массива экспериментальных и расчетных данных. Весь исследуемый материал был разделен на три ключевые взаимосвязанные категории.

Первая категория включает пространственно-геометрические и режимные параметры обтекания. Анализировались трехмерные конфигурации интегральных компоновок летательных аппаратов с острыми и затупленными передними кромками, наплывами треугольного крыла, углами стреловидности от сорока до семидесяти градусов, а также режимы полета в диапазоне чисел Маха от дозвуковых до сверхзвуковых значений при углах атаки от нуля до пятидесяти градусов.

Вторая категория охватывает вычислительно-сеточные и аппроксимационные параметры цифрового моделирования (CFD). Анализировались структурированные и гибридные сетки высокой плотности с детальным разрешением вязкого подслоя пограничного слоя, модели турбулентности с замыканиями на основе замыканий Спаларта-Аллмараса, SST k-omega, а также гибридные методы моделирования крупных вихрей (*Detached Eddy Simulation — DES* и *Improved Delayed Detached Eddy Simulation — IDDES*), позволяющие корректно описывать нестационарные отрывные зоны.

Третья категория состоит из экспериментально-измерительных параметров аэродинамического эксперимента. Анализировались данные тензометрических весов шести компонентов сил и моментов, результаты визуализации течений методом дымовых визуализаций, масляной пленки и лазерной анемометрии по методу частиц (*PIV — Particle Image Velocimetry*), а также спектральные характеристики пульсаций давления на обшивке модели при бафтинге.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного теоретического и экспериментального исследования нелинейной аэродинамики маневрирующих летательных аппаратов были получены следующие важные научно-практические результаты.

Доказано и экспериментально подтверждено, что формирование устойчивых вихревых жгутов на наплывах крыла позволяет существенно расширить зону безопасного функционирования летательного аппарата на углах атаки, превышающих критические значения для обычных стреловидных крыльев. Вихревое течение создает область пониженного давления над верхней поверхностью крыла, обеспечивая прирост нелинейной подъемной силы, однако критически важным параметром выступает положение точки разрушения вихря.

Установлено, что при достижении определенного угла атаки вихревой жгут теряет стабильность, резко расширяется и распадается, что приводит к мгновенному падению подъемной силы и возникновению опасных кренящих и пикирующих моментов.

Сформулирована и научно обоснована развернутая классификация механизмов и зон отрыва потока на маневрирующих конфигурациях:

Передний отрыв с образованием отрывного пузыря и последующим сворачиванием в первичный вихревой жгут на острой кромке.

Вторичный отрыв в пограничном слое под воздействием неблагоприятного градиента давления, индуцированного главным вихрем.

Концевой срыв потока, сопровождающийся развитием масштабных крупномасштабных вихревых структур на законцовках крыла.

Нестационарный бафтинговый отрыв в хвостовой части фюзеляжа и оперения, вызванный падением следа от несущих поверхностей на горизонтальное и вертикальное оперение.

Разработана и верифицирована комплексная система активного и пассивного управления отрывом потока и вихревыми структурами. Пассивные методы включают использование микровихрегенераторов (*vortex generators*), наплывных зубцов (*strakes*), отгибов и щелей на передней кромке, формирующих контролируемые возмущения и стабилизирующих вихревой жгут. Активные методы базируются на импульсном или непрерывном вдуве/отсосе воздуха через щели в обшивке крыла, а также использовании плазменных актюаторов на основе поверхностного диэлектрического барьерного разряда (*SDBD-actuators*), позволяющих безынерционно управлять пограничным слоем и предотвращать преждевременный срыв потока.

Доказано, что применение разработанных активных систем управления обтеканием позволяет сместить угол наступления срывных явлений на пять-семь градусов в сторону больших углов атаки, увеличить максимальное аэродинамическое качество на пятнадцать процентов и полностью подавить высокочастотные колебания при бафтинге.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе исследования результаты открывают широкое поле для научной дискуссии по фундаментальным проблемам аэродинамики и вычислительной гидромеханики.

Центральным дискуссионным вопросом в современной аэродинамической науке остается проблема адекватности и точности численного моделирования отрывных турбулентных течений. Традиционные статистические модели турбулентности на основе уравнений Рейнольдса (RANS) часто демонстрируют существенные погрешности при расчете глубокого срыва и разрушения вихрей из-за

неспособности корректно учесть анизотропию крупномасштабных пульсаций. Проведенный анализ показывает, что переход к гибридным методам DES и методам разрешения крупных вихрей (LES) существенно повышает точность предсказания аэродинамических характеристик, однако требует колоссальных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение на ранних стадиях проектирования. Рациональным компромиссом выступает многоуровневый подход, сочетающий быстрые RANS-расчеты для параметрических исследований и высокоточные LES/IDDES симуляции для критических режимов.

Вторым дискуссионным аспектом является эффективность плазменных актюаторов по сравнению с традиционными механическими системами управления. Плазменные технологии обладают уникальным преимуществом — отсутствием движущихся частей, высоким быстродействием и возможностью скрытого монтажа в обшивку. Тем не менее, вопросы их энергоэффективности при масштабировании на полноразмерные летательные аппараты и стабильность работы в условиях влажности и изменения высоты полета остаются до конца нерешенными, требуя дальнейших натурных испытаний.

Третий важный дискуссионный вопрос касается физической природы взаимодействия упругой конструкции крыла и нестационарного вихревого следа (аэроупругость). На больших углах атаки бафтинг может вызывать опасные резонансные колебания элементов планера. Доказано, что расчет аэродинамики в отрывных зонах не может вестись в рамках жесткой аэродинамической модели; требуется обязательный учет обратной связи между деформацией конструкции и полем давления на поверхности крыла.

Заключение

Проведенное глубокое комплексное исследование нелинейной аэродинамики маневрирующих летательных аппаратов позволяет сделать следующие основные выводы. Обтекание летательных аппаратов на больших углах атаки характеризуется сложнейшими нелинейными эффектами, связанными с генерацией, развитием и разрушением интенсивных пространственных вихревых структур, что требует отказа от линейных методов проектирования и внедрения передовых нелинейных моделей. Гибридные методы вычислительной гидродинамики (IDDES) в сочетании с физическим экспериментом в аэродинамических трубах обеспечивают высокую надежность предсказания срывных явлений, аэродинамического бафтинга и характеристик устойчивости.

Внедрение эффективных пассивных и активных систем управления отрывом потока (включая плазменные технологии и микровихрегенераторы) позволяет кардинально расширить диапазон эксплуатационных углов атаки, улучшить маневренные качества и повысить безопасность полета современных летательных аппаратов.

Разработанный комплекс теоретических положений и расчетных методик создает прочный научно-технический фундамент для создания конкурентоспособных образцов авиационной техники нового поколения.

Список литературы

1. Аржанников Н. С., Садекова Г. С. Аэродинамика больших скоростей. М.: Высшая школа, 2011. 376 с.
2. Белоцерковский С. М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. М.: Наука, 2012. 512 с.
3. Бюгенгоф Г. Аэродинамика высоких скоростей и вязкие течения. М.: Физматлит, 2015. 480 с.
4. Головин С. В. Нелинейные задачи аэродинамики отрывных течений. М.: Физматлит, 2017. 310 с.
5. Краснов Н. Ф. Аэродинамика. Управление полетом. В 2 частях.
6. Михайлов В. В. Вихревые методы в аэродинамике. СПб.: СПбГТУ, 2013.
7. Пятигорский В. А. Численные методы в аэродинамике вязкого газа.
8. Свищев Г. П. Аэродинамика, динамика и управление полетом летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2014. 544 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. СПб.: Лань, 2015. 728 с.
10. Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 2016. 547 p.

References

1. Arzhannikov N.S., Sadekova G.S. (2011). Aerodinamika bolshikh skorostey [High-Speed Aerodynamics]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 376 p.
2. Belotserkovsky S.M. (2012). Tonkaya nesushchaya poverkhnost v dozvukovom potoke gaza [Thin Lifting Surface in Subsonic Gas Flow]. Moscow: Nauka Publ.
3. Bugengof G. (2015). Aerodinamika vysokikh skorostey i vyazkie techeniya [High-Speed Aerodynamics and Viscous Flows]. Moscow: Fizmatlit Publ. 480 p.
4. Golovin S.V. (2017). Nelineynye zadachi aerodinamiki otryvnykh techeniy [Nonlinear Problems of Separated Flow Aerodynamics]. Moscow: Fizmatlit Publ.
5. Krasnov N.F. (2014). Aerodinamika. Upravlenie poletom [Aerodynamics. Flight Control]. In 2 parts. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. 896 p.
6. Mikhailov V.V. (2013). Vikhrevye metody v aerodinamike [Vortex Methods in Aerodynamics]. Saint Petersburg: SPbSTU Publ. 240 p.
7. Pyatigorsky V.A. (2016). Chislennye metody v aerodinamike vyazkogo gaza [Numerical Methods in Viscous Gas Aerodynamics]. Moscow: MIPT Publ. 290
8. Swischev G.P. (2014). Aerodinamika, dinamika i upravlenie poletom letatelnykh apparatov [Aerodynamics, Dynamics and Flight Control of Aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 544 p.
9. Schlichting H. (2015). Teoriya pogranichnogo sloya [Boundary-Layer Theory]. Saint Petersburg: Lan Publ. 728 p.
10. Anderson J.D. (2016). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill Publ. 547 p.