

DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(3)-9



Опыт отраслевого применения программного обеспечения с открытым исходным кодом при аэродинамическом проектировании и проверочном моделировании обтекания летательных аппаратов

А.Л. Павлевич, ORCID: 0009-0006-8576-0923 <pavlevichal@uwca.ru>

*АО «Уральский завод гражданской авиации»,
Россия, 123308, г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д. 1, стр. 1.*

Аннотация. Применение расчетных инструментов с открытым исходным кодом довольно распространенная практика в академической среде. Использование подобных инструментов в отрасли сопряжено с определенными рисками и сложностями. Однако, реалии и актуальные вызовы вынуждают отраслевые предприятия пересмотреть подходы к организации труда в части расчетных работ и математического моделирования, диверсифицировать имеющиеся методики и инструменты. В данной публикации описан опыт комплексного применения программного обеспечения с открытым исходным кодом в разработке авиационной техники, а также изложены преимущества и недостатки такого подхода, пути его дальнейшего развития. Рассмотрены система управления проектами OpenProject, система управления версиями Gitea, набор инструментов многодисциплинарной оптимизации OpenMDAO, параметрический редактор геометрии летательных аппаратов с возможностью расчета аэродинамических характеристик OpenVSP, программный комплекс численного моделирования течения жидкостей и газов OpenFOAM.

Ключевые слова: авиационная техника; аэродинамика; управление проектами; аэродинамическое проектирование; многодисциплинарная оптимизация; численное моделирование; методы вычислительной гидрогазодинамики CFD; информационная система OpenProject; управление версиями Gitea; геометрический редактор OpenVSP; набор инструментов OpenMDAO; решатель и утилиты OpenFOAM.

Для цитирования: Павлевич А.Л. Опыт отраслевого применения программного обеспечения с открытым исходным кодом при аэродинамическом проектировании и проверочном моделировании обтекания летательных аппаратов. Труды ИСП РАН, том 37, вып. 3, 2025 г., стр. 131–146. DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(3)-9.

Благодарности: Моей семье. За терпение, понимание и поддержку.

Application of open-source software solving industrial tasks in aerodynamical design and external flow simulation of the aircrafts

A.L. Pavlevich, ORCID: 0009-0006-8576-0923 <pavlevichal@uwca.ru>

JSC “Ural Works of Civil Aviation”, 1-1, Marshal Zhukov ave., Moscow, 123308, Russia.

Abstract. The article describes industrial experience of open-source software application during aircraft design process. The article focuses on workflow organization, aerodynamical design and CFD simulation using OpenProject project management system, Gitea version control system, multidisciplinary optimization framework OpenMDAO, parametric aircraft design tool OpenVSP, CFD software OpenFOAM.

Keywords: aircraft; aerodynamics; project management; aerodynamic design; multidisciplinary optimization; numerical simulation; CFD; OpenProject; Gitea; OpenVSP; OpenMDAO; OpenFOAM.

For citation: Pavlevich A.L. Application of open-source software solving industrial tasks in aerodynamical design and external flow simulation of the aircrafts. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 37, issue 3, 2025. pp. 131-146 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(3)-9.

Acknowledgements. To my family. For being patient, understanding and supportive.

1. Введение

Летательные аппараты представляют собой сложные технические изделия, требующие расчетного сопровождения на всех стадиях жизненного цикла (см. рис. 1). На начальных этапах проектирования проводятся работы по формированию облика и параметрическому анализу летательного аппарата, а также оценивается выполнимость технического задания. На последующих этапах проектирования уточняются характеристики летательного аппарата, формируются предложения по их улучшению и подтверждается выполнение требований технического задания. На этапе испытаний модельных и первых летных образцов осуществляется валидация полученных ранее результатов и доработка применяемых математических моделей. В процессе эксплуатации авиационной техники статистический анализ полетных данных позволяет прогнозировать изменение летных характеристик.

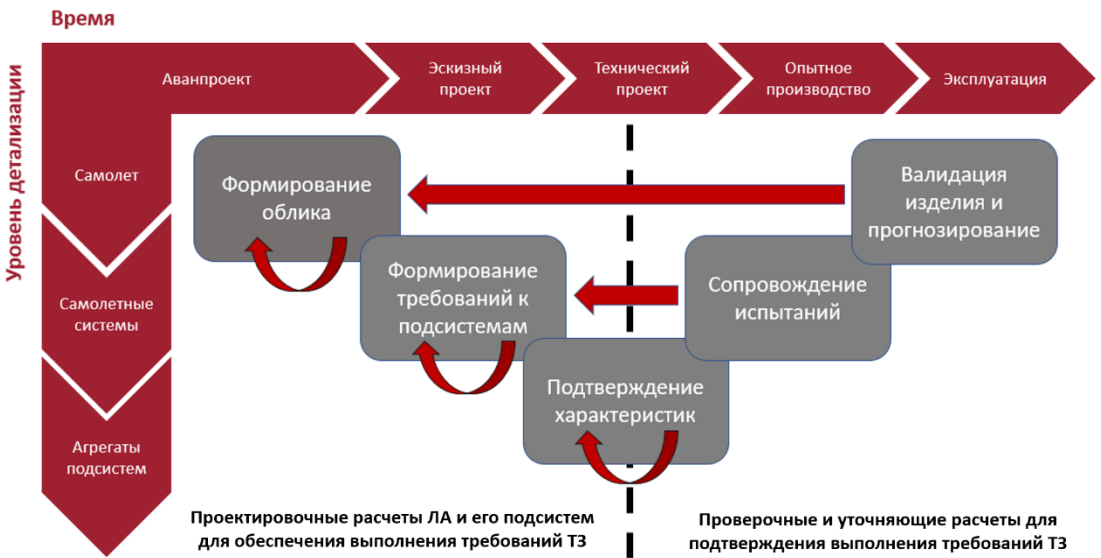


Рис. 1. Расчетные работы в цикле проектирования авиационной техники.
Fig. 1. Mathematical calculations and simulations in the aircraft design process.

В традиционном понимании процесса разработки авиационной техники, на предприятиях-разработчиках используется последовательный итерационный цикл расчетных работ. Работы выполняются поочередно, часто разрозненно, используя результаты предыдущих расчетов в качестве исходных данных для последующих. Основное преимущество такого подхода заключается в его определенности и предсказуемости. Однако, в условиях дефицита времени и необходимости ускорения процесса разработки, сокращения издержек из-за лишних итераций, вызванных ошибками проектирования на ранних его этапах, разрозненность и отсутствие гибкости становятся главными недостатками такого процесса разработки.

С ростом производительности и доступности вычислительной техники в конце XX века стало появляться множество технологий и инструментов для математического моделирования как узкоспециализированных, так и междисциплинарных, крайне необходимых при проектировании сложных технических изделий. Стали формироваться новые подходы к разработке, в том числе и авиационной техники, позволяющие не только ускорить процесс проектирования, но и повысить качество разработки.

В XXI веке, с развитием цифровизации в академической среде и промышленности, а также с доступностью широкополосного интернета, появились платформы и сообщества коллективной разработки программных продуктов. Это позволило развивать передовые и перспективные решения в области информационных технологий, часть из которых стала доступна как программное обеспечение с открытым исходным кодом.

В данной статье рассматривается, как программное обеспечение с открытым исходным кодом и новые подходы к разработке авиационной техники помогают решать междисциплинарные задачи аэродинамического проектирования и моделирования в АО «УЗГА», сокращая продолжительность цикла работ и повышая их качество.

2. От технического задания к облику летательного аппарата

Техническое задание к летательному аппарату в самом простом смысле – это набор требований заказчика верхнего уровня. В них указано, на какое расстояние нужно переместить груз заданной массы за определенное время, а также требования по базированию летательного аппарата и другие эксплуатационные требования. Формирование облика летательного аппарата – это начальный этап декомпозиции технического задания на технические требования нижнего уровня к планеру и системам. Это самый важный и определяющий этап разработки, на котором при помощи математического моделирования оценивается выполнимость технического задания с учетом всех имеющихся ограничений.

Процесс формирования облика летательного аппарата междисциплинарный, итерационный и очень динамичный. Требуется большое количество согласованной и взаимоувязанной информации – исходных данных и принимаемых допущений. Междисциплинарность требует плотной совместной работы нескольких подразделений предприятия-разработчика. Проектировщики, аэродинамики, двигателисты, системщики для максимально эффективной работы должны:

- сформировать проектную команду;
- поддерживать единый темп выполнения работ;
- быстро реагировать на изменения;
- поддерживать актуальность, трассируемость и взаимоувязку всех исходных данных.

Для обеспечения этих условий, помимо применения особых методологических управленческих подходов в организации и ведении работ, необходимо наличие вспомогательных информационных систем, предоставляющих общее единое рабочее пространство, систему планирования, управления работами и требованиями [1].

Существует множество различных информационных систем, поддерживающих разные методологии разработки, проектирования и управления деятельностью и предоставляющие общие рабочие пространства такие как PDM (Product Data Management – система управления данными об изделии), Wiki, RMS (Requirement Management System – система управления требованиями), PMS (Project Management System – система управления проектами) и другие. К сожалению, подобные системы всегда требуют доработки, чтобы учесть все особенности корпоративных процессов и методологий предприятия, а также реализовать интеграцию с другими системами. Доработки коммерческих информационных систем обычно проходят не быстро, в несколько этапов, и требуют значительных финансовых вложений. По этим причинам часто находят применение решения с открытым исходным кодом, которые благодаря своей гибкости позволяют адаптироваться под конкретное предприятие с его бизнес-процессами, конкретного пользователя и с минимальными трудозатратами закрыть потребность в том или ином функционале. В АО «УЗГА» для организации и выполнения работ, связанных с аэродинамическим проектированием и моделированием развернута информационная система «ВИХРЬ», в рамках которой производится:

- декомпозиция и распределение задач по исполнителям, обеспечивается трассируемость работ (наличие связей и иерархической структуры);
- формирование и накопление базы знаний проекта, контроль ревизий исходных данных и результатов, хронология деятельности;
- обеспечение прозрачности и открытости для всех участников проектной команды;
- планирование работ, ретроспектива и прогноз деятельности проектной команды.

В основе информационной системы «ВИХРЬ» лежат система управления проектами OpenProject [2] с открытым исходным кодом на языке Ruby on Rails (см. рис. 2) и система управления версиями Gitea [3] с открытым исходным кодом на языке Go (см. рис. 3).

Основные сильные стороны этих решений:

- веб-серверное приложение, работает через веб-браузер;
- не требует серьезных вычислительных ресурсов;
- легкость развертывания, кастомизации, настройки и администрирования;
- ведение деятельности по классическим методологиям типа «водопад» и по гибким методологиям типа «скрам» с возможностью их комбинирования.

К слабым сторонам этих систем можно отнести:

- не являются системами управления требованиями;
- ограниченные возможности по управлению уведомлениями;
- примитивнейшая синхронизация OpenProject с Git.

Ведение деятельности и работы проектных команд в контуре системы «ВИХРЬ» позволило перейти на краткосрочное еженедельное планирование работ, выстроить прозрачные связи и понятные процессы между сотрудниками различных подразделений конструкторского бюро. Работы по формированию облика летательных аппаратов вышли на качественно новый уровень.

3. Многодисциплинарный параметрический анализ как основа проектировочных расчетов

Проектирование летательных аппаратов начинается с определения аэродинамической схемы, компоновки, оценки массы, летно-технических и взлетно-посадочных характеристик (см. рис. 4). Методики проектирования изложены в учебных пособиях различных авторов [4, 5], трудах отраслевых институтов [6].

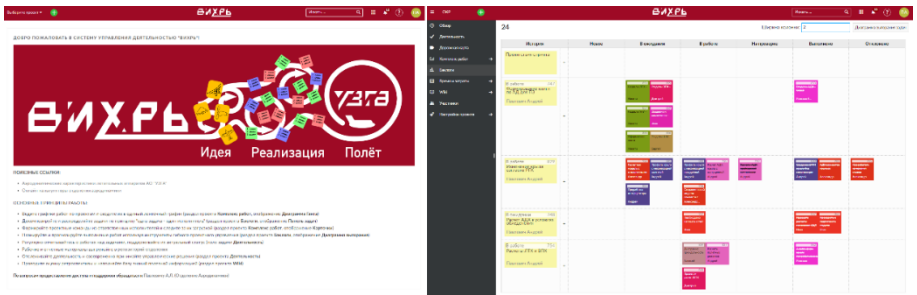


Рис. 2. Рабочее пространство информационной системы «ВИХРЬ» на базе OpenProject.
Fig. 2. «ВИХРЬ» workspace based on OpenProject.

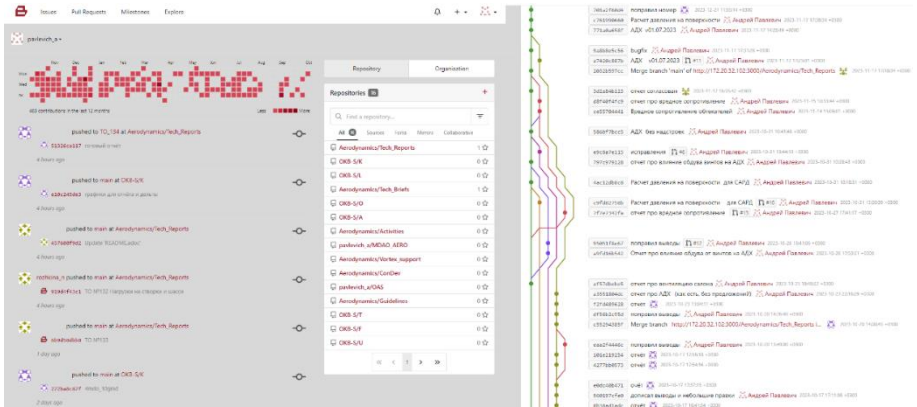


Рис. 3. Репозиторий информационной системы «ВИХРЬ» на базе Gitea.
Fig. 3. «ВИХРЬ» repository based on Gitea.



Рис. 4. Декомпозиция требований технического задания при формировании облика летательного аппарата с точки зрения аэродинамического проектирования.
Fig. 4. Technical requirements decomposition from aerodynamical design point of view.

В основе таких методик лежат последовательные вычисления по аналитическим и эмпирическим формулам, многие из которых получены на основании статистических данных. Однако, поскольку авиационная техника регулярно развивается, применяются новые материалы и технологии – методики со временем устаревают. Возникает необходимость использовать не статистические данные, а более адекватные физически обоснованные математические модели. Кроме того, для выполнения требований к стоимости летательного аппарата и его эксплуатации необходимо проводить финансовое моделирование.

Таким образом, задача проектирования сводится к всестороннему междисциплинарному параметрическому анализу и оптимизации целевого параметра. Решение таких задач требует не только мощных вычислительных ресурсов, но и серьезной проработки в части постановки задачи – определения входных параметров, ограничений, перекрестных и обратных связей, назначение целевых параметров, выбора подходящего алгоритма.

С ростом производительности вычислительной техники и развитием технологий компьютерного инженерного анализа, широкое распространение получили алгоритмы оптимизации и их программные реализации. В аэрокосмической отрасли за рубежом используется решение OpenMDAO [7] – набор инструментов для параметрической оптимизации с открытым исходным кодом на языке Python, созданный в NASA (см. рис. 5). В АО «УЗГА» данный инструмент успешно применяется в решении следующих задач:

- Определение оптимальной формы крыла в плане;
- Определение полетного режима с минимальным расходом топлива;
- Расчет дистанции сбалансированного взлета;
- Расчет минимальной потребной посадочной дистанции.

Применение OpenMDAO позволяет в полностью автоматическом режиме проводить расчеты по принципу «что, если...» и оценку отклика изменения целевых параметров таких как масса топлива, взлетная и посадочная дистанция, время полета и других на изменение различных конструктивных и эксплуатационных параметров, таких как размеры и масса летательного аппарата, высотно-скоростные характеристики силовой установки, характеристики покрытия взлетно-посадочной полосы и других.

Целевые функции формируются из заданных наборов математических взаимосвязанных выражений и моделей, написанных на языке Python специалистами АО «УЗГА». Среди таких моделей можно выделить несколько ключевых междисциплинарных:

- Зависимости аэродинамических характеристик летательного аппарата от формы крыла и фюзеляжа, взлетно-посадочной конфигурации;
- Зависимости высотно-скоростных и расходных характеристики винтомоторной группы двигательной установки от потребной тяги;
- Зависимости массы пустого летательного аппарата от габаритов летательного аппарата и полетных нагрузок.

Алгоритмы, заложенные в OpenMDAO, позволяют определять локальные и глобальные минимумы целевых функций, с учетом ограничений и производных функций, что позволяет специалистам АО «УЗГА» решать задачи междисциплинарной оптимизации при аэродинамическом проектировании в различных постановках и формулировках, используя один и тот же набор математических выражений и моделей.

Сильные стороны инструментов OpenMDAO:

- Простой и понятный принцип определения входных и выходных параметров математических функций, ограничений и целевых функций;
- Параметрический анализ набора аналитических зависимостей занимает не более нескольких секунд машинного времени;

- Кроссплатформенность. Возможность использования на устройствах, поддерживающих Python, в том числе и мобильных Android и iOS;
- Содержит инструменты для проверки валидности используемых математических моделей, визуальному отображению взаимосвязей через матричные диаграммы;
- Возможно решение обратных задач, задач оптимального управления;
- Поддерживается распараллеливание вычислительных процессов.

К слабым сторонам можно отнести:

- Представлены относительно простые алгоритмы оптимизации. В сложных наборах математических моделей могут быть сложности с определением глобальных минимумов.

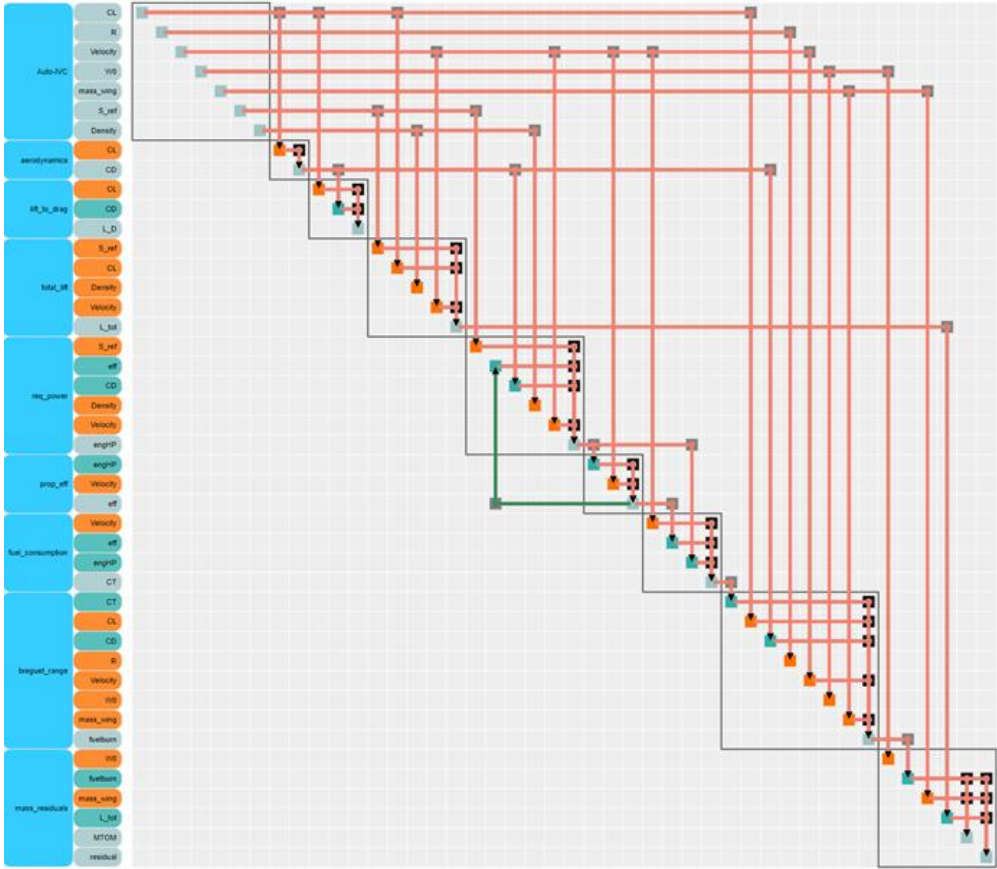


Рис. 5. Матричная диаграмма взаимосвязей математических моделей в OpenMDAO при определении оптимальной формы крыла в плане летательного аппарата.
Fig. 5. Matrix diagram showing relations between various mathematical models during optimal wing design using OpenMDAO.

Использование решения OpenMDAO на самом раннем этапе проектирования авиационной техники позволяет существенно ускорить процесс валидации требований технического задания – проверки требований на их выполнимость. Кроме того, OpenMDAO дает хорошую возможность для специалистов познакомиться с теорией оптимизации на практике, не прибегая к использованию более сложных коммерческих инструментов.

4. Аэродинамическое проектирование на ранних этапах разработки

Декомпозиция требований верхнего уровня на нижние уровни требует их уточнения и детализации. Когда определена аэродинамическая схема летательного аппарата, формируются требования к аэродинамическим характеристикам крыла. По результатам их проработки определяется форма крыла в плане и остальные его геометрические параметры, формируются требования к аэродинамическим характеристикам профиля, некоторым самолетным системам и т.д.

Обычно в процессе аэродинамического проектирования участвуют несколько подразделений конструкторского бюро. В одном подразделении формируется общий вид летательного аппарата, в другом подразделении проводится аэродинамический расчет его характеристик. Чтобы оптимизировать этот процесс, необходима автоматизация взаимодействия двух основных рабочих инструментов специалистов этих подразделений – геометрического редактора и расчетной программы.

В авиастроении широко применяются различные системы автоматизированного проектирования, трехмерные системы CAD (Computer Aided Design – системы компьютерного проектирования) и методы численного моделирования трехмерных вязких течений жидкостей и газов, известных как CFD (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидрогазодинамика). Применение методов CFD имеет некоторые особенности:

- Конечно-элементные методы CFD работают с трехмерной дискретизированной областью среды вокруг исследуемого объекта (так называемая «сетка»). Хотя создание «сетки» в большинстве случаев автоматизировано, оно является дополнительным звеном в цепочке процесса аэродинамического проектирования. Кроме того, для создания качественной «сетки» к геометрической модели предъявляются особые требования к ее внешним поверхностям и их сопряжениям;
- Конечно-элементные методы CFD являются одними из самых ресурсозатратных инструментов инженерного анализа. Их применение может сделать аэродинамическое проектирование «бутылочным горлышком» в общем цикле разработки.

Чтобы ускорить процесс аэродинамического проектирования довольно часто используются встроенные в CAD системы средства инженерного анализа. Обычно эти инструменты представляют из себя «черный ящик» – для удобства пользователя инструменты содержат минимум настроек, а заложенные в него математические модели не доступны для изменения. С одной стороны это упрощает процесс аэродинамического проектирования – от инженера требуется только сформулировать постановку задачи. С другой – появляется риск получения ошибочного результата из-за использования инструмента за пределами его области применения, границы которой для пользователя неочевидны.

Кроме встроенных в CAD системы инструментов инженерного анализа в конструкторских бюро авиастроительных предприятий часто используются расчетные методики собственной разработки. Для расчета аэродинамических характеристик используются различные вариации аналитических и панельных методов, которые иногда называют «расчетными инструментами пониженной точности». В дозвуковом самолетостроении наиболее распространено применение панельных методов, которое имеет свои особенности:

- Расчеты аэродинамических характеристик производятся в основном для аэродинамических плоскостей. Расчеты аэродинамических характеристик фюзеляжей, гондол и других элементов летательного аппарата могут быть очень условны;
- Упрощенное моделирование или полное отсутствие пограничного слоя;
- Эмпирические поправки на сжимаемость и трение. Невозможность достоверно оценить коэффициент лобового сопротивления при нулевой подъемной силе;
- Очень условное или полное отсутствие возможности расчета отрывного течения.

Невозможность достоверно оценить максимальный коэффициент подъемной силы;

- Особый формат исходных данных для работы с геометрией. Невозможность напрямую работать с трехмерными моделями CAD систем;
- Могут возникать сложности при расчете аэродинамических характеристик в условиях аэродинамической интерференции, влияющие на стабильность и качество результата расчета;
- Низкие требования к вычислительным ресурсам. Время моделирования одного расчетного случая может измеряться секундами на обычном офисном ПК.

Несмотря на ряд существенных ограничений, панельные методы широко применяются на ранних этапах проектирования благодаря скорости вычислений. Как показывает практика и многократные валидационные исследования – в линейном диапазоне изменения аэродинамических характеристик достоверность результатов моделирования панельными методами очень высока и подтверждается результатами не только расчетами с помощью CFD, но и экспериментальными данными. Аэродинамические характеристики в линейном диапазоне позволяют оценить характеристики управляемости и устойчивости летательного аппарата, крейсерские летно-технические характеристики.

В АО «УЗГА» на этапе аэродинамического проектирования широко применяются все описанные выше инструменты, однако, наибольший интерес представляют инструменты с возможностями параметризации исходных данных и автоматизации. Среди таких можно выделить панельные методы с открытым исходным кодом. В отрасли широко известны такие программы как XFOIL, QPROP, XFLR5, AVL, PAN AIR и другие. Отдельно следует выделить параметрический редактор геометрии летательных аппаратов с возможностью расчета аэродинамических характеристик OpenVSP [8], разработанный в NASA. Данный инструмент обладает следующими особенностями:

- Полностью параметризованный геометрический редактор исключительно летательных аппаратов. Летательный аппарат собирается из параметризованных предопределенных типовых элементов таких как фюзеляж, крыло, гондола, воздушный винт, пластина и т.п. с предопределенными макропараметрами, такими как размах, сужение, стреловидность и т.п. (см. рис. 6);
- Возможность рассчитывать аэродинамические характеристики двумя типами панельных методов VSPAERO – тонкостенный метод вихревых решеток и толстостенный панельный метод;
- Возможность рассчитывать сопротивление трения по различным эмпирическим методикам;
- Возможность рассчитывать волновое сопротивление и сверхзвуковые течения;
- Моделирование аэродинамической интерференции (местные скосы потоков), работы воздушного винта (нестационарное моделирование, метод активного диска), эффективности органов управления (элероны, рули высоты и направления);
- Имеется полный API (Application Programming Interface – интерфейс прикладного программирования) на языке C и Python;
- Возможность импорта и экспорта трехмерных геометрических моделей в нейтральных форматах STL и STEP;
- Возможность распараллеливания вычислений.

Использование в АО «УЗГА» геометрического редактора OpenVSP позволило в разы ускорить работу по созданию первичного облика летательного аппарата как трехмерной модели для последующего расчета аэродинамических характеристик.

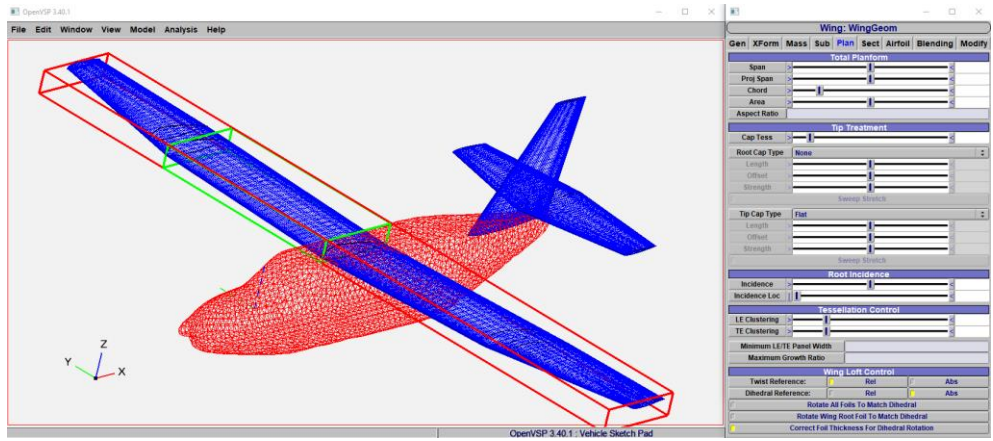


Рис. 6. Пример параметризованной модели крыла в составе самолета в редакторе OpenVSP.
Fig. 6. Example of wing parametrization using OpenVSP.

Встроенный панельный метод VSPAERO успешно прошел валидацию имеющимися на предприятии панельными методами и методами CFD, подтвердив возможность его использования для определения аэродинамических характеристик на линейном участке их изменения, расчета летно-технических характеристик, эффективности органов управления, управляемости и устойчивости (см. рис. 7).

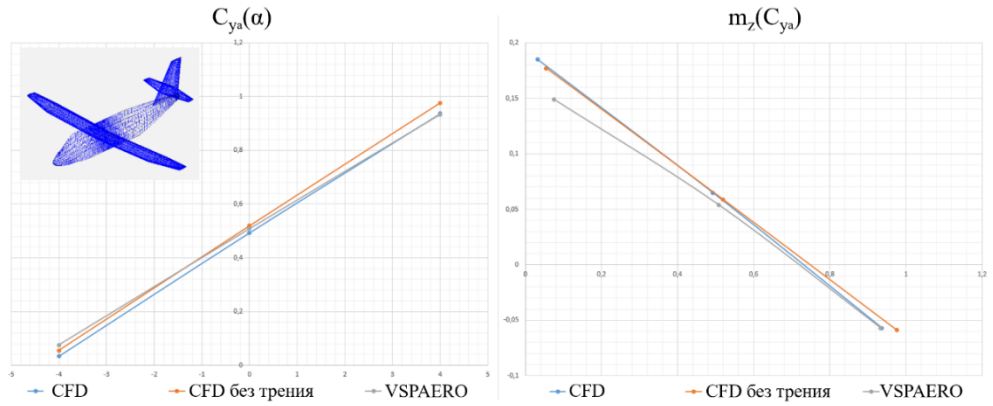


Рис. 7. Сравнение результатов расчета VSPAERO с CFD.
Fig. 7. Comparison of VSPAERO calculations with CFD simulation results.

Наличие API дает возможность использовать OpenVSP в задачах автоматизированного параметрического анализа и multidisciplinary optimization в контуре OpenMDAO, совместно с математическими моделями из других дисциплин. Подобная связка реализована и апробирована в АО «УЗГА» для решения задачи определения формы крыла в плане и режима крейсерского полета, обеспечивающих наименьший расход топлива при полете на заданную дистанцию. В оптимизационном контуре OpenMDAO используются:

- Геометрический редактор OpenVSP, использующий предопределенный шаблон летательного аппарата с изменяемыми входными параметрами типа размах секции крыла, сужение, стреловидность, корневая хорда, угол поперечного V и другие;
- Панельный метод VSPAERO, рассчитывающий аэродинамические характеристики летательного аппарата для конкретного угла атаки и заданной геометрии крыла;
- Математическая модель массы летательного аппарата, зависящая от размаха и формы

крыла в плане и нагрузок;

- Математическая модель тяговых и расходных характеристик силовой установки, зависящая от скорости, высоты и режима работы двигателя;
- Функция расчета расхода топлива на заданную дальность на определенном режиме, высоте и скорости полета;
- Условие увязки потребных и располагаемых тяг и аэродинамических характеристик летательного аппарата.

Решение подобной задачи на обычном ПК занимает не более 1 часа, при этом расчет одного полетного режима с помощью VSPAERO занимает не более 10 секунд. По итогам работы программ специалист получает упрощенную трехмерную модель летательного аппарата, облик которого и основные параметры наилучшим образом соответствуют сформулированной задаче. Экспортировав ее в нейтральный формат STEP, можно обеспечить возможность работы с геометрией в CAD-системе по дальнейшей компоновке отдельных элементов и систем, улучшению обводов, сопряжений и стыков внешних поверхностей. Основными преимуществами OpenVSP над существующими CAD-системами и их встроенными средствами инженерного анализа, CFD методами, а также методами собственной разработки являются:

- Наличие параметризованных типовых шаблонов геометрических элементов летательных аппаратов и визуальная среда трехмерного проектирования;
- Низкие требования к конфигурации ПК, возможность выполнения параллельных вычислений на многоядерных процессорах;
- Доступная документация, активное сообщество и понятные методики по расчету аэродинамических характеристик;
- API для автоматизации построения геометрии и выполнения расчетов в фоновом режиме без запуска графической части программы.

Применение инструмента OpenVSP в контуре OpenMDAO в АО «УЗГА» позволило существенно улучшить и ускорить процесс формирования и детализации облика летательного аппарата на ранних этапах проектирования.

5. Проверочное моделирование

Расчетные инструменты пониженной точности помимо основных преимуществ в виде простоты использования и скорости вычислений имеют ряд ограничений, не позволяющий в полной мере использовать их на всех этапах проектирования. Для расчета маневров, предельных нагрузок, взлетно-посадочных характеристик и некоторых других расчетных случаев требуется знать максимальный коэффициент подъемной силы и коэффициент лобового сопротивления при нулевой подъемной силе. Определение этих параметров в цикле разработки авиационной техники относят к уточняющему или проверочному моделированию с использованием «расчетных инструментов повышенной точности», к которым относят CFD методы (см. рис. 8). К сожалению, несмотря на развитие методов CFD и вычислительной техники, до сих пор не существует универсального, достоверного и приемлемого по затратам ресурсов и времени способа моделирования этих параметров. Модели турбулентности содержат эмпирические коэффициенты, а прямое моделирование турбулентности делает процесс соизмеримым по затратам с проведением испытаний в аэродинамической трубе.

Согласно обобщенным данным по итогам мероприятий AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Американский институт аэронавтики и астронавтики) таких как High Lift Prediction Workshop [9] и Drag Prediction Workshop [10] – разброс в результатах моделирования разными программными реализациями методов CFD очень велик и не позволяет выработать универсальный достоверный подход к моделированию с высокой степенью воспроизводимости результата. Тем не менее, потребности в заблаговременном определении максимального

коэффициента подъемной силы и коэффициента лобового сопротивления при нулевой подъемной силе, а также в улучшении местной аэродинамики, влияющей на эти параметры, остаются актуальными.



Рис.8. Аэродинамическое проектирование и моделирование в цикле разработки.

Fig. 8. Aerodynamical design and simulations during aircraft design process.

В АО «УЗГА» для решения подобных задач применяются различные программные CFD комплексы – коммерческие и с открытым исходным кодом. Наиболее важное моделирование, с точки зрения требований к достоверности количественной оценки результата, дублируется разными комплексами и разными специалистами. Подобная практика распространена в особо ответственных расчетных работах в других отраслях, например, в атомной и космической отрасли. Выбор наиболее подходящего CFD комплекса для решения задач внешнего обтекания АО «УЗГА» производится по следующим критериям:

- Наличие в комплексе всех необходимых функций и математических моделей;
- Невысокий порог входа и понятные требования к квалификации специалиста;
- Стабильность процесса решения, воспроизводимость результата и устойчивость к человеческому фактору;
- Высокая производительность вычислений и скорость процесса моделирования;
- Отсутствие особых требований к вычислительным ресурсам и операционной системе, масштабируемость и стабильность параллельных вычислений.

Из всех существующих программных комплексов CFD с открытым исходным кодом в АО «УЗГА» для моделирования обтекания летательных аппаратов используется комплекс OpenFOAM в редакции ESI [11], работающий на рабочих станциях в операционной системе MS Windows 10 при помощи MinGW. Основное применение ограничено моделированием внешнего дозвукового несжимаемого установившегося обтекания без теплообмена, поэтому основной используемый решатель – simpleFoam. Для его распараллеливания по вычислительным ядрам процессора рабочей станции используется MS MPI. Для работы с файлами конфигурации используется Visual Studio Code, а для визуализации мониторов численного решения – gnuplot. Для визуализации результатов и оценки интегральных аэродинамических характеристик используется ParaView.

Опыт применения OpenFOAM в АО «УЗГА» можно обобщить следующим образом:

- Наличие скомпилированных версий под Windows с базовым набором решателем и утилит делают OpenFOAM весьма доступным для решения несложных задач

вычислительной гидрогазодинамики, таких как расчет аэродинамических характеристик летательного аппарата, обтекаемого дозвуковым несжимаемым потоком, в стационарной постановке на малых углах атаки. Решение более сложных задач, требующих применения специальных математических моделей и решателей, может быть затруднено необходимостью проведения отладочных и валидационных работ.

- Наличие опыта работы с зарубежными коммерческими CFD комплексами существенно упрощает использование OpenFOAM. При наличии на предприятии CFD решений Ansys или Siemens возможно использовать сеточные модели, созданные в них. OpenFOAM поддерживает трехмерные гексаэдрические (в том числе и ортогональные), тетраэдрические, полиэдрические, призматические сетки и их гибридные комбинации. По опыту решения задач АО «УЗГА» наиболее стабильный процесс сходимости с помощью решателя simpleFoam был получен с трехмерными гибридными полиэдрическими и призматическими сетками. Настройки решателя OpenFOAM также будут знакомы пользователям CFD комплексов Ansys и Siemens. Таким образом, основной сложностью для пользователя с опытом работы в коммерческом CFD является отсутствие графического интерфейса, стандартных универсальных настроек и некоторые отличия от привычного рабочего процесса. Тем не менее, для продвинутых пользователей и это не будет сложностью, поскольку автоматизация коммерческих CFD комплексов тоже предполагает работу со скриптами – текстовыми файлами и командами их запуска;
- OpenFOAM обладает большим количеством настроек, которые в коммерческих комплексах либо скрыты совсем, либо вынесены в раздел продвинутых. Не все комбинации настроек приводят к стабильному процессу решения даже на качественных расчетных сетках, и даже если они воспроизводят аналогичные настройки коммерческих CFD комплексов. Кроме стабильности настройки решателя оказывают влияние на результат моделирования. Отмечено систематическое завышение значений коэффициента лобового сопротивления на 15-50% в зависимости от настроек решателей по сравнению с коммерческими CFD комплексами с аналогичными настройками. Методом проб и ошибок, а также изучая опыт сообщества, были определены ряд настроек, обеспечивающих стабильный и монотонный процесс сходимости при моделировании решателем simpleFoam на неструктурированных гибридных сеточных моделях внешнего обтекания летательного аппарата. Для аппроксимации оператора градиента используется схема pointCellsLeastSquares, а для оператора дивергенции – Gauss limitedUpwindV grad(U). С коэффициентами релаксации 0,9 для давления и скорости, и 0,7 для турбулентности, установившееся решение достигается в течение 500 итераций с уровнем невязок порядка 0,000001. Расхождение получаемых коэффициентов аэродинамических сил и моментов, в диапазоне углов атаки, соответствующих линейному участку изменения подъемной силы, от экспериментальных данных и результатов коммерческих CFD комплексов незначительно. Таким образом, следует отметить достаточно сильное влияние человеческого фактора на результаты моделирования, сложности с воспроизводимостью результата – разные специалисты могут получать результаты с разбросом не менее 15%. По опыту АО «УЗГА» при использовании коммерческих CFD комплексов одного класса и метода, воспроизводимость результатов моделирования разными специалистами имеет разброс не более 5%. Следовательно, для обеспечения предсказуемой воспроизводимости результата и снижения влияния человеческого фактора, в отраслевом применении программного комплекса OpenFOAM встает острая необходимость в выработке корпоративных методических указаний и руководств для проведения моделирования. Кроме завышения коэффициента лобового сопротивления наблюдались тенденции к отрыву потока на меньших углах атаки, что, вероятно, взаимосвязанные явления. В существующих исследованиях по валидации OpenFOAM в

задачах расчета максимального коэффициента подъемной силы летательных аппаратов отмечается, что ощутимый вклад в интегральные аэродинамические характеристики могут вносить нефизичные местные отрывные течения [12]. Тем не менее, с учетом опыта АО «УЗГА» по расчету максимального коэффициента подъемной силы, полученный в OpenFOAM результат является в целом адекватным и удовлетворительным даже для моделей со слабой детализацией сеточной модели расчетной области (см. рис. 9).

- Машинное время, необходимое для выполнения одной итерации вычислений, сопоставимо с аналогичными вычислениями в коммерческих комплексах CFD. Однако, для достижения установившегося решения требуется большее количество итераций. Таким образом, общее время на решение задачи оказывается в 1,5-3 раза больше по сравнению с коммерческими CFD комплексами.
- Реализованный в решателе simpleFoam алгоритм SIMPLE не требует большого количества памяти. Рабочая станция с объемом оперативной памяти 32 Гб может быть использована для моделирования обтекания всего летательного аппарата целиком с приемлемым сеточным разрешением с элементами с удовлетворительными метриками качества (скошенность, вытянутость, коэффициент роста). Распараллеливание по ядрам процессора с помощью MS MPI происходит без особенностей. Загрузка ядер равномерная и без простоев даже с относительно простым методом декомпозиции scotch. Возможность использования OpenFOAM на ARM процессорах выглядит очень перспективным направлением применения CFD в обозримом будущем.

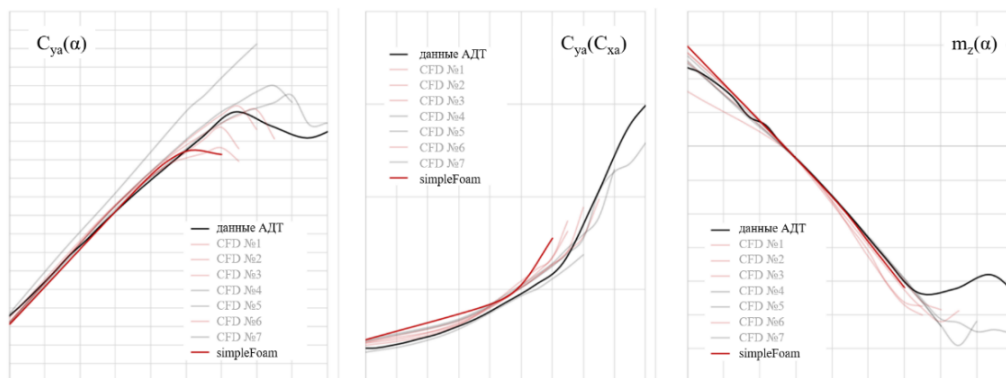


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования OpenFOAM с результатами других CFD комплексов и примененных моделей.

Fig. 9. Comparison of CFD results obtained using various CFD solvers, including OpenFOAM.

Можно подытожить, что OpenFOAM наравне с коммерческими CFD комплексами закрывает потребности АО «УЗГА» в численном моделировании внешнего обтекания летательных аппаратов на дозвуковых скоростях. Отмеченная адекватность результатов моделирования OpenFOAM позволяет использовать его для исследования местной аэродинамики летательных аппаратов и качественного анализа их аэродинамических характеристик. Применение OpenFOAM для количественной оценки аэродинамических характеристик, особенно на больших углах атаки, требует большей сравнительной статистики по задачам, выполненным в других CFD комплексах, и валидации с экспериментальными данными. В дальнейших планах АО «УЗГА» расширять область применения OpenFOAM – моделировать сжимаемые течения, нестационарное обтекание и работу винтомоторных групп. Кроме того, использование OpenFOAM молодыми специалистами видится полезным с точки зрения лучшего понимания методов численного моделирования, более глубокого погружения в теоретические аспекты численных методов, лучшего понимания получаемого результата.

6. Заключение

Применение инструментов с открытым исходным кодом в отрасли можно рассматривать как взаимовыгодное сотрудничество между предприятиями и академическим сообществом. Предприятия получают возможность использовать новые инструменты, а сообщество получает обратную связь и новые идеи для развития своих технологий.

Открытость и доступность этих технологий позволяют выделить наиболее интересные и перспективные решения. В реалиях промышленных предприятий технологии с открытым исходным кодом не рассматриваются как альтернатива проприетарному и коммерческому программному обеспечению, а скорее, как дополнение, расширяющее области знаний и компетенций.

В АО «УЗГА», сталкиваясь с дефицитом времени и ограниченными ресурсами на разработку авиационной техники, программные комплексы с открытым исходным кодом для аэродинамического проектирования и моделирования находят свое место как дополнительные инструменты для принятия конструкторских решений. Диверсификация инструментов делает процессы разработки более устойчивыми и независимыми, повышает вероятность принятия правильного решения.

Специалисты АО «УЗГА» следят за новыми технологиями в сфере программного обеспечения с открытым исходным кодом и регулярно тестируют перспективные разработки в своей работе, чтобы повысить качество и эффективность процессов разработки авиационной техники. Так, применение информационных систем OpenProject, Gitea и инструментов параметрического анализа и многодисциплинарной оптимизации OpenMDAO и OpenVSP позволило вывести работы по формированию облика летательного аппарата на качественно новый уровень. Применение в работе CFD комплекса OpenFOAM наравне с коммерческими CFD решателями дополняет специалистов информацией в части вопросов местной аэродинамики и уточнения аэродинамических характеристик летательных аппаратов.

Список литературы / References

- [1]. Павлевич А.Л. Гибкие методологии управления проектами НИОКР в ракетном двигателестроении. Труды НПО Энергомаш, том 38-39, 2022 г., стр. 300-313.
- [2]. OpenProject: <https://www.openproject.org> (дата обращения 01.11.2024).
- [3]. Gitea: <https://about.gitea.com/products/gitea> (дата обращения 01.11.2024).
- [4]. Погосян М.А., Лисейцев Н.К., Стрелец Д.Ю., Киселев В.А., Тарасов А.З., Долгов О.С., Дудар Э.Н., Тимошенко В.П., Еремин Н.А., Пеньков Е.А., Клягин В.А., Фортинов Л.Г., Хайров А.М. Проектирование самолетов/под ред. М.А. Погосяна, 5-е изд., перераб. и доп. М., Инновационное машиностроение, 2018, 864 с.
- [5]. Арепьев А.Н. Выбор проектных параметров и оценка летных характеристик пассажирских самолетов с турбовинтовыми двигателями. М., МАИ, 2005, 96 с.
- [6]. Авиация общего назначения. Рекомендации для конструкторов/ под ред. дтн, проф. В.Г. Микеладзе. ЦАГИ, 2001, 292 с.
- [7]. OpenMDAO: <https://openmdao.org> (дата обращения 01.11.2024).
- [8]. OpenVSP: <https://openvsp.org> (дата обращения 01.11.2024).
- [9]. Rumsey C.L., Slotnick J.P., Sclafani A.J. Overview and Summary of the Third AIAA High Lift Prediction Workshop. Journal of Aircraft, 2018, vol. 56, issue 2. DOI: 10.2514/1.C034940
- [10]. Tinoco E.N., Brodersen O.P., Keye S., Laflin K.R., Feltrop E., Vassberg J.C., Mani M., Rider B., Wahls R.A., Morrison J.H., Hue D., Roy C.J., Mavriplis D.J., Murayama M. Summary Data from the Sixth AIAA CFD Drag Prediction Workshop: CRM Cases. Journal of Aircraft, 2017, vol. 55, issue 4. DOI: 10.2514/1.C034409.
- [11]. OpenFOAM: <https://www.openfoam.com> (дата обращения 01.11.2024).
- [12]. Ashton N., Skaperdas V. Verification and Validation of OpenFOAM for High-Lift Aircraft Flows. Journal of Aircraft, 2019, vol. 56, issue 4. DOI: 10.2514/1.C034918.

Информация об авторах / Information about authors

Андрей Леонидович ПАВЛЕВИЧ – Начальник отдела аэродинамического проектирования и моделирования АО «УЗГА». Сферы научных интересов: математическое моделирование в решении инженерных задач, вычислительная гидрогазодинамика.

Andrey Leonidovich PAVLEVICH – Head of aerodynamical design and CFD simulations department, JSC “UWCA”. His research interests include mathematical modeling and simulations, fluid and gas dynamics.