

Программно - методический комплекс расчёта эмиссии авиационных двигателей

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

Рассмотрен программно-методический комплекс расчета зон загрязнений от эмиссии авиационных двигателей. Разработанная математическая модель вихревого и конденсационного следов за летательными аппаратами предполагает учёт множества факторов: стратификацию атмосферы, направление и скорость ветра, наличие плоскости раздела сред ("экран") и т.п. Анализ методов численной аэродинамики, использующихся в отечественной и зарубежной практике, показал, что в наибольшей мере требованиям расчёта эмиссии авиационных двигателей отвечает метод дискретных вихрей (МДВ) и его модификации. Разработанные прикладные программы, базирующиеся на МДВ, предусматривают максимально полное (в рамках принятых допущений) моделирование процесса обтекания и формирования вихревого следа, что обеспечивает им эвристические свойства. Показаны методики и алгоритмы расчёта характеристик спутного и вихревого следов.

Ключевые слова: летательный аппарат, спутный след, конденсационные следы, эмиссия.

Введение

Увеличение объёма авиаперевозок, дальности, высоты и продолжительности полёта летательных аппаратов (ЛА) оказывает существенное воздействие на окружающую среду. В связи с этим большое внимание уделяется снижению загрязнения окружающей среды от двигателей силовых установок ЛА.

Отсутствие стандартов, регламентирующих выброс загрязняющих веществ в верхние слои атмосферы двигателями силовых установок ЛА, дало предпосылки к разработке двигателей и компоновок силовых установок, позволяющих минимизировать возможные выбросы загрязняющих веществ. Кроме того, рассмотрены вопросы снижения выбросов загрязняющих веществ в процессе эксплуатации ЛА, к числу которых относятся организация воздушного движения, оптимизация режимов полёта (взлётно-посадочные операции, режимы набора высоты и снижения ЛА, руление и др.).

Решение практических задач, связанных с распространением турбулентных струй с твёрдыми весомерными частицами, возможно с использованием математических моделей таких течений. По сравнению с газочапельными струями расчёт струй с твёрдыми весомерными частицами является менее сложным, так как в них не наблюдаются фазовые переходы, коагуляция и дробление. Поэтому математическую модель струи с твёрдыми весомерными частицами можно рассматривать как упрощённую модель газожидкостной струи.

Рассмотрим методику математического моделирования вихревого и конденсационного следа за летательными аппаратами.

1. Методики расчета вихревого следа

Процесс формирования и развития вихревого следа условно делим на зоны (рис. 1), что предполагает разделения методики расчёта его характеристик на два этапа.

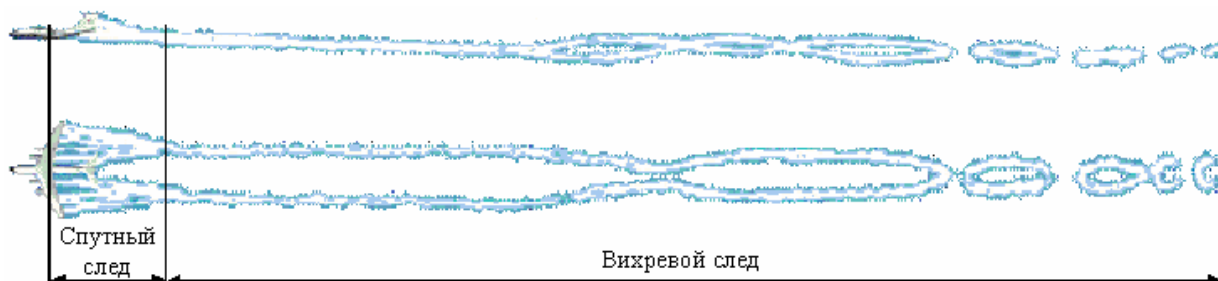


Рис. 1. Структура вихревого следа

Первый этап расчёта предполагает получение характеристик спутного следа за исследуемым летательным аппаратом (ЛА) с учётом работы двигателей его силовой установки, т.е. решают задачу об его обтекании. Параллельно с решением задачи об обтекании ЛА решают задачу об истечении примесей с заданными характеристиками из сопел двигателей его силовой установки. Характеристики спутного следа рассчитывают до удаления от ЛА-генератора спутного следа, где течение в следе становится автомодельным, что позволяет утверждать о полностью сформировавшемся вихревом следе.

Второй этап расчёта – за исходные данные расчёта характеристик вихревого следа принимают данные, полученные на первом этапе. Расчёт характеристик вихревого следа ведут до момента времени, когда вихревой след прекращает своё “существование” по какой-либо причине, или до заданного удаления от самолёта-генератора вихревого следа.

ЛА с крылом большого удлинения $\lambda = \frac{l^2}{S} > 4$, как правило, генерируют вихревой след, представляющий собой два мощных вихря, которые с точки зрения механики являются слабо интерферирующими стационарными образованиями. Такой вихревой след с течением времени затухает вследствие турбулентной вязкости. ЛА с крылом малого удлинения и сложной формы в плане генерируют вихревой след, который может состоять из нескольких вихрей, интенсивно взаимодействующих друг с другом. Такие вихревые образования неустойчивы с точки зрения механики течения в них и являются нестационарными. Однако ЛА с крылом $\lambda > 4$ также может генерировать вихревой след, состоящий из множества вихрей, например, в случае, когда выпущена механизация задней кромки крыла (взлётно-посадочная конфигурация ЛА), что приводит, в свою очередь, к нестационарности течения в вихревом следе.

Следовательно, для математического моделирования таких принципиально различных явлений используют принципиально разные математические модели (ММ):

- математические модели стационарного обтекания ЛА;
- математические модели нестационарного обтекания ЛА;

– математические модели стационарного обтекания ЛА, построенные на решении уравнений Навье–Стокса.

В свою очередь, ММ делятся на два вида:

- математические модели в линейной постановке решения задачи;
- математические модели в нелинейной постановке решения задачи.

Исходя из этого строятся соответствующие ММ обтекаемой поверхности исследуемого ЛА.

2. Алгоритмы решения задачи об обтекании

Алгоритм решения задачи об обтекании ЛА-генератора спутного следа (первый этап расчёта вихревого следа) показан на рис. 2. Режим полёта, полётная конфигурация, кинематические параметры невозмущённого потока считаются заданными. Полученные результаты расчёта записываются в базу данных (если они не существуют) для повторного их использования на последующих этапах расчёта характеристик вихревого следа.

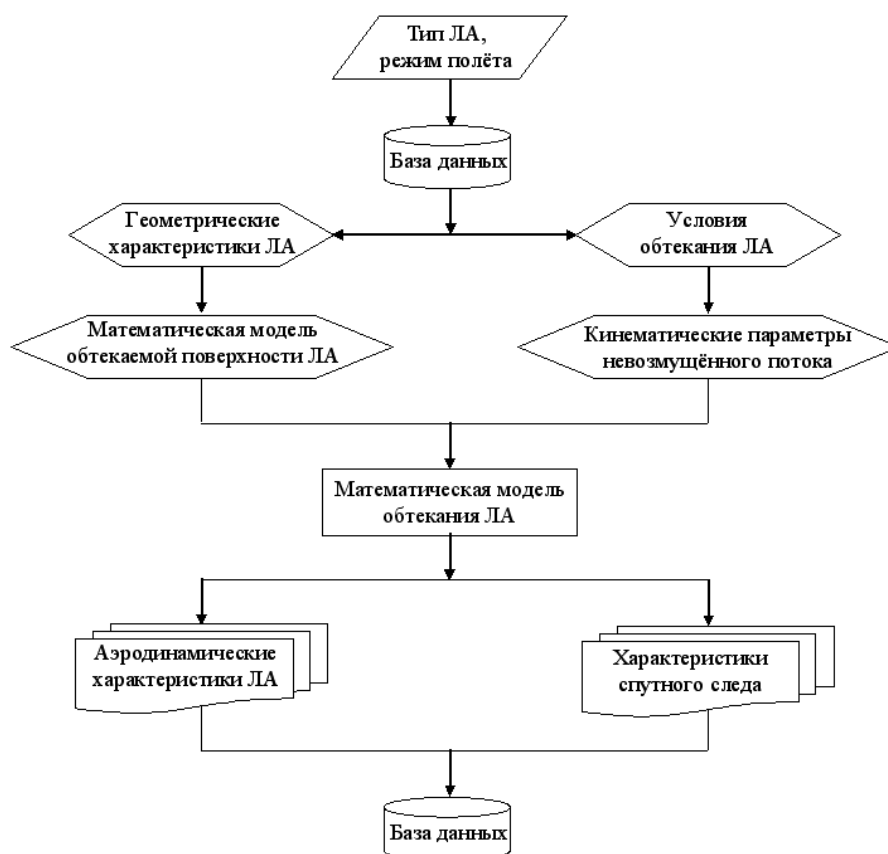


Рис. 2. Методика решения задачи об обтекании ЛА

Математическая модель вихревого следа предполагает учёт множества факторов: стратификацию атмосферы, направление и скорость ветра, наличие плоскости раздела сред (“экран”) и т.п. (рис. 3).



Рис. 3. Методика расчёта характеристик вихревого следа

Результаты расчёта характеристик вихревого следа сохраняются в базе данных, соответствующих исходным данным расчёта для повторного использования.

3. Выбор численного метода исследования эмиссии авиационных двигателей

Эффективность численного метода расчёта является решающим фактором успеха математического моделирования на ЭВМ процессов обтекания ЛА и его взаимодействия с потоком. Использование математического моделирования стало новым средством получения данных, дополняющим и/или заменяющим аналитические, полуэмпирические методики и физические эксперименты. В использовании методов вычислительной аэродинамики ЛА накоплен значительный опыт [1 – 6]. Сложившиеся мнения при выборе методов вычислительной аэродинамики изложены, в частности, в известной работе Л. Миранды [7], в которой утверждается, что эффективность численного метода и программных продуктов можно интерпретировать как произведение двух факторов:

«эффективность=качество × распространённость».

В этом контексте под фактором качества понимают точность и достоверность результатов численных экспериментов. Распространённость программы (математической модели) определяется её полезностью, универсальностью и доступностью.

Анализ методов численной аэродинамики, использующихся в отечественной и зарубежной практике, показал, что в наибольшей мере изложенным требованиям отвечает метод дискретных вихрей (МДВ) и его модификации. Более того, МДВ может эффективно использоваться для решения широкого круга задач ма-

тематической физики относительно гармонического потенциала [8, 9], а его модификации, базирующиеся на фундаментальных идеях, позволяют строить численные решения для потенциала, удовлетворяющего уравнению Гельмгольца [10, 11]. Современная методология МДВ изложена в ряде монографий, часть которых переведена и издана за рубежом. “Качество” результатов, полученных с использованием МДВ, является достаточно высоким, что подтверждается сходимостью многочисленных данных при физических и численных экспериментах [12 – 14]. Реализация принципа “оптимальной неточности” или, точнее, обеспечения заданной точности результатов при минимальных затратах, в случае применения МДВ не представляет затруднений. Это объясняется тем, что МДВ и его модификации позволяют использовать схематизации и модели различного уровня [15, 16]:

- модели среды: идеальная несжимаемая, идеальная сжимаемая, локально вязкая (в пределах пограничных слоев и слоев смешения), вязкая;
- модели ЛА: пластинчатая (бесконечно малой толщины), малой толщины (с линеаризацией по толщине), телесная (конечной толщины), смешанная;
- схемы обтекания: безотрывное, отрывное с фиксированными местами отрыва (невязкий отрыв), отрывное с вязким отрывом, смешанное;
- виды течений: установившееся (стационарное), гармонически меняющееся по времени, неустановившееся (нестационарное);
- уровни приближений: линейное, квазилинейное (с частичной линеаризацией), нелинейное.

Прикладные программы, базирующиеся на МДВ, предусматривают максимально полное (в рамках принятых допущений) моделирование процесса обтекания, что обеспечивает им эвристические свойства. С помощью соответствующих математических моделей были получены фундаментальные результаты по выявлению особенностей обтекания аэродинамических компоновок с крыльями изменяемой геометрии и сложной формы в плане [17], трансформации струй и следов [18, 19] и т.д. Обоснованный выбор численного метода сам по себе не гарантирует высокой эффективности расчётной программы (программного комплекса). Качество программного продукта в значительной мере зависит от методики его создания.

Выводы

1. Метод дискретных вихрей весьма результативен при изучении стационарного и нестационарного течений идеальной жидкости, когда учёт вязкости не существен, при замкнутом описании свободных турбулентных течений при $Re \rightarrow \infty$ в струях, вихревых следах и слоях смешения [20].
2. Важным преимуществом математических моделей на базе метода дискретных вихрей является их оперативность и время получения результатов расчёта при достаточной их достоверности. Это позволяет с успехом использовать метод дискретных вихрей для моделирования и исследований характеристик спутных и вихревых следов, эмиссии авиационных двигателей.

Список литературы

1. Беспилотные летательные аппараты. Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик [Текст] / В. М. Илюшко, М. М. Митрахович, О. С. Соловьев и др. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.

2. Бондаренко, В. М. Расчёт основных характеристик дальнего аэродинамического следа за летательным аппаратом [Текст] / В. М. Бондаренко, А. И. Желанников // Прикладные задачи аэромеханики. – Х. ХАИ. 1987. – 336 с.
3. Борисов, А. В. Математические методы динамики вихревых структур [Текст] / А. В. Борисов, И. С. Мамаев. – М.: Ижевск. 2005. – 368 с.
4. Еременко, С. М. Математическая модель интерференции спутных следов за несколькими самолетами. Решение прикладных задач летной эксплуатации воздушных судов методами математического моделирования [Текст] / С. М. Еременко, А. И. Желанников, П. Е. Иванов // Науч. вестн. МГТУ ГА. – М., 1993. – 342 с.
5. Еременко, С. М. Целевая комплексная программа исследований загрязнения атмосферы эмиссией авиадвигателей и методические особенности выполнения сопровождающего математического моделирования и лётного эксперимента в тропосфере [Текст] / С. М. Еременко, А. И. Желанников, П. Е. Иванов // Отчёт по НИР. – №140-93-11. – ГНЦ ЛИИ им. Громова. – 1993. – 58с.
6. Еременко, С. М. Влияние компоновки летательных аппаратов на формирование дальнего спутного следа [Текст] / С. М. Еременко, А. И. Желанников, П.Е. Иванов // Решение прикладных задач летной эксплуатации воздушных судов методами математического моделирования. – М.: МГТУГА, 1996. – 256с.
7. Миранда, Л. Р. Применение вычислительной аэродинамики при проектировании самолетов [Текст] / Л. Р. Миранда // Аэрокосмическая техника. – 1985. – № 2.– С. 2–23.
8. Белоцерковский, С. М. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике [Текст] / С. М. Белоцерковский, И. К. Лифанов. – М. : Наука, 1985. – 252 с.
9. Лифанов, И. К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент [Текст] / И. К. Лифанов. – М. : ТОО Янус, 1995. – 521 с.
10. Численный метод решения краевых задач для уравнения Гельмгольца методом дискретных особенностей [Текст] / В. В. Гуляев, М. В. Крыжов, В. А. Победов, В. М. Попов //Авиационная промышленность. 1997. №3 – 4.– 188 с.
11. Гуляев, В. В. Численная линейная математическая модель процессов неустановившегося дозвукового обтекания несущих систем потоком сжимаемого газа [Текст] / В. В. Гуляев, В. М. Попов // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики МДОЗМФ-2000: сб. тр. междунар. симпозиума. – Орел, 2000. – 280 с.
12. Применение метода Вальда при анализе согласия экспериментальных и расчетных данных [Текст] / О. А. Бабич, Ф. И. Ганиев, Ю. Б. Кулифеев, В. А. Победов // Тр. ЦАГИ. – 1979. – Вып.1309. – С. 120–136.
13. Бабич, О. А. Анализ согласия экспериментальных расчетных данных методом наименьших квадратов [Текст] / О. А. Бабич, А. И. Деев, Ю. Б. Кулифеев // Тр. ЦАГИ. – 1979. – Вып.1309. – С. 96–116.
14. Гуляев, В. В. Построение и верификация метода прямого численного моделирования процессов обтекания летательных аппаратов при гармоническом изменении кинематических параметров [Текст] / В. В. Гуляев, М. В. Крыжов, В. М. Попов // Науч. вестн. МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. – 2000. – № 33. – 326 с.
15. Ништ, М. И. Вычислительная аэродинамика [Текст] / М. И. Ништ // Полет. – 1999. – № 5. – 22 с.
16. Ништ, М. И. Математические модели аэродинамики летательных аппаратов [Текст] / М. И. Ништ // Полет. – 1998. – № 8. – 24 с.

17. Нелинейная теория крыла и ее приложения [Текст] / Т. О. Аубакиров, С. М. Белоцерковский, А. И. Желанников, М. И. Ништ. – Алматы : Гылым, 1997. – 448 с.

18. Соловьёв, О. В. Методы изучения характеристик дальнего вихревого следа [Текст] / О. В. Соловьёв, С. М. Ерёменко, В. В. Чмовж // Наука і техніка повітряних сил Збройних Сил України. – 2013. – 4 (13). – С. 26 – 29.

19. Соловьёв, О. В. Структура вихревых следов и их воздействие на летательные аппараты [Текст] / О. В. Соловьёв, П. В. Прусак, Н. В. Кобрин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 3 (120). – С. 41 – 49.

20. Гиевский, А. С. Вихревые следы самолётов [Текст] / А. С. Гиевский, А. И. Желанников. – М. : Физматлит, 2008. – 172 с.

21. Соловьёв, О. В. Анализ процесса формирования вихревых следов за летательным аппаратом [Текст] / О. В. Соловьёв, В. Н. Кобрин, В. В. Чмовж // Системи озброєння і військова техніка : зб. наук. праць. – Вип. 2 (34). – Х., ХУПС, 2013. – С. 93 – 98.

Поступила в редакцию 15.04.2016

Software Methodical Complex for Calculation of Aircraft Engine Emission

Software methodical complex for calculation of contamination zones from *aircraft* engine emissions are considered. The developed mathematical model of the wake vortices and contrails of the aircrafts involves accounting multiple factors: atmosphere stratification, wind direction and speed, availability of the plane between media ("screen") and others. Analysis of methods for numerical aerodynamics used in domestic and foreign practice has shown that the discrete vortex method (DVM) and its modifications is the best method for calculation of aircraft engine emission. The developed applications based on DVM, provide the most complete (within the accepted assumptions) simulation of flow process and wake vortex formation, providing heuristic properties. The following methods and algorithms for calculating performance of wake vortex and aircraft trail are shown.

Keywords: aircraft, aircraft trail, contrail, emissions

Програмно - методичний комплекс розрахунку емісії авіаційних двигунів

Розглянуто програмно-методичний комплекс розрахунку зон забруднень від емісії авіаційних двигунів. Розроблена математична модель вихрового та конденсаційного слідів за літальними апаратами передбачає облік безлічі чинників: стратифікацію атмосфери, напрямок і швидкість вітру, наявність площини розділу середовищ ("екран") та ін. Аналіз методів числової аеродинаміки, що використовують у вітчизняній і зарубіжній практиці, показав, що в найбільшій мірі вимогам розрахунку емісії авіаційних двигунів відповідає метод дискретних вихрів (МДВ) і його модифікації. Розроблені прикладні програми, що базуються на МДВ, передбачають максимально повне (в рамках прийнятих припущень) моделювання процесу обтікання і формування вихрового сліду, що забезпечує їм евристичні властивості. Показано методики і алгоритми розрахунку характеристик спутного і вихрового слідів.

Ключові слова: літальний апарат, спутний слід, конденсаційні сліди, емісія.