

УДК 533.6:532.529

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУЙ С ВИХРЕВОЙ ПЕЛЕНОЙ И РАЗВИТИЕ ДВУХФАЗНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО СЛЕДА ЗА САМОЛЕТОМ

© 2011 г.

*М.А. Лобанова*

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург

mashula1987@mail.ru

*Поступила в редакцию 16.06.2011*

Численно исследовано течение в следе за тяжелым магистральным самолетом типа В737 при полете на высоте 10 км. Рассмотрена полная конфигурация самолета. Анализируется структура ближнего следа, получающаяся как результат взаимодействия вихревой пелены, возникающей при обтекании самолета, и струй двух двигателей. Моделируется конденсация в струях воды, содержащейся в продуктах сгорания топлива (керосина). Дана оценка эффективности рассеяния лазерного луча на частицах конденсата.

*Ключевые слова:* магистральный самолет, полет на эшелоне, струйно-вихревой след, конденсация воды в струях, численное моделирование.

Воздействие выхлопов двигателей гражданской авиации и, как следствие, конденсационных следов за авиалайнерами на атмосферу является в последние два десятилетия предметом повышенного внимания и широкого обсуждения среди специалистов. Причина этого заключается в негативном воздействии авиационного транспорта на качество воздуха и, в более широком плане, на локальный климат вблизи аэропортов из-за высокой концентрации загрязняющих примесей в приземном слое, что ведет к нарушению радиационного баланса и даже к парниковому эффекту [1–3]. Другой проблемой, связанной с воздействием тяжелых самолетов на состояние атмосферы, является проблема безопасности полетов. Как известно, след за самолетом, формирующийся в результате взаимодействия выхлопных струй двигателей с вихревой пеленой, создаваемой крылом, представляет собой протяженную область сильно возмущенного течения, попадание в которую другого самолета может закончиться катастрофой [4]. Эта проблема особенно остра в районах с высокой плотностью движения. Недавно возникла новая интересная задача, связанная с конденсационными вихревыми следами. Она состоит в возможности использования наблюдения за поведением дисперсной фазы в следе (каплями воды и кристалликами льда) и измерением ее параметров (с помощью наземной или бортовой аппаратуры) для диагностики вихревой обстановки и, соответственно, степени вихревой опасности.

Продукты сгорания авиационного топлива

содержат большое количество воды. Водяной пар по мере охлаждения в окружающем воздухе конденсируется. Микрофизика конденсации и последующего перехода капель в твердую фазу (в лед) исследовалась в рамках простых моделей, и было найдено, что на процессы фазовых переходов очень сильно влияют как атмосферные условия (температура окружающего воздуха, его загрязненность), так и тип топлива, и режим работы двигателей самолета. Формирование и развитие конденсационных следов за самолетами были темой научных публикаций преимущественно в литературе по атмосферным наукам. Результаты многочисленных измерений и расчетов на основе моделей различного уровня подробности и сложности явились предметом специального отчета [5]. Ясно, что поведение дисперсной фазы в следе зависит от его газодинамической структуры. В то же время моделирование течения в следе является очень сложной задачей. Это существенно трехмерное турбулентное течение с долгоживущими крупномасштабными вихрями. Одна из первых серьезных попыток исследовать численно взаимодействие струи и крупномасштабного продольного вихря сделана в статье [6], в которой авторы с помощью метода LES исследовали совместное развитие турбулентной струи и модельного одиночного вихря Ламба – Озеена, а также на основе простой термодинамической модели изучали конденсацию водяного пара. Реальное течение в следе за самолетом значительно сложнее [7] и зависит от множества факторов (типа самолета, коли-

чества и режима работы двигателей, высоты и скорости полета и т.п.).

В настоящем исследовании численно моделируется течение и фазовые превращения в следе за тяжелым магистральным самолетом типа B737. Рассматривается полная конфигурация самолета, включая изменение профиля крыла по его длине, геометрическую крутку крыла, относительное положение основного крыла и горизонтальных рулей и др. Предполагается, что полет осуществляется на высоте 10 км с углом атаки фюзеляжа  $1.5^\circ$ . Течение описывается уравнениями Рейнольдса с использованием SST-модели турбулентности Ментера [8]. Геометрия самолета построена с помощью пакета SolidWorks10. Расчеты выполнены в пакете ANSYS CFX12 на неструктурированной сетке, сгенерированной в ANSYS ICFM CFD12 и сгущенной к поверхности самолета и в области начального участка струй двигателей. Анализируется структура ближнего следа, получающегося в результате взаимодействия вихревой пелены, возникающей при срыве потока с крыла, и выхлопных струй. Моделируется конденсация в струях воды, содержащейся в продуктах сгорания топлива (керосина). Концентрация воды на срезе сопел определялась на основе термодинамического расчета двигателей. Начальная стадия гомогенной конденсации описывается кинетической моделью образования и роста кластеров воды, основанной на потенциалах взаимодействия между молекулами и молекул с образовавшимися кластерами [9, 10]. Изучена динамика образования кластеров и капель воды вплоть до  $\sim 10^7$  молекул в одной капле. Найдены распределения кластеров по количеству в них молекул на различных расстояниях от среза сопла двигателя. В рамках той же кинетической модели получены оценки влияния степени турбулентности несущего газа на скорость роста капель.

Динамика образовавшихся капель (после затвердевания – частичек льда) в струйно-вихревом следе моделируется методом Лагранжа. Получены распределения дисперсной фазы вдоль и по-

перек следа. Дана оценка эффективности рассеяния лазерного луча на частицах примеси в следе с целью возможного использования отраженного излучения для диагностики газодинамической вихревой структуры следа.

В выполнении данного исследования принимали участие д.ф.-м.н. Ю.М. Циркунов, Н.Б. Федосенко и к.ф.-м.н. А.А. Горбунов. Автор выражает искреннюю благодарность к.т.н. С.И. Иголкину за консультации по кинетической модели конденсации и обсуждение результатов.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 09-08-00888).*

#### *Список литературы*

1. Minnis P., Kirk Ayers J., Palikondra R., Phan D. Contrails, cirrus trends and climate // Journal of Climate. 2004. Vol. 17. P. 1671–1685.
2. Karcher B., Peter Th., Biermann U.M., Schumann U. The initial composition of jet condensation trails // Journal of atmospheric sciences. 1996. Vol. 53, No 21. P. 3066–3083.
3. Schumann U. On the effect of emission from aircraft engines on the state of the atmosphere // Ann. Geophys. 1994. Vol. 12.
4. Alekseev S., Belotserkovskiy A., Kanevskiy M. Wake vortex projects in Russia and status of WakeNet Russia // 2nd Major WakeNet3 – Europe Workshop, 28–29 June 2010. Toulouse, France.
5. Intergovernmental Panel of Climate Change // Aviation and the Global Atmosphere. Cambridge Univ. Press, 1999.
6. Paoli R., Helie J., Poinot T. Contrail formation in aircraft wakes // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 502. P. 361–373.
7. Гринац Э.С. и др. Физические свойства аэрозольного струйно-вихревого следа высотного самолета // Труды ЦАГИ. 2008. Вып. 2676. С. 80–119.
8. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 269–289.
9. Иголкин С.И. Модель конденсации и газодинамика по механизму пар кристалл // Журнал технической физики. 1996. Т. 66, вып. 9. С. 1–11.
10. Горбунов А.А. Кинетика и газодинамика течений с фазовыми переходами в дискретной модели конденсации: Дис...канд. ф.-м. н. СПбГУ, 2005. 123 с.

### **INTERACTION OF EXHAUST JETS WITH A VORTEX SHEET AND THE DEVELOPMENT OF TWO-PHASE CONDENSATION TRAIL BEHIND AN AIRCRAFT**

*М.А. Lobanova*

A vortex flow behind a cruise aircraft of B737 type flying at the height of 10 km is investigated numerically. The entire aircraft configuration is analyzed. The flow structure in the area of interaction of two engine exhaust jets and a vortex sheet is analyzed. Condensation of water in products of fuel combustion is modeled. Estimation of the laser-light scattering by water droplets and ice crystals is given.

*Keywords:* cruise aircraft, cruising flight, jet-vortex wake, water condensation in jets, computational simulation.