

УДК 532.527

ВИХРЕВОЙ СЛЕД ЗА ПАССАЖИРСКИМ САМОЛЕТОМ

© 2011 г.

А.М. Гайфуллин, Ю.Н. Свириденко

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский

amgaif@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассмотрены формирование и эволюция вихревого следа за самолетом в турбулентной атмосфере. Созданы математическая модель и численная программа расчета вихревого следа. Предложен подход к созданию математической модели аэродинамики самолета, попавшего в вихревой след от другого самолета. Подход основан на использовании искусственных нейронных сетей. Проведены оценки точности и быстродействия программных модулей математического обеспечения пилотажных стендов и авиационных тренажеров при моделировании полета в зоне влияния вихревого следа.

Ключевые слова: вихревой след, самолет, турбулентность атмосферы, пилотажный стенд, нейронные сети.

Рассматриваются две крупные задачи, связанные со струйно-вихревым следом за пассажирским самолетом. Первая – определение характеристик и времени жизни следа в турбулентной атмосфере, вторая – создание модели аэродинамики самолета, попавшего в вихревой след от другого самолета, для математического обеспечения пилотажных стендов и авиационных тренажеров.

Математическая модель вихревого следа за самолетом

Структура ближнего следа зависит от режима полета самолета. На посадочном режиме механизация крыла отклонена, и поэтому формируется многовихревая система. На крейсерском режиме полета образуется двухвихревая система. На характеристики вихревого следа в основном влияет турбулентная диффузия (завихренности, температуры и других параметров), а также неустойчивость к возмущениям различной частоты. Первое приводит к росту турбулентного ядра и падению максимальной окружной скорости по мере удаления от самолета, второе, как правило, – к столкновению двух противоположно закрученных вихревых образований, после чего следует быстрое разрушение интенсивного следа. Интегральные характеристики турбулентности задаются двумя параметрами: среднеквадратичной скоростью пульсаций и масштабом турбулентности.

На высотах, намного больших расстояния между двумя вихрями, вихри опускаются со вре-

менем вниз вместе с воздухом в эллиптической капсуле. Известно, что суммарная циркуляция вихрей уменьшается с течением времени. Это происходит из-за взаимодействия вихрей разного знака. Показано, что диффузия – основной механизм потери циркуляции вихрей в ламинарной жидкости. Благодаря турбулентной диффузии имеет место эффект частичной «аннигиляции» завихренности: завихренность противоположного знака проникает через границу вихря. Кроме того, нестационарные турбулентные возмущения выбрасывают часть завихренной жидкости из капсулы. Она подхватывается внешним потоком и уносится вверх.

На высотах порядка расстояния между вихрями начинается их сильное взаимодействие с завихренным пограничным слоем земной поверхности. По мере дальнейшего опускания вихрей происходит увеличение завихренности приземного пограничного слоя, а затем отрыв пограничного слоя от земной поверхности. В случае слабого ветра отрывные течения образуются под обоими вихрями, а в случае достаточно сильного ветра возможен отрыв только под одним из вихрей. Взаимодействие вихря с отрывным образованием и с завихренностью окружающей атмосферы приводит к тому, что он перестает опускаться и, более того, наблюдается возрастание его высоты. Время жизни вихревого следа и его гидродинамические характеристики зависят от профилей ветра и температуры в приземном слое земли, а также от интенсивности турбулентных пульсаций приземного ветра.

Расчет струйно-вихревого следа с помощью общепринятых моделей замыкания уравнений Рейнольдса приводит к сильной диффузии в ядрах вихрей. Для устранения этого недостатка была предложена модифицированная модель турбулентности. Проведенные многочисленные расчеты показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, полученными как при измерениях в реальных полетах, так и в трубных исследованиях.

Для определения времени жизни вихревого следа были созданы теории линейной пространственной неустойчивости вихревого следа в идеальной жидкости и в турбулентной атмосфере. Показано, что длинноволновая неустойчивость, которая обычно и приводит к разрушениям вихревого следа, связана с волной, «убегающей» от самолета со скоростью его движения. Таким образом, земной наблюдатель будет видеть квазистационарную неустойчивость. Для него волна в фиксированном месте пространства будет, пока не разрушится, иметь одну и ту же фазу, но амплитуда волны будет меняться.

Теоретические исследования процессов диффузии и развития длинноволновой неустойчивости были положены в основу численной программы расчета характеристик течения в струйно-вихревом следе за самолетом. В качестве начального условия используются данные расчета с помощью панельного метода течения около самолета и в ближнем поле за ним.

Математическая модель аэродинамики самолета в вихревом следе

Возможно преднамеренное (на режиме дозирования) и случайное попадание одного самолета в зону влияния вихревого следа от другого самолета. Вихревой след индуцирует дополнительные по отношению к невозмущенному потоку скорости, что приводит к дополнительным силам и моментам, действующим на самолет. Рассматривается задача создания быстродействующих программных модулей для определения этих сил и моментов в зависимости от относительного расположения самолетов, от их скорости, веса и высоты полета.

Расчет дополнительных сил и моментов, действующих на самолет в вихревом следе, за-

нимает около 10 секунд на одну расчетную точку на современном персональном компьютере. Для моделирования динамики самолета на авиационном тренажере в режиме реального времени необходимо уменьшить время определения аэродинамических характеристик до 0.001 секунды, что определяется шагом интегрирования по времени уравнений движения самолета. Для решения этой задачи применяется подход, основанный на аппроксимации полученного массива аэродинамических характеристик с помощью искусственных нейронных сетей. В качестве программных модулей аэродинамики самолета в математическом обеспечении тренажера используются предварительно обученные на расчетных данных искусственные нейронные сети. Применение такой методики позволило кардинально сократить время расчета аэродинамических характеристик самолета в следе с незначительным ухудшением точности их определения.

Для формирования множества паттернов, на котором проходило обучение и тестирование нейронных сетей, проведено около 200 000 расчетов при случайных значениях положения самолета в следе, скорости полета и полетного веса самолета – генератора следа. После обучения нейронных сетей были проведены оценки точности определения приращений сил и моментов, вызванных попаданием самолета в область вихревого следа, по сравнению с расчетными характеристиками.

Рост числа авиaperевозок ведет к неизбежному уменьшению расстояния между летными эшелонами. Поэтому с точки зрения безопасности полетов необходимо обучение летного состава навыкам управления самолетом при попадании в вихревой след. Предложенная выше методика апробирована при моделировании динамики полета самолета при попадании в вихревой след на пилотажном стенде ПСПК-102 ЦАГИ и авиатренажере ФАЛТ МФТИ. Возможно также использование созданной математической модели аэродинамики самолета в вихревом следе при создании оборудования, указывающего летчику на степень вихревой опасности и подсказывающего траекторию облета опасной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 09-08-00642, 10-08-00375, 10-01-00516).

VORTEX WAKE BEHIND A PASSENGER AIRCRAFT*A.M. Gaifullin, Yu.N. Sviridenko*

The work considers the formation and evolution of a vortex wake behind an aircraft in turbulent atmosphere. A mathematical model and a numeral code for calculating a vortex wake have been developed. An approach for mathematically modeling the dynamics of an aircraft which has entered another aircraft's vortex wake is also presented. The approach is based on applying artificial neural networks. The accuracy and high-speed performance of flight simulators mathematical software modules while modeling a flight in the area of a vortex wake influence have been evaluated.

Keywords: vortex wake, aircraft, atmosphere turbulence, flight simulator, neural networks.