

## Вихревой след за летательным аппаратом, условия формирования и структура

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

Рассмотрены условия формирования и развития с течением времени вихревых следов, сгенерированных крылатыми летательными аппаратами. Представлен пример воздействия вихревого следа на летательный аппарат. Описаны методы математического моделирования вихревого следа за летательным аппаратом.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, вихревой след, численные методы, вихревое течение.

Вихревой след – область вихревого течения за летящим самолетом или другим летательным аппаратом (ЛА) [1]. Вихревое течение в аэродинамическом следе – одно из наиболее сложных явлений гидродинамики, требующего особого внимания. Аэродинамический след по времени  $T$  его существования условно делится (рис.1) на ближний спутный след и дальний вихревой след.

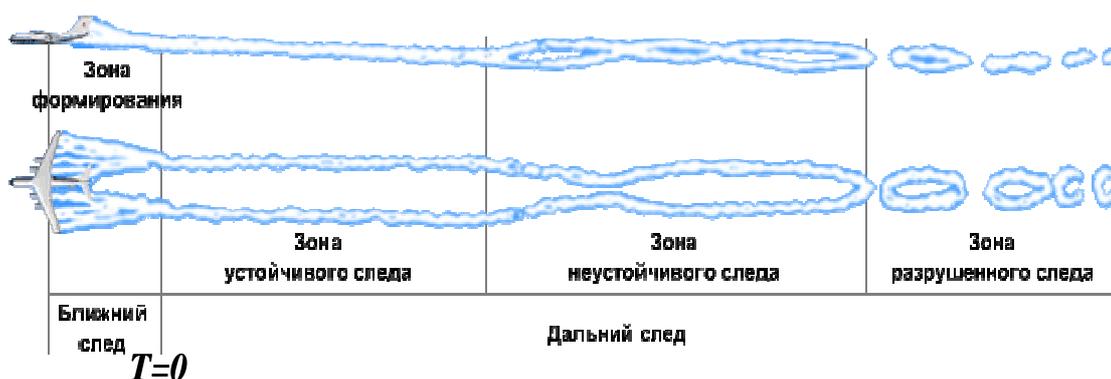


Рис. 1. Структура вихревого следа за ЛА

Структура возмущенного потока в вихревом следе достаточно сложна и зависит от множества факторов, главными из которых являются:

- аэродинамическая компоновка ЛА – генератора вихревого следа;
- полетная масса ЛА;
- режим обтекания ЛА – генератора вихревого следа;
- струи газов, истекающих из сопел двигателей силовой установки ЛА;
- состояние атмосферы.

В зоне формирования вихревого следа вследствие трехмерной модели обтекания происходит сворачивание вихревой пелены, сошедшей с несущих и управляющих поверхностей ЛА в два концевых вихря. Протяженность зоны формирования вихревого следа может составлять порядка 1,5 – 3 размахов крыла самолета – генератора вихревого следа [2].

Началом устойчивой зоны можно считать сечение за ЛА, когда процесс сворачивания вихревой пелены завершился образованием устойчивых вихревых жгутов.

Зона неустойчивого вихревого следа характеризуется начальными деформациями концевых вихрей, что обусловлено собственными возмущениями и атмосферной турбулентностью (рис.2).

Зоне разрушения вихревого следа присущи следующие механизмы:

- волновая неустойчивость;
- интенсивная турбулизация ядра вихря («взрыв» ядра вихря);
- вязкое затухание.

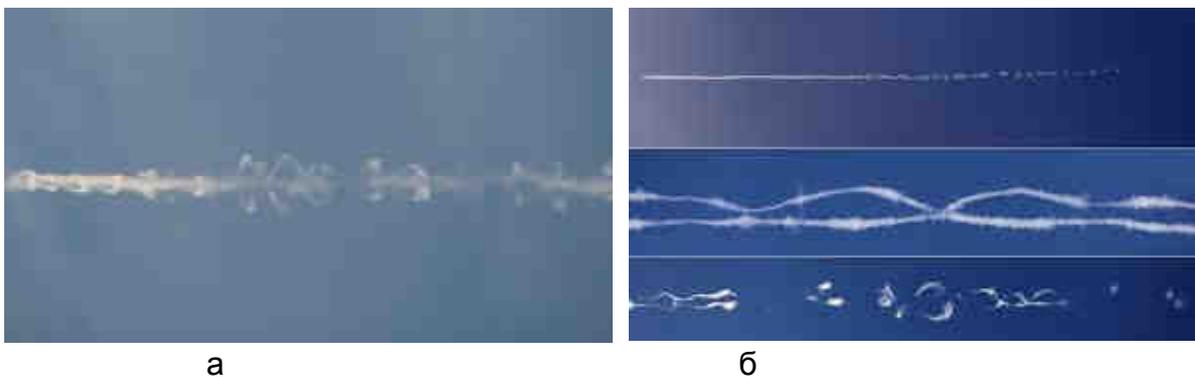


Рис. 2. Разрушение вихревого следа в атмосфере за ЛА:  
а – взрыв ядра вихря; б – вязкое затухание, волновая неустойчивость

Физическая природа "взрыва" ядра вихря связана с наличием осевых скоростей и их изменением с течением времени [3,4]. "Взрыв" ядра вихря для одиночного концевого вихря не означает полного его разрушения, после "взрыва" вихревой жгут может быть достаточно интенсивным (рис. 2, а). Только после серии "взрывов" вихревой жгут теряет организованную структуру и превращается в безопасный для самолетов турбулизированный поток. Явлению "взрыва" могут предшествовать его волновые колебания (рис. 2, б). Как показали лётные эксперименты, "взрыв" может возникать при наибольших и наименьших расстояниях между осями вихрей. Наиболее вероятным представляется возникновение "взрыва" в местах наибольшего искривления осей вихрей.

Вихревой след может оказывать влияние на ЛА при его входе в вихревой след, что вызывает изменение местных возмущенных скоростей его обтекания. Это приводит к возникновению дополнительных неуравновешенных аэродинамических сил и моментов, а следовательно, к отклонению ЛА от исходной траектории полета. Степень влияния вихревого следа на ЛА и его последующее движение зависит от следующих факторов:

- аэродинамических характеристик. Режима полета самолета генератора и самолета, вошедшего в вихревой след;
- расстояния между самолетом-генератором и самолетом, вошедшим в вихревой след;
- атмосферных условий.

Обтекание ЛА, вошедшего в вихревой след, определяется характеристиками концевых вихрей (рис.3). Для вычисления аэродинамических сил и моментов, воздействующих на ЛА при входе в вихревой след, используют экспериментальные и численные методы [5].

Изучение физики волновой неустойчивости представляет собой актуальную задачу особенно для обеспечения безопасности полетов ЛА. Исследование таких явлений разрушений по многим причинам невозможно в аэродинамической трубе,

поэтому исследования вихревого следа безопасно и экономически выгодно проводить с помощью численных методов. Подходы к теоретическим исследованиям вихревого следа можно разделить на три группы:

- 1) приближенные инженерные методики;
- 2) аналитические методы;
- 3) вычислительные (численные) методы.

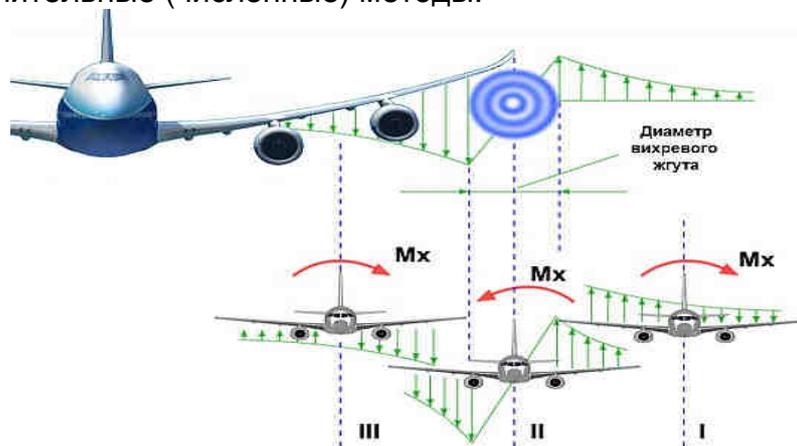


Рис. 3. Пример воздействия вихревого следа на вошедший в него самолет

Инженерные методики [3] позволяют получать результаты на основе эмпирических данных, сведенных в графики, номограммы или полиграммы. Эти методики сравнительно просты и оперативны, не содержат сложных вычислений и дают возможность получить результаты для сложных объектов, в том числе для ЛА в целом. Однако применение их ограничено кругом исследованных параметров и условий обтекания, а получаемая точность результатов, как правило, невысока.

Аналитические методы основаны на решении уравнений теоретической аэрогидродинамики. Достоинством аналитических методов является строгость подхода и математическая достоверность получаемых результатов. Однако возможности этих методов ограничены, так как аналитическое решение задачи удается получать лишь для частных случаев и простейших объектов.

Сегодня существуют три основных подхода численного моделирования турбулентных течений [6]. Наиболее распространенным является метод, основанный на решении уравнений Навье-Стокса с осреднением по времени и последующим замыканием этой системы уравнений при помощи полуэмпирической модели турбулентности. В этом подходе используется осреднение параметров по всему диапазону турбулентных движений. Особенностью данного подхода является то, что при численном исследовании развитой турбулентности необходимо учитывать различные масштабы движения. При этом крупномасштабная турбулентность, зависящая от геометрии среднего течения, не может быть описана универсальными уравнениями, то есть константы полуэмпирической модели должны меняться в зависимости от течения. Мелкомасштабная турбулентность – является равновесной для которой теоретически может быть создана универсальная модель.

Метод прямого численного моделирования турбулентности (direct numerical simulation DNS), лишен указанных выше недостатков так как используется полная, не осредненная по времени, нестационарная система уравнений Навье-Стокса. При этом размер ячейки сетки должен быть

достаточно малым или схема должна быть высокого порядка аппроксимации, что требует огромных затрат компьютерного времени и оперативной памяти.

Метод моделирования крупномасштабной турбулентности (large eddy simulation LES), использует осреднение лишь тех турбулентных движений, масштаб которых меньше размера ячеек сетки. При этом крупные вихри моделируются непосредственно, а мелкие учитываются при помощи замыкающих моделей. В этом методе можно использовать более крупные ячейки сетки, так как необходимо лишь, чтобы подсеточная турбулентность принадлежала интервалу универсального равновесия. Метод LES также требует больших вычислительных ресурсов. Из-за больших затрат вычислительных ресурсов в настоящее время наиболее распространенным является метод осреднения по времени уравнений Навье-Стокса.

Таким образом разработка математических моделей вихревого следа является актуальной задачей, направленной в первую очередь на поддержание заданного уровня безопасности полетов в районе аэропортов и крупных аэроузлов.

### Список литературы

1. Большая Российская энциклопедия. Авиация. – М.: ЦАГИ, 1994. – 736 с.
2. Филатов, Г. А. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере [Текст]/ Г. А. Филатов, Г. С. Пуминова, П. В. Сильвестров. – М.: Транспорт, 1992. – 272 с.
3. Owen, P., Dee, F. Aircraft vortex wakes and the effects on aircraft. – ICAO Circular, / 92 – An/76. – P. 69 – 73.
4. Tomback, I. Observations of atmospheric effects on vortex wake behavior/ Aircraft, 1973, vol. 10, N 11. P. 641 – 646.
5. Кибардин, Ю. А., Физика спутного следа. [Текст]/ Ю. А. Кибардин, А. М. Киселев // Авиация и космонавтика. №3. 1978.
6. Вышинский, В. В. Вихревой след самолёта в турбулентной атмосфере [Текст]/ В. В. Вышинский, Г. Г. Судаков Г.Г // Труды ЦАГИ. – вып. 2667. – 2006. – 155 с.

Поступила в редакцию: 18.11.2015

### Вихровий слід за літальним апаратом, умови формування та структура

Розглянуто умови формування та розвитку з бігом часу вихрових слідів, згенерованих крилатими літальними апаратами. Наведено приклад впливу вихрового сліду на літальний апарат. Описано методи математичного моделювання вихрового сліду за літальним апаратом.

**Ключові слова:** літальний апарат, вихровий слід, числові методи, вихрова течія.

### Vortex Trace Behind Aircraft. Structure and Formation Conditions

The conditions of vortex traces generated by the winged aircraft formation and development in process of time are considered. An example of the vortex trace effects on the aircraft is provided. Methods of mathematical modeling of the vortex traces behind the aircraft are considered.

**Keywords:** aircraft, vortex trace, numerical methods, vortex flow.