

## Оперативные методы расчёта характеристик вихревого следа за самолётами

А. И. Желанников

*Военно-воздушная инженерная академия им. Н.Е. Жуковского, Россия  
Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Россия*

Methods of modeling the near and far vortex wakes of aircrafts with turbojets and air propellers are considered separately. The results of predicting vortex wakes of a series of domestic and foreign aircrafts are presented. The effect of number of factors is taken into account in this case: turbulence and atmosphere stratification, presence of side wind at take-off-landing regimes. The mathematical model of a distant vertical trace behind the airliners, basing on a method of discrete vortices and on N.E. Zhukovsky's theorem of lifting force is described. Results of researches of characteristics of a distant trace behind some airliners are presented. The computer time consumption while modeling the vortex wakes according to the proposed method is 3–4 orders less than in the case of using the well-known numerical methods.

### 1. Общая постановка задачи и её актуальность

В последнее время возрос интерес к исследованию вихревых следов за магистральными самолётами. Это связано со многими причинами, главными из которых являются рост интенсивности воздушного движения в районах крупных аэроузлов и появление новых, в том числе и сверхтяжёлых самолётов массой более 500 тонн. В связи с этим потребовались простые и эффективные методы для расчёта характеристик вихревого следа за такими самолётами. В настоящее время профессионально вихревыми и спутными следами занимаются в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, в ВВИА им. Н.Е. Жуковского и в ЛИИ им. М.М. Громова [1,2,8-11,13,14,16-19]. Кроме того, в части касающейся воздушных судов гражданской авиации (ГА) вихревыми и спутными следами занимаются в академии ГА и ГосНИИ ГА [23]. Математические модели вихревых следов ВВИА традиционно строились на базе метода дискретных вихрей [1,3-7,12,15,22].

В данной работе показывается, что для расчёта характеристик дальнего вихревого следа за магистральными самолётами можно упростить математическую модель дальнего вихревого следа, изложенную в монографиях [2,13] и в работе [14]. Предлагается в этой модели для расчёта характеристик дальнего вихревого следа за магистральными самолётами в качестве исходных данных использовать циркуляции вихрей, рассчитанные по формуле Н.Е. Жуковского, положив равенство подъёмной силы  $Y_a$  и массы летательного аппарата  $G$ , рисунок 1.

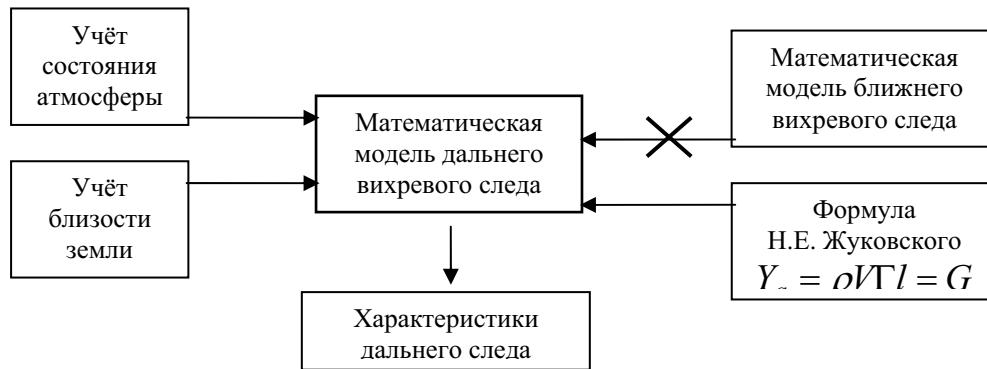


Рисунок 1. Блок-схема оперативной методики расчёта характеристик вихревого следа.

Затем, эту суммарную циркуляцию необходимо правильно распределить между вихрями, сходящими с крыла, стабилизатора и закрылков для самолётов с турбореактивными двигателями (ТРД), а для самолётов с турбовинтовыми двигателями (ТВД), ещё и учесть закрутку потока винтами, рисунок 2.

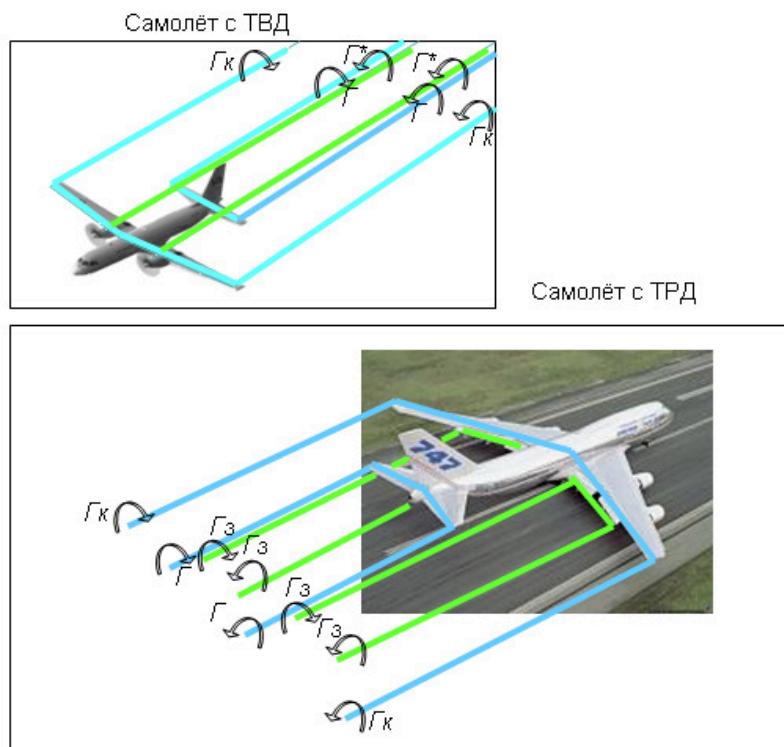


Рисунок 2. Вихревые схемы для расчёта дальнего вихревого следа.

В данной работе предлагается распределить суммарную циркуляцию  $\Gamma$  для самолёта с ТРД, совершающего полёт на крейсерском режиме между

крыльевыми вихрями  $\Gamma_k$  и вихрями, сходящими со стабилизатора  $\Gamma_c$  пропорционально площадям крыла и стабилизатора. Для взлётно-посадочных режимов циркуляция вихря, сходящего с крыла  $\Gamma_k$  распределяется между крыльевым вихрём  $\Gamma_k$  и вихрём, сходящем с закрылка  $\Gamma_z$  пропорционально длине закрылка. Циркуляция вихря, учитывающего закрутку потока  $\Gamma^*$  рассчитывается в соответствии с методикой работы [18].

Таким образом, для математической модели дальнего вихревого следа в качестве исходных данных используются не результаты расчёта циркуляций множества дискретных вихрей по математической модели ближнего вихревого следа, как это было раньше, а данные формулы Н.Е. Жуковского для двух крыльевых вихрей.

## 2. Проверка работоспособности методики и достоверности получаемых результатов

Для подтверждения работоспособности такой упрощённой математической модели и достоверности получаемых по ней результатов были выполнены расчёты, которые затем сравнивались с результатами лётного эксперимента. На рис. 3 представлены результаты расчёта центров вихревых жгутов за самолётом Ил-76. Здесь воспроизведены условия, при которых произошла катастрофа самолёта Як-40 16 января 1987 года в г. Ташкенте. По материалам расследования было установлено, что причиной катастрофы Як-40 стал правый концевой вихрь, который под действием бокового ветра справа 0.5-1.5 м/с сместился к центру взлётно-посадочной полосы и завис над ней на высоте 20 метров. При этом Ил-76 пролетел место катастрофы на высоте 40 метров.

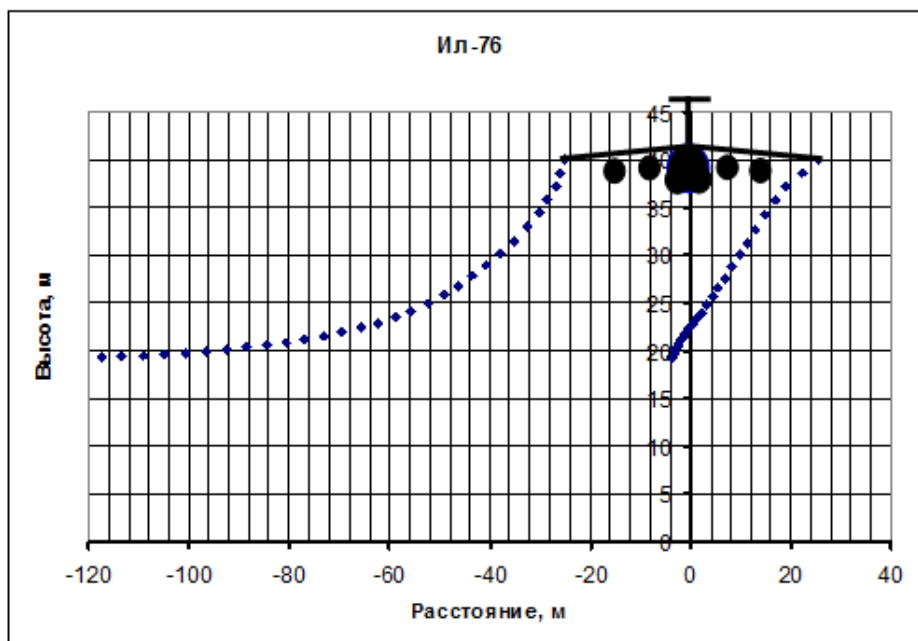


Рисунок 3. Вихревой след за самолётом Ил-76 при наличии бокового ветра

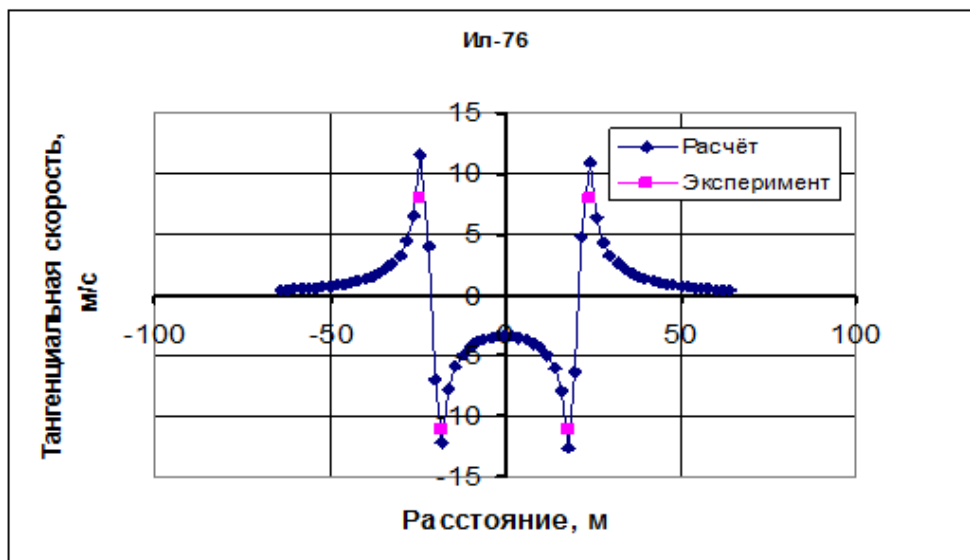


Рисунок 4. Распределение тангенциальной скорости в ядре вихря самолёта Ил-76.

Расчёты показывают, что действительно при данных условиях полёта правый концевой вихрь зависает на высоте 20 метров практически над центром взлётно-посадочной полосы, что косвенно также подтверждает работоспособность данной методики.

На рисунке 4 показано распределение тангенциальной скорости в ядре вихря самолёта Ил-76 через 60 с после пролёта места замера скорости на высоте 100 м. Ромбики – расчёт, квадратики – эксперимент (в/ч 15650). Видим удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных.

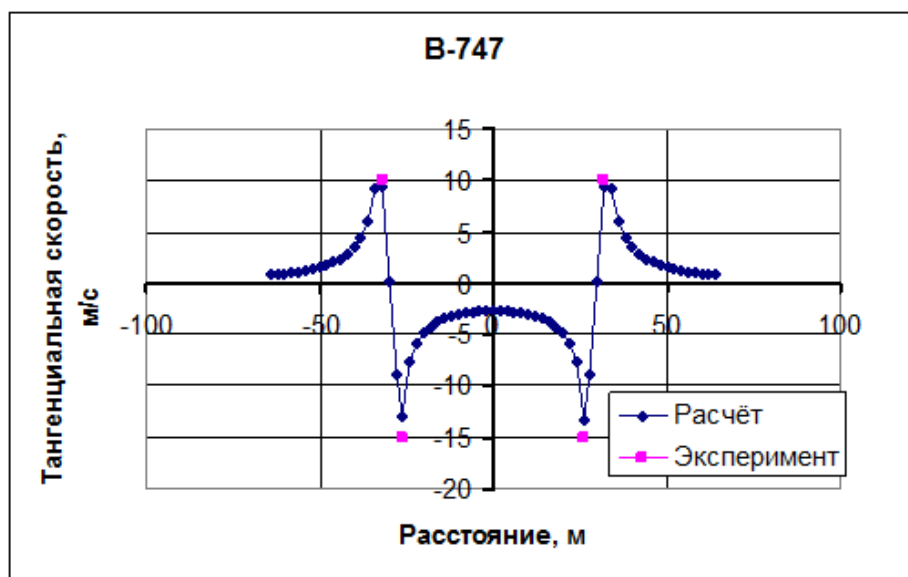


Рисунок 5. Распределение тангенциальной скорости в ядре вихря самолёта В-747.

На рисунке 5 показано распределение тангенциальных скоростей в ядре самолёта В-747 через 10 с после пролёта места замера скоростей на высоте 100 м. Ромбики – расчёт, квадратики – эксперимент (Department of transportation USA). Видим также удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что за магистральными самолётами можно рассчитывать характеристики вихревого следа по данной упрощённой методике.

### 3. Результаты исследований характеристик вихревого следа за самолётами Ан-124, В-747 и А-380

Приводятся результаты исследования характеристик дальнего вихревого следа за самолётами Ан-124 (размах крыла  $L=73.6$  м, взлётный вес  $G=405$  т), В-747 (размах крыла  $L=59.64$  м, взлётный вес  $G=365$  т) и А-380 (размах крыла  $L=79.8$  м, взлётный вес  $G=560$  т). Это три самых больших (исключая Ан-225 «Мрия») самолёта в мире. Характеристики вихревого следа приводятся в сравнении этих самолётов друг с другом.

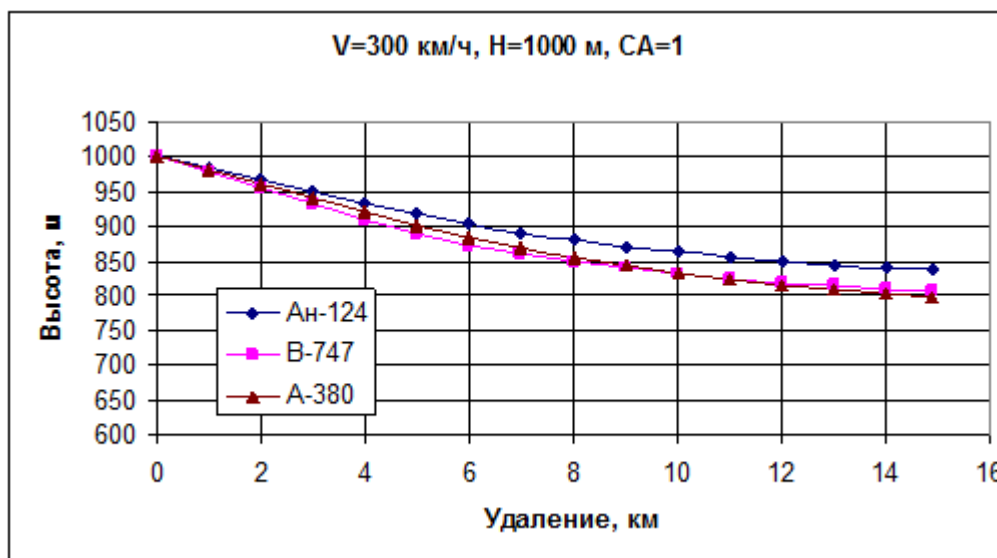


Рисунок 6. Положение центров вихревых жгутов самолётов Ан-124, В-747, и А-380

На рисунке 6 приведены результаты расчёта положения центров вихревых жгутов за самолётами Ан-124, В-747 и А-380, летящих на высоте  $H=1000$  м со скоростью  $V=300$  км/ч при очень устойчивом состоянии атмосферы ( $CA=1$ ). Расчёты показали, что в очень спокойной атмосфере вихревой след за самолётами В-747 и А-380 на удалении  $X=15$  км опустился на  $\Delta H=-200$  м. За самолётом Ан-124 на этом же удалении вихревой след опустился на  $\Delta H=-160$  м. При этом были рассчитаны вертикальные скорости в ядре концевых крыльевых вихрей. На рисунке 7 приведены графики распределения вертикальной скорости за самолётами Ан-124, В-747 и А-380, летящих на высоте  $H=1000$  м со скоростью  $V=300$  км/ч при  $CA=1$  на удалении от самолётов  $X=50$  м. Видим, что

в этом случае вертикальные скорости в ядре вихрей самолётов Ан-124, В-747 и А-380 не превышают (+25) – (-30) м/с.

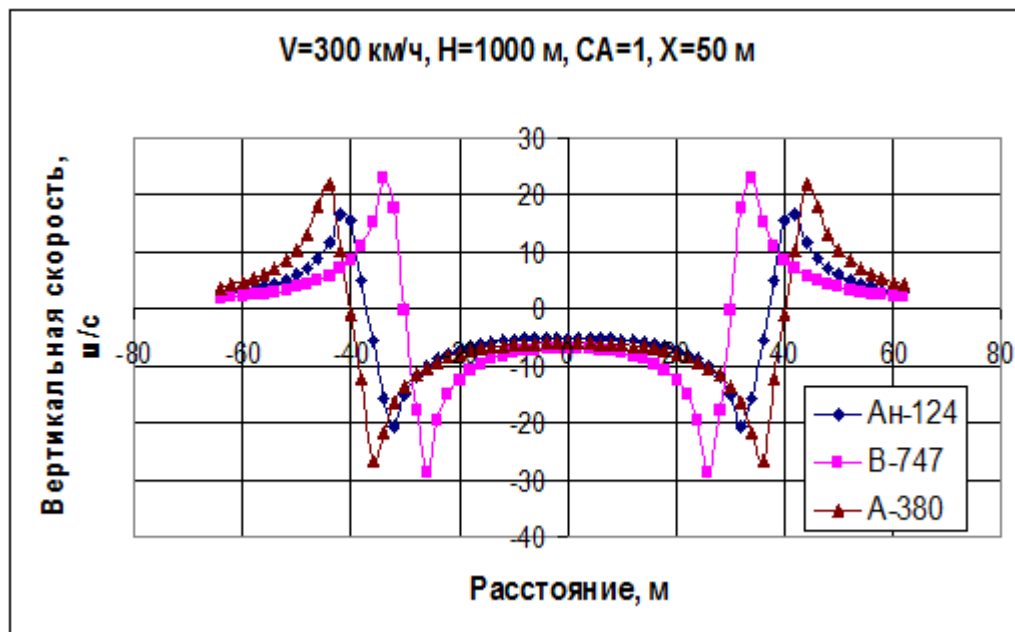


Рисунок 7. Распределение вертикальной скорости в ядре вихря самолётов

Таким образом, по предлагаемой методике можно вполне достоверно и главное оперативно рассчитывать характеристики вихревого следа за магистральными самолётами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аубакиров Т.О., Белоцерковский С.М., Желанников А.И., Ништ М.И. Нелинейная теория крыла и ее приложения. Алматы, Гылым, 1997.
2. Аубакиров Т.О., Желанников А.И., Иванов П.Е., Ништ М.И. Спутные следы и их воздействие на летательные аппараты. Моделирование на ЭВМ. Алматы. 1999.230 с.
3. Белоцерковский С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. М., Наука, 1965.
4. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М., Наука, 1978.
5. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях и их применение в аэродинамике, теории упругости, электродинамике. М., Наука, 1985.
6. Бушуев В.И., Ганиев Ф.И., Локтев Б.Е., Ништ М.И., Шамшурин А.Д. Аэродинамическая компоновка и характеристики летательных аппаратов. М., Машиностроение. 1991.

7. Вайникко Г.М., Лифанов И.К., Полтавский Л.Н. Численные методы в гиперсингулярных интегральных уравнениях и их приложения. М., ТОО «Янус-К», 2001.
8. Вышинский В.В. Вихревой след самолета, безопасность полета и кризис аэропортов. – Полет, ЦАГИ, 1998.
9. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере. Труды ЦАГИ, вып. 2667, 2006, 155с.
10. Гайфуллин А.М. Исследование вихревых структур, образующихся при обтекании тел жидкостью или газом. Изд. ЦАГИ, 2006, 138с.
11. Гайфуллин А.М., Звонова Ю.С., Свириденко Ю.Н. Расчет интерференции турбулентной струи двигателя с планером самолета. Труды ЦАГИ, 2002, вып.2655, с. 160-166.
12. Гандель Ю.В., Мищенко В.О. Математическое моделирование в электродинамике на базе сингулярных интегральных уравнений и проект программной системы. // Математическое моделирование. Сб.науч.тр./НАН Украины. Ин-т математики. – Киев, 1996. – С.70-74.
13. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы самолётов. Физматлит, М., 2008.
14. Головнёв А.В., Желанников А.И., Ерёменко С.М., Некраха С.И. Учёт земли при расчёте нестационарного обтекания летательных аппаратов. Материалы XVI школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». ЦАГИ, 2005.
15. Гуляев В.В., Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Матвеев А.И., Подобедов В.А., Попов В.М. Математическое моделирование при формировании облика летательного аппарата. М., Машиностроение, 2005.
16. Желанников А.И. Вихревая опасность. Журнал «Вестник академии наук авиации и воздухоплавания», №2. М., 2003.
17. Желанников А.И. Невидимая опасность. Журнал «Полёт», №3, 2006 г., с.17-20.
18. Желанников А.И., Гуляев В.В., Морошкин Д.В., Ушаков С.А. Математическая модель дальнего вихревого следа за самолётами с воздушными винтами. Научный вестник МГТУ ГА № 111, серия «Аэромеханика и прочность», Москва 2007 г. с. 16-21., с. 21-27.
19. Замятин А.Н., Завершневу Ю.А. Натурные исследования структуры и развития вихревого следа среднемагистрального самолёта в приземном слое атмосферы. Научно-технический сборник №163, ЛИИ, 1984.
20. Крицкий Б.С. Моделирование ближнего следа за несущим винтом. Научный вестник МГТУ ГА, №37, серия «Аэромеханика и прочность», 2001.
21. Лифанов И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М., ТОО «Янус», 1995.
22. Морозов В.И., Пономарев А.Т., Рысев О.В. Математическое моделирование сложных аэроупругих систем. М., Изд. «Физматлит», 1995.
23. Филатов Г.А., Пуменова Г.С., Сильвестров П.И. Безопасность полётов в возмущённой атмосфере. М., «Транспорт», 1992.

Надійшла 30.03.2009.