

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – *Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;*
- 2.5.13 – *Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;*
- 2.5.14 – *Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;*
- 2.5.15 – *Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;*
- 2.5.16 – *Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов*

УДК 629.7.016:533.68

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Вихревая безопасность при полете на заданном эшелоне

А.И. Желанников¹

¹*Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия*

Аннотация: С каждым годом возрастает интенсивность воздушного движения между странами и внутри отдельных стран. Как правило, воздушные трассы для полетов проходят по одним и тем же маршрутам. В результате этого образуются так называемые дороги в небе. А где дороги, там со временем появляются ухабы. В данном случае в виде воздушных ям, восходящих и нисходящих потоков и повышенной турбулентности. Важную роль в обеспечении безопасности полетов воздушных судов по маршрутам оказывает продольное и вертикальное эшелонирование. В настоящее время принят ряд регламентирующих документов, определяющих безопасные дистанции на эшелоне. Так, при наличии турбулентности в вихревом следе продольное эшелонирование основывается на разбивке типов воздушных судов на три категории в соответствии с максимальной сертифицированной взлетной массой. А с ноября 2011 г. в России внедрен западный стандарт вертикального эшелонирования RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum). Вертикальное эшелонирование – это расстояние между вертикальными эшелонами полета воздушных судов по маршруту. Ранее это расстояние составляло 600 м (2 000 футов), но в связи с ростом интенсивности воздушного движения было принято решение уменьшить вертикальное эшелонирование до 300 м (1 000 футов). Таким образом, на самом распространенном эшелоне полетов воздушных судов вертикальное эшелонирование составляет 300 м. Возникает вопрос, а обеспечивает ли это расстояние безопасность воздушных перевозок? Дело в том, что высота эшелона совсем необязательно совпадает с реальной высотой полета воздушного судна. Высотомеры в самолетах – по сути калибруемые барометры, то есть высоты они вычисляют по разнице давления на земле и в воздухе. Для вычисления истинной высоты потребовалось бы постоянно вносить в высотомеры данные об атмосферном давлении в каждой точке маршрута и учитывать высоту этих точек над уровнем моря. Поэтому принято пользоваться стандартным давлением. Если на всех воздушных судах будет установлено одинаковое значение давления на альтиметре, то и показания высоты на приборе в заданной точке воздушного пространства будут одинаковыми. Поэтому с определенного момента при наборе высоты (высота перехода) и до определенного момента при снижении (эшелон перехода) высота воздушного судна рассчитывается по стандартному давлению. Значение стандартного давления (QNE) одинаково во всем мире и составляет 760 мм рт. ст. (1013,2 гектопаскаля). Таким образом, полет по маршруту контролируется по альтиметру, барометрическому высотомеру, который входит в пилотажно-навигационный комплекс. Анализ точности работы этого прибора показывает, что при резком перепаде атмосферного давления показания альтиметра могут отличаться от истинного показания на ± 100 м. Известно, что за летящим самолетом образуется вихревой след. Со временем вихревой след опускается вниз и может оказаться на другом эшелоне. Может ли это стать причиной воздушных ям на эшелоне? Для ответа на поставленный вопрос в качестве объекта исследования был выбран самолет А-380. Это один из самых больших самолетов в мире. Поэтому исследование вихревого следа за А-380 на эшелоне полета как самом опасном с точки зрения воздействия его вихревого следа на другие самолеты позволит понять, насколько безопасны и обоснованны приняты продольное и вертикальное эшелонирование. Для исследования был использован специальный расчетно-программный комплекс, базирующийся на методе дискретных вихрей. Этот комплекс прошел необходимую апробацию и государственную регистрацию.

Ключевые слова: воздушное движение, воздушные трассы, эшелон полета, воздушное судно, вихревой след.

Для цитирования: Желанников А.И. Вихревая безопасность при полёте на заданном эшелоне // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 81–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Vortex safety when flying at an assigned flight level

A.I. Zhelannikov¹

¹Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia

Abstract: Air traffic intensity between countries and within individual countries is increasing year by year. As a rule, airways follow the same routes. As a result, so-called “roads in the sky” are formed. And where there are roads, there are bumps by the time, in the form of CAT, updraughts and downdraughts and increased turbulence. Horizontal and vertical separation plays an important role in ensuring flight safety on route. Currently, a variety of regulatory documents, defining safe separation at the flight level, has been adopted. Thus, provided there is turbulence in the vortex wake, longitudinal separation is based on the arrangement of aircraft types by three categories according to their maximum certified take-off weight. Since November 2011, the Western standard of vertical separation RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum) has been introduced in Russia. Vertical separation is the distance between the vertical flight levels on route. Previously, this distance amounted to 600 m (2000 ft), but due to the increasing intensity of air traffic, it was decided to reduce the vertical separation to 300 m (1000 ft). Hence, at the most common flight level, the vertical separation is 300 m. The question arises if this separation ensures the safety of air transportation? The fact is that the altitude of the flight level does not necessarily coincide with the actual aircraft height. Aircraft altimeters are, inherently, calibrated barometers, that calculate the altitude by the difference in pressure on the ground and in the air. To calculate the height above ground, it would be necessary to constantly input atmospheric pressure data to altimeters at each waypoint and take into consideration the waypoint altitude above the sea level. Consequently, it is customary to use standard pressure. If the same pressure values are set on the altimeter on all aircraft, then, altitude readings on the instrument at an assigned point of airspace will be similar. Therefore, from a certain moment during the climb (transition level) to a certain moment during the descent (transition level), the aircraft height is calculated according to the standard pressure. The value of the standard pressure (QNE) is the same all over the world and amounts to 760 mmHg (1013.2 hectopascals). Thus, the flight on route is controlled by an altimeter, a barometric altimeter, which is comprised into the integrated flight and navigation system. An analysis of the instrument accuracy shows that when atmospheric pressure drops, altimeter readings may differ from true reading by ± 100 m. It is known that a trailing vortex forms behind a flying plane. By the time, the trailing vortex descends and may be found at another flight level. May this cause air bump at the flight level? To answer this question, the A-380 aircraft was chosen as the object of research. This is one of the largest aircraft in the world. Therefore, the study of a trailing vortex behind the A-380 at the flight level, as the most dangerous in terms of the impact of its trailing vortex on other aircraft, will allow us to understand how safe and reasonable the accepted vertical and horizontal separation is. For the study, the special computational software system, based on the discrete vortex method, was used. This complex has passed the evaluation test and the state registration.

Key words: air traffic, airways, flight level, aircraft, trailing vortex.

For citation: Zhelannikov, A.I. (2024). Vortex safety when flying at an assigned flight level. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 3, pp. 81–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-81-91

Введение

Вихревая безопасность при полете на эшелонах остается актуальной проблемой для гражданской авиации¹. В данной статье речь пойдет о безопасности полета на эшелоне. Отметим, что важную роль в обеспечении безопасности полетов ВС по маршрутам оказывает продольное и вертикальное эшелонирование. В приказе Минтранса РФ от 25 ноября 2011 г. № 293 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Организация воздушного движения в Российской Федерации”» с изменениями и дополнениями от

26 апреля 2012 г., 12 мая 2014 г., 21 июля 2016 г. и 14 февраля 2017 г. в п. 3.8. минимумы продольного эшелонирования при наличии турбулентности в следе основываются на разбивке типов воздушных судов (ВС) на три категории в соответствии с максимальной сертифицированной взлетной массой: тяжелые ВС – массой 136 000 кг и более, средние ВС – массой менее 136 000 кг, но более 7 000 кг и легкие – массой 7 000 кг и менее. Продольное эшелонирование – это расстояние между ВС, летящими на одном эшелоне.

С ноября 2011 г. в России внедрен западный стандарт вертикального эшелонирования RVSM (Reduced Vertical Separation Minimum). Вертикальное эшелонирование – это расстояние между вертикальными эшело-

¹ Doc 10004: Global Aviation Safety Plan 2023-2025 // ICAO, 2022. 58 p.

нами полета ВС по маршруту. Ранее это расстояние составляло 600 м (2 000 футов), но в связи с ростом интенсивности воздушного движения было принято решение уменьшить вертикальное эшелонирование до 300 м (1 000 футов). Вертикальное эшелонирование 300 м действует от эшелона 900 м до эшелона 8 100 м. На других эшелонах это расстояние увеличено. Например, на эшелоне выше 8 100 м вертикальное эшелонирование составляет 500 м, а выше 12 100 м – 1 000 м.

Таким образом, на самом распространенном эшелоне полетов ВС вертикальное эшелонирование составляет 300 м. Возникает вопрос, а обеспечивает ли это расстояние безопасность воздушных перевозок? Дело в том, что высота эшелона совсем необязательно совпадает с реальной высотой полета ВС. Высотомеры в самолетах – по сути калибруемые барометры, то есть высоту они вычисляют по разнице давления на земле и в воздухе. Для вычисления истинной высоты потребовалось бы постоянно вносить в высотомеры данные об атмосферном давлении в каждой точке маршрута и учитывать высоту этих точек над уровнем моря. Поэтому принято пользоваться стандартным давлением. Если на всех ВС будет установлено одинаковое значение давления на альтиметре, то и показания высоты на приборе в заданной точке воздушного пространства будут одинаковыми. Поэтому с определенного момента при наборе высоты (высота перехода) и до определенного момента при снижении (эшелон перехода) высота ВС рассчитывается по стандартному давлению. Значение стандартного давления (QNE) одинаково во всем мире и составляет 760 мм рт. ст. (1013,2 гектопаскаля). Таким образом, полет по маршруту контролируется по альтиметру, барометрическому высотомеру, который входит в пилотажно-навигационный комплекс. Анализ точности работы этого прибора показывает, что при резком перепаде атмосферного давления показания альтиметра могут отличаться от истинного показания на ± 100 м.

Актуальность данного исследования связана еще с тем, что с каждым годом возрастает интенсивность воздушного движения



Рис. 1. «Дорога в небе» над Аравийским полуостровом

Fig. 1. "The road in the sky" over the Arabian Peninsula

между странами и внутри отдельных стран. Как правило, воздушные трассы для полетов проходят по одним и тем же маршрутам. В результате этого образуются так называемые дороги в небе. В качестве примера на рис. 1 показана такая дорога над Аравийским полуостровом. Фото взято с сайта Flighadar24. А где дороги, там со временем появляются ухабы. В данном случае в виде воздушных ям, крупномасштабных вихрей, а также восходящих и нисходящих воздушных потоков. Возникает вопрос, а не сами ли самолеты на эшелонах портят свою дорогу? В данной статье делается попытка ответить на этот вопрос.

Воздушное движение управляется диспетчерами, которые следят за тем, чтобы ВС, летящие на одном эшелоне, не сблизились друг с другом менее чем на 5 км. Обычно это расстояние составляет 10–15 км. Хотя в приказе Минтранса РФ от 17.07.2008 № 108 (ред. от 23.06.2009) «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и вы-

полнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» в п. 10.10.1 минимальные интервалы продольного эшелонирования при полетах ВС по одному маршруту и на одном эшелоне при наличии радиолокационного контроля устанавливаются не менее 20 км.

Известно, что за летящим самолетом образуется вихревой след² [1]. Заметим, что вихревой след – это область возмущенного воздушного потока за самолетом, образующаяся в результате его движения. Со временем вихревой след опускается вниз и может оказаться на другом эшелоне. Кроме того, вихревой след при определенных условиях может остаться и на данном эшелоне. В настоящей статье на основании исследования вихревого следа за самолетом А-380 при полете на эшелоне делается попытка понять, насколько обоснованно и безопасно принятое на сегодня продольное и вертикальное эшелонирование. Самолет А-380 выбран в качестве объекта исследования не случайно. Это один из самых больших самолетов в мире и самый опасный с точки зрения воздействия его вихревого следа на другие самолеты. На сегодняшний день известно, что всего в мире построен 251 самолет этого класса. Поэтому А-380 в настоящее время активно эксплуатируется многими мировыми авиационными компаниями. Заметим, что самолет А-380 может перевозить до 850 пассажиров, а его полетная масса достигает 560 т.

Для исследования был использован специальный расчетно-программный комплекс [2], базирующийся на методе дискретных вихрей². В нем при расчете характеристик вихревого следа учитываются полетный вес, скорость и высота полета самолета, его полетная конфигурация, атмосферные условия, осевая скорость в ядре вихря и некоторые другие факторы. Этот комплекс прошел необходимую апробацию и государственную регистрацию. Был выполнен ряд мероприятий по валидации и верификации разработанного комплекса, подтверждающих рабо-

тоспособность программ, входящих в него, и достоверность получаемых результатов. Получены результаты, анализ которых позволяет понять, может ли вихревой след за А-380, летящим на заданном эшелоне быть причиной повышенной турбулентности и воздушных ям на своем и других эшелонах полета. В настоящее время известны многочисленные работы по безопасности полетов ВС [3–9], а также работы [10–14], в которых исследуется вихревой след за воздушными судами, но практически отсутствуют работы по исследованию вихревого следа на эшелоне полета.

Методика исследования

Исследование характеристик вихревого следа за самолетом А-380 проводилось с помощью расчетно-программного комплекса [2], основные положения и идеи которого описаны в монографиях² [15–17] и статьях [18–20]. Известны работы [19–26], в которых вихревой след исследуется альтернативными методами. Основу расчетно-программного комплекса составляет математическая модель дальнего вихревого следа², в которой возмущенные воздушным судном скорости получены на основе точного решения уравнения Гельмгольца [16]. Это позволило учесть диссипацию и диффузию вихрей, моделирующих вихревой след. Эти явления сопровождают естественный процесс затухания вихрей в реальной атмосфере. Для оценки состояния атмосферы в математической модели дальнего вихревого следа расчетно-программного комплекса использовалось число Ричардсона Ri^2 .

Учет влияния осевой скорости в ядре вихря на характеристики дальнего вихревого следа в реальном полете сводится к появлению дополнительного разряжения в ядре и дополнительных скоростей к центру вихрей. В разработанной математической модели дальнего вихревого следа распределение осевой скорости V_x в вихревом жгуте считается известным. Также считается, что в ядре вихря это распределение осесимметрично.

$$V_x = V_x(x, r'), \quad r' = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|.$$

² Doc 10004: Global Aviation Safety Plan 2023-2025 // ICAO, 2022. 58 p.

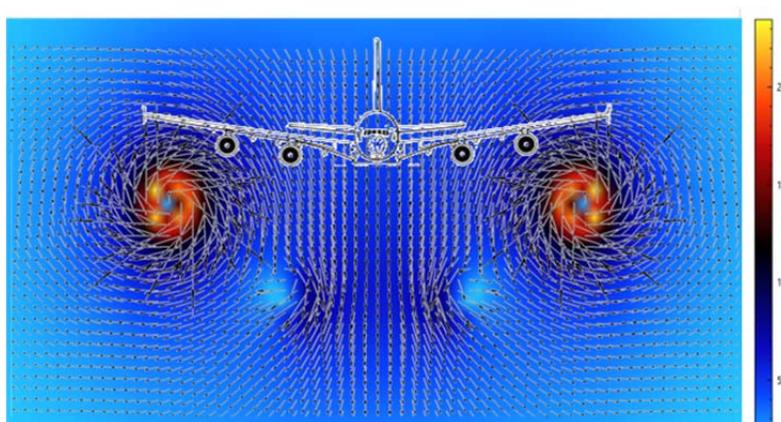


Рис. 2. Поле возмущенных скоростей за А-380, X = 1 км
Fig. 2. Field of perturbed velocities behind A-380, X = 1 km

Здесь r – координата произвольной точки, r_0 – координата вихря. Так как рассматривается модель несжимаемой жидкости [17], то $\text{div } \mathbf{V} = 0$. Если ввести систему координат, связанную с самолетом, то справедливы следующие рассуждения. Если осевая скорость непостоянна вдоль оси oX , то

$$\frac{\partial}{\partial y} V_y + \frac{\partial}{\partial z} V_z = -\frac{\partial}{\partial x} V_x \neq 0.$$

В двумерной постановке в плоскости YoZ это соответствует наличию источников (стоков) с плотностью $q = -\frac{\partial}{\partial x} V_x$. Эти источники индуцируют скорость

$$\mathbf{V}_q(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_q}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_q|^2} q(y_q, z_q) ds.$$

При осесимметричном распределении источников имеем

$$\mathbf{V}_q(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2} Q(\mathbf{r}), \quad Q(\mathbf{r}) = \int_0^r r' \frac{\partial}{\partial x} V_x(r') dr'.$$

Таким образом, зная значение и закон распределения осевой скорости в ядре вихря, определяем интенсивность источника (стока) $Q(r)$. Через $Q(r)$ определяем дополнительную скорость в произвольной точке [3].

Результаты исследования

В качестве объекта исследования был выбран самолет А-380 как один из самых опасных с точки зрения воздействия вихревого следа на другие самолеты. В расчетах высота полета составляла $H = 8\,000$ м, скорость полета $V = 850$ км/ч, расстояние за самолетом, до которого рассчитывался вихревой след, составляло 30 км. Полетный вес самолета А-380 в расчетах составлял 560 т. При этом состояние атмосферы в расчетах вводилось как нейтральное, что соответствовало числу Ричардсона $0,01 \geq Ri \geq -0,01$ [1]. На нижеприведенных графиках все линейные размеры для удобства восприятия выполнены в одном масштабе. На рис. 2 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении $X = 1$ км в виде тангенциальной скорости W_t , посчитанной по формуле

$$W_t = \sqrt{W_z^2 + W_y^2}.$$

Здесь W_z и W_y – составляющие возмущенной скорости по осям oZ и oY связанной с самолетом системы координат. Величину тангенциальной скорости W_t в м/с можно оценить по шкале справа от рисунка, а ее направление по направлению стрелки. Хорошо видны вихри, сошедшие с крыла и стабилизатора. Контур самолета А-380 на рис. 2 позволяет

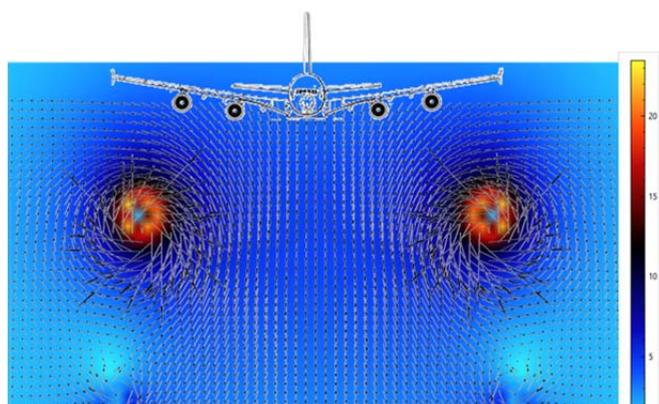


Рис. 3. $X = 5$ км
Fig. 3. $X = 5$ km

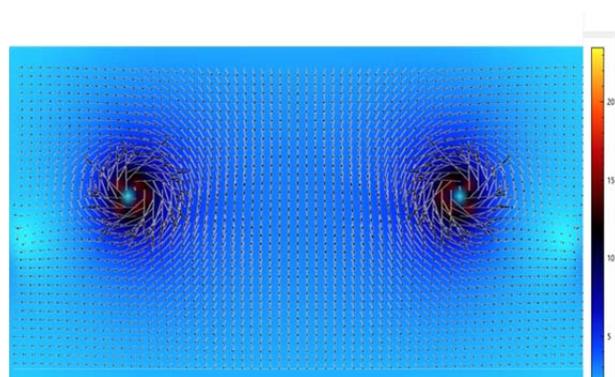


Рис. 4. $X = 10$ км
Fig. 4. $X = 10$ km

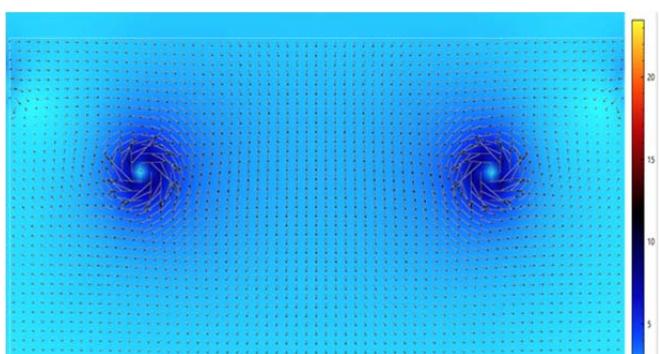


Рис. 5. $X = 15$ км
Fig. 5. $X = 15$ km

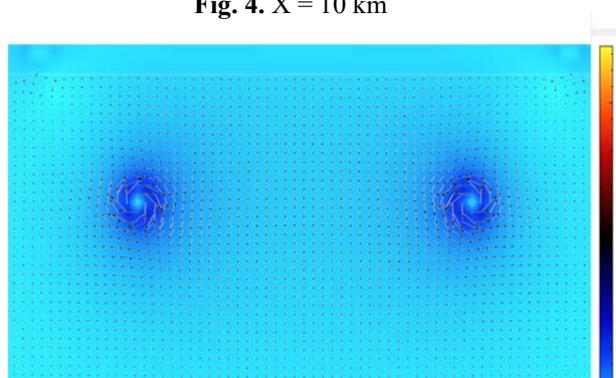


Рис. 6. $X = 20$ км
Fig. 6. $X = 20$ km

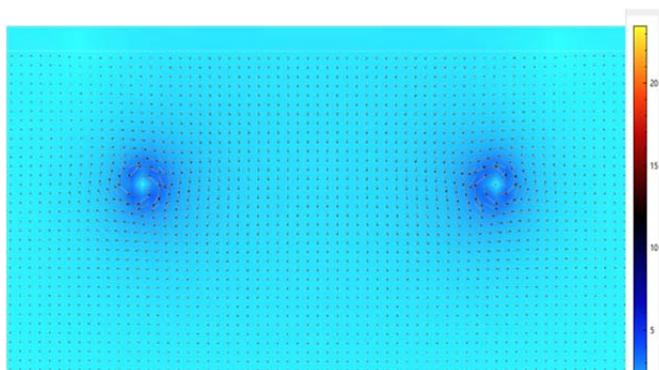


Рис. 7. $X = 25$ км
Fig. 7. $X = 25$ km

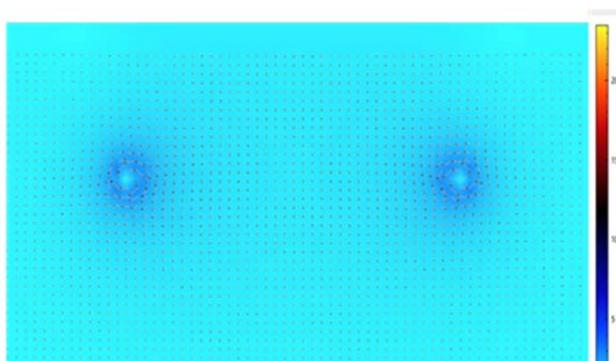


Рис. 8. $X = 30$ км
Fig. 8. $X = 30$ km

оценить положение вихрей относительно самолета на данном удалении.

На рис. 3 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении 5 км. Видим, что на удалении 5 км возмущенные скорости достигают 25 м/с и более. На рис. 4–8 показаны поля возмущенных скоростей за самолетом А-380 на удалении 10, 15, 20, 25 и 30 км. Видим, что при увеличении удаления X от самолета интенсивность вихревого следа уменьшается. Но даже на

удалении $X = 25$ км от самолета возмущенные скорости достигают 5–7 м/с. На этих рисунках контур самолета А-380 отсутствует, так как он находится выше границ рисунка.

На рис. 9 показано положение центров крыльевых вихревых жгутов за А-380 в зависимости от удаления до самолета X , полученное расчетом. Видим, что при заданных условиях полета на удалении 30 км вихревой след опустился более чем на 60 м. Заметим, что на рис. 9 показано положение только

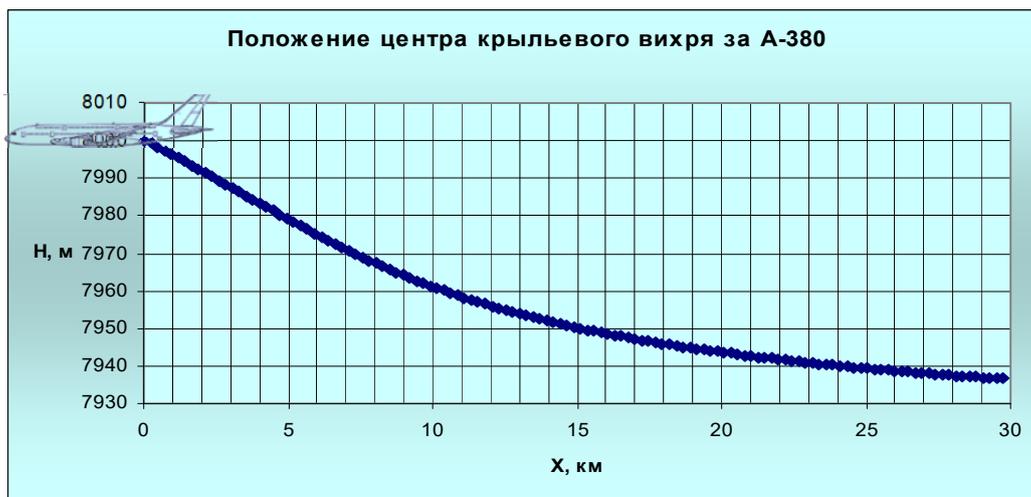


Рис. 9. Положение центра крыльевого вихря за самолетом А-380
Fig. 9. The position of the wing vortex center behind the A380 aircraft

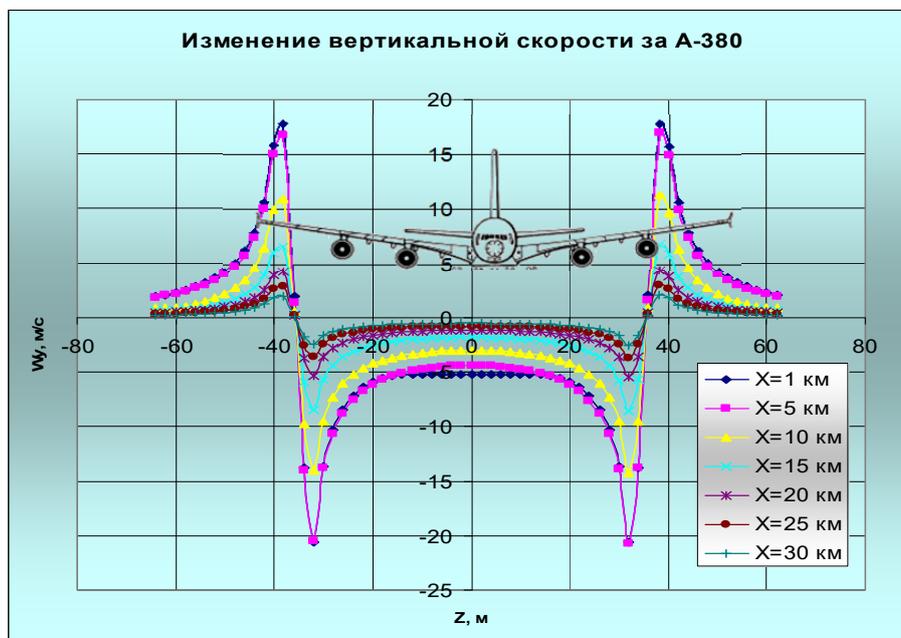


Рис. 10. Изменение вертикальной скорости за А-380
Fig. 10. Change of vertical speed behind the A380 aircraft

центров вихрей. Сам вихрь имеет свои размеры. В момент схода вихря с планера самолета диаметр его более 20 м. С увеличением удаления до самолета, за счет диссипации и диффузии, интенсивность вихревого следа уменьшается, но диаметр вихря остается заметным.

Важной характеристикой вихревого следа являются вертикальные скорости. Именно они могут быть причиной воздушных ям на эшелоне. На рис. 10 показано полученное расчетом изменение вертикальной скорости

за самолетом А-380 на удалении $X = 1, 5, 10, 15, 20, 25$ и 30 км. Видим, что на удалении $X = 10\text{--}15$ км вертикальные скорости составляют $10\text{--}15$ м/с.

Выводы

Расчеты показали, что вихревой след за одним из самых больших самолетов в мире А-380 при полете на эшелоне может представлять опасность для других самолетов. Вихревой след за А-380 на удалении

$X = 10\text{--}15$ км опускается на $40\text{--}50$ м, а тангенциальные скорости в нем достигают более 15 м/с. Вертикальные скорости при этом составляют $10\text{--}15$ м/с. Учитывая то, что рекомендуемые дистанции на эшелоне полета составляют $10\text{--}15$ км, а показания альтиметра (барометрического высотомера) при резком перепаде атмосферного давления могут отличаться от истинного показания на ± 100 м, вполне возможно попадание другого самолета в вихревой след от А-380. Таким образом, при полете на одном эшелоне летящий следом за А-380 самолет на дистанции $10\text{--}15$ км может с большой вероятностью оказаться в зоне повышенной турбулентности, созданной летящим впереди ВС. Поэтому с появлением воздушных судов массой более 500 т и пока нет новых норм по минимумам эшелонирования при наличии турбулентности в следе, следует увеличить продольное эшелонирование за такими судами до $25\text{--}30$ км.

Логично предположить, что за другими, более легкими самолетами, вихревой след также представляет опасность. Хотя интенсивность вихревого следа за более легкими самолетами меньше, чем за тяжелым А-380, да и сам вихревой след опускается на меньшую высоту. То есть на удалении $10\text{--}15$ км вихревой след за более легкими самолетами практически остается на высоте эшелона. Это тоже надо учитывать при продольном эшелонировании.

Приход вихревого следа на другой эшелон полета маловероятен. Вертикальное эшелонирование в 300 м обоснованно и вполне безопасно. Даже за А-380 вихревой след ниже 70 м от эшелона полета не опускается.

Список литературы

1. Ginevsky A.S., Zhelannikov A.I. Vortex wakes of aircrafts. Berlin: Springer, Heidelberg, 2009. 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5
2. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере // Труды ЦАГИ. 2006. Вып. 2667. 155 с.
3. Желанников А.И., Замятин А.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614783 «Расчетно-программный комплекс для системы вихревой безопасности», 2015.
4. Бабкин В.И., Белоцерковский А.С., Турчак Л.И. Системы обеспечения вихревой безопасности полетов. М.: Наука, 2008. 373 с.
5. Большедворская Л.Г., Воробьев В.В., Зубков Б.В. и др. Безопасность полетов гражданских воздушных судов. М.: Дашков и К, 2022. 430 с.
6. Ворхлик Ю.А., Молодцова Е.Ю. Обеспечение безопасности на авиационном транспорте: проблемы стандартизации и реализации // Молодой ученый. 2016. № 6-1 (110). С. 19–22.
7. Смулов М.Ю. Управление самолетом на посадке в условиях неопределенности информации о действующих возмущениях // Научный Вестник МГТУ ГА. 2004. № 72. С. 21–25.
8. Зубков Б.В., Прозоров С.Е. Безопасность полетов: учебник / Под ред. Б.В. Зубкова. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2012. 451 с.
9. Стионов Д.А., Князевский Д.А. Обеспечение безопасности полетов при управлении воздушным движением: учеб. пособие. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2010. 67 с.
10. Писаренко В.Н., Коптев А.Н. Метод обеспечения безопасности полетов на современном этапе состояния авиационной транспортной системы России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 4. С. 202–205.
11. Вышинский В.В., Стасенко Л.А. Физические модели, численные и экспериментальные исследования аспектов авиационной экологии и безопасности полетов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 23–39.
12. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 73–93.
13. Свириденко Ю.Н. Моделирование полета пассажирского самолета в вихревом следе / Ю.Н. Свириденко, А.С. Щеглов, А.М. Назаров, Н.Б. Попкова, М.О. Алексеев, М.А. Кудров // Труды МФТИ. 2020. Т. 12, № 4. С. 177–184.

14. **Gaifullin A.M., Animitsa O.V., Bosnyakov I.S. et al.** Modeling of aircraft flight through the wake vortex // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60, no. 2. Pp. 314–322. DOI: 10.1134/S0021894419020123

15. **Филиппов Р.Н., Титова Е.А.** Влияние вихревого спутного следа на взаимную безопасность крылатых летательных аппаратов, следующих по одному маршруту // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. № 10 (739). С. 65–73. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73

16. **Белоцерковский С.М., Ништ М.И.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 277 с.

17. **Белоцерковский С.М., Гиневский А.С.** Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматлит, 1995. 368 с.

18. **Аубакиров Т.О.** Нелинейная теория крыла и ее приложения / Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Ништ. Алматы: Гылым, 1997. 448 с.

19. **Апарин В.А., Дворак А.В.** Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками // *Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского*. 1986. Вып. 1313. С. 424–432.

20. **Желанников А.И., Замятин А.Н., Чинючин Ю.М.** Влияние состояния атмосферы на взаимодействие вихревых и конденсационных следов воздушных судов // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2022. Т. 25, № 2. С. 70–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

21. **Сегуха А.В.** О лагранжевом описании трехмерных течений вязкой жидкости при больших значениях числа Рейнольдса // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2020. Т. 60, № 2. С. 297–322. DOI: 10.31857/S0044446692002012X

22. **Barnes C.J., Visbal M.R., Huang P.G.** On the effects of vertical offset and core structure in stream wise oriented vortex–wing interactions // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 799. Pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

23. **McKenna C., Bross M., Rockwell D.** Structure of a stream wise oriented vortex inci-

dent upon a wing // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 816. Pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

24. **Unterstrasser S., Stephan A.** Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails // *The Aeronautical Journal*. 2020. Vol. 124, iss. 1275. Pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

25. **Stephan A., Schräll J., Holzäpfel F.** Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay // *Journal Aircraft*. 2017. Vol. 54, no. 3. Pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973

26. **Stephan A.** Effects of detailed aircraft geometry on wake vortex dynamics during landing / A. Stephan, D. Rohlmann, F. Holzäpfel, R. Rudnik // *Journal of Aircraft*. 2019. Vol. 56, no. 3. Pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

References

1. **Ginevsky, A.S., Zhelannikov, A.I.** (2009). *Vortex traces of aircraft*. Springer Berlin, Heidelberg, 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5

2. **Vyshinsii, V.V., Sudakov, G.G.** (2006). Vortex trace of an airplane in a turbulent atmosphere. *Trudy TsAGI*, issue 2667, 155 p. (in Russian)

3. **Zhelannikov, A.I., Zamyatin, A.N.** (2015). The certificate of state registration of program for computer № 2015614783 “Design-a software package for the system of vortex-Reva security”.

4. **Babkin, V.I., Belotserkovskiy, A.S., Turchak, L.I.** (2008). *Vortex flight safety systems*. Moscow: Nauka, 373 p. (in Russian)

5. **Bolshedvorskaya, L.G., Vorobyov, V.V., Zubkov, B.V. et al.** (2022). *Flight safety of civil aircrafts*. Moscow: Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya “Dashkov i K”, 430 p. (in Russian)

6. **Vorkhlik, Yu.A., Molodtsova, E.Yu.** (2016). Ensuring safety in aviation transport: problems of standardization and implementation. *Molodoy uchenyy*, no. 6-1 (110), pp. 19–22. (in Russian)

7. **Smurov, M.Yu.** (2004). Aircraft control during landing under conditions of uncertain

information about active disturbances. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 72, pp. 21–25. (in Russian)

8. **Zubkov, B.V., Prozorov, S.E.** (2012). Flight safety: Textbook, in Zubkov B.V. (Ed.). Ulyanovsk: UVAU GA (I), 451 p. (in Russian)

9. **Stionov, D.A., Knyazevsky, D.A.** (2010). Ensuring flight safety in air traffic control: Tutorial. Ulyanovsk: UVAU GA (I), 67 p. (in Russian)

10. **Pisarenko, V.N., Koptev, A.N.** (2010). Method for ensuring a flight safety on the stage support status of Russian aviation transport system. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, vol. 12, no. 4, pp. 202–205. (in Russian)

11. **Vyshinskii, V.V., Stasenko, L.A.** (2009). Physical models, numerical and experimental studies of aspects of aviation ecology and flight safety. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 23–39. (in Russian)

12. **Vyshinskii, V.V., Sudakov, G.G.** (2009). The vortex track of the aircraft and flight safety issues. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 73–93. (in Russian)

13. **Sviridenko, Yu.N., Sheglov, A.S., Nazarov, A.M., Popkova, N.B., Alekseev, M.O., Kudrov, M.A.** (2020). Simulation of a passenger aircraft flight through the wake vortex. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 177–184. (in Russian)

14. **Gaifullin, A.M., Animitsa, O.V., Bosnyakov, I.S. et al.** (2019). Modeling of aircraft flight through the wake vortex. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 60, no. 2, pp. 314–322. DOI: 10.1134/S0021894419020123

15. **Filippov, R.N., Titova, E.A.** (2021). Effect of the wake vortex on the mutual safety of winged aircraft following the same route. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, no. 10 (739), pp. 66–73. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-10-65-73 (in Russian)

16. **Belotserkovsky, S.M., Nisht, M.I.** (1978). Separation and non-separation flow of thin wings with an ideal liquid. Moscow: Nauka, 277 p. (in Russian)

17. **Belotserkovsky, S.M., Ginevsky, A.S.** (1995). Modeling of turbulent jets and traces based on the discrete vortex method. Moscow: Fizmatlit, 368 p. (in Russian)

18. **Aubakirov, T.O., Belotserkovsky, S.M., Zhelannikov, A.I., Nisht, M.I.** (1997). *Nonlinear theory of the wing and its applications*. Almaty: Gylym, 448 p. (in Russian)

19. **Aparinov, V.A., Dvorak, A.V.** (1986). The method of discrete vortices with closed vortex frames. *Trudy VVIA im. Prof. N.Ye. Zhukovskogo*, issue 1313, pp. 424–432. (in Russian)

20. **Zhelannikov, A.I., Zamyatin, A.N., Chinyuchin, Yu.M.** (2022). Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 70–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

21. **Setukha, A.V.** (2020). Lagrangian description of three-dimensional viscous flows at large Reynolds numbers. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 60, no. 2, pp. 302–326. DOI: 10.1134/S0965542520020116

22. **Barnes, C.J., Visbal, M.R., Huang, P.G.** (2016). On the effects of vertical offset and core structure in stream wise oriented vortex-wing interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 799, pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

23. **McKenna, C., Bross, M., Rockwell, D.** (2017). Structure of a stream wise oriented vortex incident upon a wing. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 816, pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

24. **Unterstrasser, S., Stephan, A.** (2020). Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails. *The Aeronautical Journal*, vol. 124, issue 1275, pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

25. **Stephan, A., Schräll, J., Holzäpfel, F.** (2017). Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay. *Journal Aircraft*, vol. 54, no. 3, pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973

26. **Stephan, A., Rohlmann, D., Holzäpfel, F., Rudnik, R.** (2019). Effects of detailed geometry on aircraft wake vortex dynamics during landing. *Journal of Aircraft*, vol. 56, no. 3, pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

Сведения об авторе

Желанников Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, zhelannikov@yandex.ru.

Information about the author

Alexander I. Zhelannikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Central Aerohydrodynamic Institute, zhelannikov@yandex.ru.

Поступила в редакцию	10.12.2023	Received	10.12.2023
Одобрена после рецензирования	10.04.2024	Approved after reviewing	10.04.2024
Принята в печать	23.05.2024	Accepted for publication	23.05.2024