

УДК 532.59; 532.527

РАСЧЕТ ВЕТРОВОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКРЕСТНОСТИ КОРАБЛЯ

И.С. БОСНЯКОВ, А.А. КОРНЯКОВ, Г.Г. СУДАКОВ

В работе описывается задача расчета возмущенного поля скоростей, возникающего при движении корабля в приземном слое атмосферы, с учетом градиентного ветра и индуцированной турбулентности.

Ключевые слова: надводный корабль, поле скоростей, ветер, турбулентный след, расчет ветровой обстановки.

Введение

При создании системы посадки самолета или вертолета на движущийся корабль возникает задача расчета ветровой обстановки в окрестности корабля. Эта аэродинамическая задача состоит из трех подзадач:

1) генерация систематического градиентного ветра в приземном слое турбулентной атмосферы (модель приземного слоя атмосферы);

2) расчет стационарного (осредненного по времени) возмущенного поля скоростей воздушного потока, возникающего в зоне корабля при его движении в приземном слое атмосферы, которая решается с использованием стационарных уравнений Рейнольдса;

3) расчет индуцированной турбулентности, которая вычисляется с помощью специального алгоритма по известному осредненному полю скоростей и известным турбулентным характеристикам течения (уровню и масштабу турбулентности), которые определяются в рамках двухпараметрических моделей турбулентности, используемых для замыкания уравнений Рейнольдса.

Полное поле скоростей получается суперпозицией осредненного и турбулентного полей скоростей (так называемая синтетическая турбулентность). Ниже дано описание методов решения всех трех подзадач, а также пример расчета ветровой обстановки в окрестности конкретного корабля. Оказывается, что градиентный характер ветра в приземном слое атмосферы может оказывать заметное влияние на характеристики течения в окрестности корабля. Имеющиеся в литературе публикации ограничивались лишь случаем вертикального профиля ветра по высоте, а турбулентные характеристики получались с помощью прямого численного моделирования нестационарной задачи [1], что требует значительно больших вычислительных ресурсов, чем предлагаемый подход.

1. Модель Монина-Обухова приземного слоя атмосферы

Модель приземного слоя атмосферы характеризуется двумя параметрами: скоростью ветра на заданной высоте (обычно 10 м) и длиной Монина-Обухова L_m , которая характеризует состояние атмосферы (устойчивая, нейтральная, неустойчивая). По величинам этих параметров можно восстановить все необходимые данные, характеризующие приземный слой атмосферы: скорость систематического ветра по высоте, распределение температуры по высоте, а также распределение по высоте параметров турбулентности (уровня q и масштаба L). Детали модели приземного слоя подробно изложены в работах [2; 3]. В качестве примера на рис. 1 показаны профили ветра в сравнении с экспериментом.

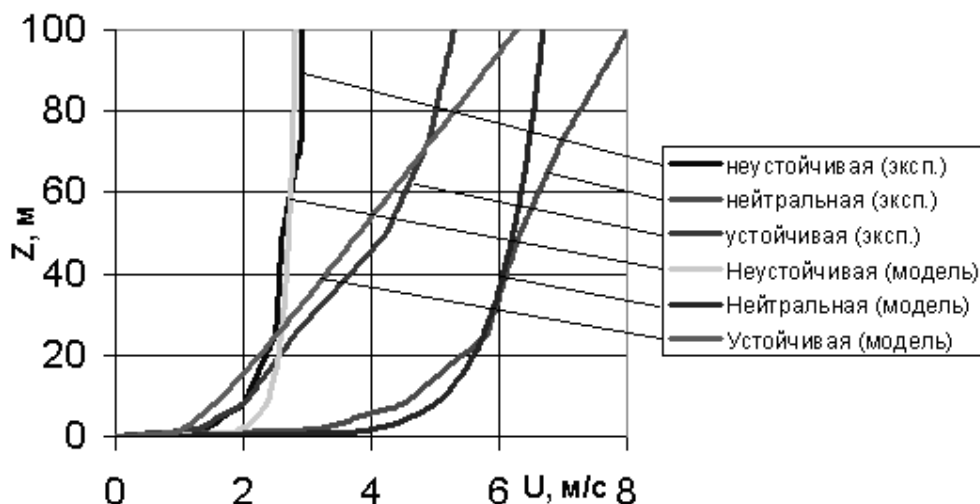


Рис. 1. Профили скорости ветра: эксперимент и модель Монина-Обухова [3]

2. Расчет осредненных полей скоростей в окрестности корабля

Целью данной работы являлось получение данных о характеристиках вихревого следа в окрестности корабля. Для определения параметров ближнего следа решалась краевая задача для 3D RANS, в качестве модели замыкания использована модель турбулентности $k-\omega$ SST. Граничные условия ставились следующим образом: на поверхности корабля задавались условия прилипания; на подстилающей поверхности использовалось условие проскальзывания; на входе в расчетную область задавались компоненты скорости; на выходе и на боковых границах расчетной области задавалось давление. Решение проводилось с использованием компьютерного кода ANSYS CFX 12 (университетская версия). Для дискретизации по пространству использовалась схема второго порядка точности. Установление по времени осуществлялось с использованием неявной схемы второго порядка. Расчет был выполнен для воздуха при температуре 25°C .

Математическая модель корабля включала все достаточно крупные элементы конструкции. Моделировались только те части корабля, которые находятся выше ватерлинии. Многоблочная гексаэдральная расчетная сетка состояла из 55 млн. элементов (рис. 2).

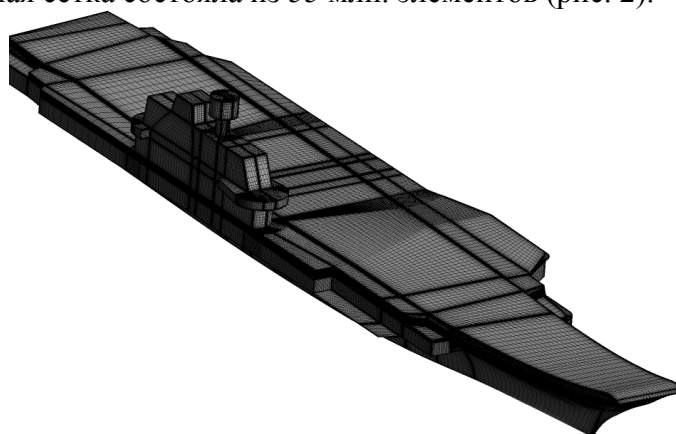


Рис. 2. Расчетная сетка на поверхности корабля

Исследовалось изменение вихревой обстановки за кораблем в зависимости от профиля ветра. Рассмотрены варианты:

– с вертикальным профилем ветра $U_\infty(H) = \text{const}$;

– с нейтральным профилем ветра $U_\infty(H) = 1,1258 \cdot \ln(H) + 7,7747$.

В качестве исходных данных были использованы профили приземного ветра, как описано в п. 1. Были приняты следующие параметры течения:

- скорость набегающего потока над палубой 25 – 30 м/с;
- скорость корабля была принята равной 10 м/с (навстречу ветру).

Основной эффект, который оказывает введение в постановку задачи градиентного профиля ветра, заключается во "всплытии" вихрей за кораблем (рис. 3).

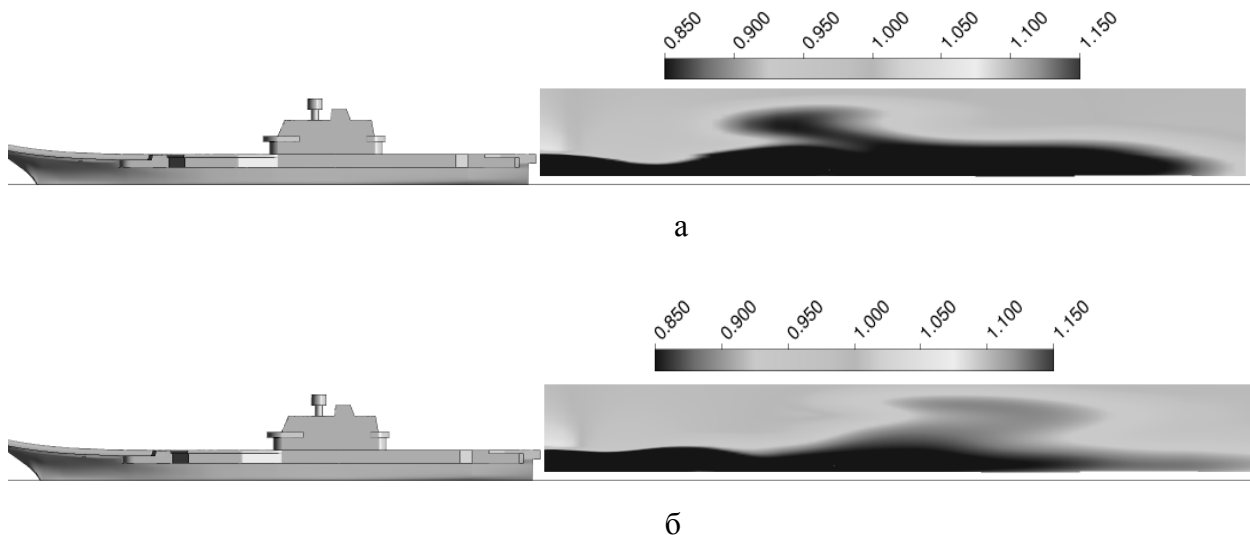


Рис. 3. Отношение продольной скорости на линии глissады к скорости набегающего потока: а – вертикальный профиль ветра; б – нейтральный профиль ветра

3. Расчет турбулентных порывов скоростей в окрестности корабля

Турбулентность в общем случае является анизотропной и неоднородной по пространству. Тем не менее, если рассматривать достаточно малый объем, то с определенной точностью можно считать, что в нем турбулентность однородна (модель локально-однородной турбулентности).

Для генерирования поля турбулентных порывов $\{v'_i\}$ будем применять следующий подход [4]. Компоненты пульсаций скорости v'_i можно представить виде ряда Фурье

$$v'_i(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N \hat{v}'_i(\mathbf{k}_n) \cdot \cos(\mathbf{k}_n \mathbf{r} + \varphi_n). \quad (1)$$

Случайная величина $\hat{v}'_i$ задается так, чтобы корреляционный тензор $\langle \hat{v}'_i \hat{v}'_j \rangle$ соответствовал известной матрице ковариации. Величина φ_n – является случайным числом на множестве $[0, 2\pi)$ с равномерным распределением вероятности.

Матрица ковариации $c_{ij} = \langle \hat{v}'_i \hat{v}'_j \rangle$ имеет следующий вид

$$c_{ij} = \langle \hat{v}'_i \hat{v}'_j \rangle = b_{ij}(\mathbf{k}) \Delta \mathbf{k}, \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{k}$ – элемент объема фазового пространства; b_{ij} – корреляционный тензор [5]

$$b_{ij}(\mathbf{k}) = \frac{E(\mathbf{k})}{4\pi k^2} \left(\delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2} \right). \quad (3)$$

Здесь $E(k)$ – энергетический спектр турбулентной энергии. В данной работе использован кармановский энергетический спектр, который для единичных уровня и масштаба турбулентности можно представить в следующем виде [3]

$$E(k) = \frac{55}{27\pi} \cdot \frac{(\alpha_k \cdot k/2\pi)^4}{\left[1 + (\alpha_k \cdot k/2\pi)^2\right]^{17/6}}, \quad (4)$$

где $\alpha_k \approx 1,339$. Чтобы случайная величина $\hat{v}'_i$ имела заданную матрицу ковариации $\{c_{ij}\}$ достаточно взять случайное число e_j с нормальным распределением вероятности, единичной дисперсией и нулевым математическим ожиданием и умножить на результат разложения матрицы ковариации по Холецкому [4]

$$\mathbf{H} = \{h_{ij}\} = \begin{pmatrix} \sqrt{c_{11}} & 0 & 0 \\ c_{21}/h_{11} & \sqrt{c_{22} - h_{21}^2} & 0 \\ c_{31}/h_{11} & (c_{32} - h_{21}h_{31})/h_{22} & \sqrt{c_{33} - h_{31}^2 - h_{32}^2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

После этого искомая величина находится следующим образом $\hat{v}'_i = h_{ij} \cdot e_j$. В каждой точке физического пространства выделим достаточно малый объем так, чтобы в нем считать турбулентность однородной. В этом объеме турбулентность имеет масштаб $L_A(\mathbf{r})$ и уровень $q_A(\mathbf{r})$. С учетом этого формула (1) принимает следующий вид

$$\mathbf{v}'_i(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N \hat{v}'_i(\mathbf{k}_n) \cdot q_A \cos(\mathbf{k}_n/L_A \cdot \mathbf{r} + \varphi_n). \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим случай движения корабля, описанный в п. 2. На рис. 4 показан результат генерации поля турбулентных пульсаций в следе за кораблем в связанной (с кораблем) системе координат. Следует отметить достаточно высокий уровень пульсаций, амплитуда которых достигает 4 м/с при скорости ветра над палубой ~25 м/с (в связанной системе координат).

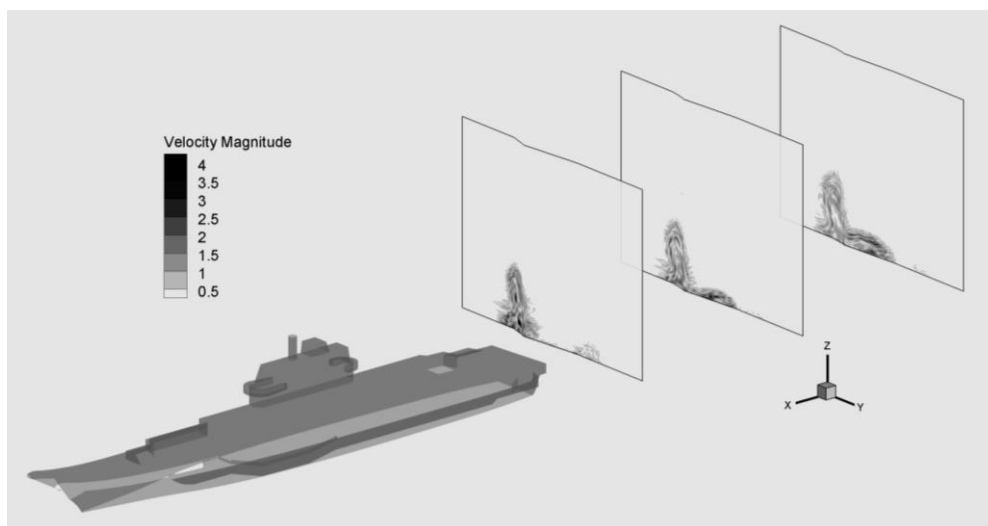


Рис. 4. Поле амплитуды (м/с) турбулентных пульсаций в следе за кораблем

Работа выполнена при финансовой поддержке министерства образования и науки в рамках договора № 700013728 от 21.11.2012 г. "Разработка моделирующего комплекса реалистичного восприятия оператором (летчиком) сложных режимов полета и оценки его психофизиологического состояния" по 218 постановлению правительства РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Polsky S.A.** *A computational study of unsteady ship airwake*. AIAA 2002-1022. 2002. P. 11.
2. **Bobylev A.V., Vyshinsky V.V., Soudakov G.G., Yaroshevsky V.A.** Aircraft Vortex Wake and Flight Safety Problems. *Journal of Aircraft*. Vol. 47. № 2. March–April 2010.
3. **Вышинский В.В., Судаков Г.Г.** Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере // *Труды ЦАГИ*. 2005. Вып. 2667. С. 155.
4. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений*: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** *Теоретическая физика. Гидродинамика*. М.: Наука, 1988. Т. 6. 736 с.

AIRCRAFT-CARRIER VORTEX WAKE CALCULATIONS

Bosnyakov I.S., Korniyakov A.A., Soudakov G.G.

Calculations of the perturbed velocity field and induced turbulence due to the motion of the ship in the atmospheric surface layer based on gradient wind are presented in this paper.

Keywords: surface ship, the velocity field, the wind, the turbulent wake, the calculation of wind conditions.

REFERENCES

1. **Polsky S.A.** *A computational study of unsteady ship airwake*. AIAA 2002-1022. 2002. P. 11.
2. **Bobylev A.V., Vyshinsky V.V., Soudakov G.G., Yaroshevsky V.A.** Aircraft Vortex Wake and Flight Safety Problems. *Journal of Aircraft*. Vol. 47. № 2. March–April 2010.
3. **Vihshinskiy V.V., Soudakov G.G.** Vihrevoj sled samoleta v turbulentnoj atmosfere. *Trudih CAGI*. 2005. Vihp. 2667. P. 155. (In Russian).
4. **Garbaruk A.V., Strelec M.Kh., Shur M.L.** *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techenij*: uchebnoe posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2012. 88 p. (In Russian).
5. **Landau L.D., Lifshic E.M.** *Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika*. M.: Nauka. 1988. T. 6. 736 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Босняков Игорь Сергеевич, 1988 г.р., окончил МФТИ (2011), аспирант МФТИ, младший научный сотрудник ЦАГИ, автор 4 научных работ, область научных интересов – атмосферная турбулентность, спутные и вихревые следы за кораблями и самолетами, методы ВАД высокого порядка точности.

Корняков Антон Андреевич, 1984 г.р., окончил МАИ (2007), инженер ЦАГИ, автор 6 научных работ, область научных интересов – математические модели аэродинамики летательных аппаратов в возмущенном потоке, спутные и вихревые следы за кораблями и самолетами.

Судаков Георгий Григорьевич, 1947 г.р., окончил МФТИ (1971), доцент, доктор технических наук, начальник отдела ЦАГИ, ведущий научный сотрудник МФТИ, автор более 100 научных работ, область научных интересов – вычислительная аэрогидромеханика, аэродинамика самолета, струйно-вихревой след.