

УДК 533.534.83

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПУСОВ ГЕНЕРАТОРОВ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Снопов А.И., Сумбатян М.А.

*ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет» Министерства науки и образования России,
Ростов-на-Дону, e-mail: asnop@math.rsu.ru*

Изложен метод теоретического определения осесимметричных форм продольно обтекаемых корпусов генераторов ветровых энергетических установок с передним или задним расположением лопастей и гидродинамики соответствующих потоков. Предложено функцию тока потока представлять в виде суммы функций тока, описывающих соответственно поступательный поток и потоки, порожденные точечным источником, диполем и линейными однородными источниками и стоками. Форме корпуса генератора соответствует нулевая поверхность тока, уравнение которой содержит ряд параметров, связанных с интенсивностями введенных в рассмотрение гидродинамических элементов и с их расположением. Числовые значения этих параметров определяются так, чтобы были выполнены основные требования к продольным и поперечным размерам проектируемых корпусов, для чего используется итеративный процесс. По найденным значениям параметров определяются функция тока потока, обтекающего корпус проектируемого генератора, и поле скоростей. Представлены результаты расчетов форм корпусов и распределения осевых скоростей в различных сечениях потока. Использование диполя с моментом, направленным вдоль потока, позволяет, при необходимости, сделать часть поверхности корпуса близкой к цилиндрической или конической форме. Подтверждено, что расположение лопастей в сужающейся части корпуса генератора ухудшает условия обтекания ветровой установки, так как способствует уменьшению осевой составляющей скорости потока, набегающего на лопасти в их корневой зоне.

Ключевые слова: моделирование, корпус генератора, ветроэнергетическая установка, функция тока, поверхность тока, источник, диполь

HYDRODYNAMIC MODELING OF GENERATOR CASE FOR WIND TURBINE POWER-PLANTS

Snopov A.I., Sumbatyan M.A.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, e-mail: asnop@math.rsu.ru

There is proposed a theoretical hydrodynamic model to determine axially symmetric shapes of the generator case with a longitudinal streamline of Wind Turbines, for both front and back disposition of blades. We represent the stream function as a sum of those for a transition flow, for source and dipole flows, as well as for linear homogeneous sources and sinks. A zero stream surface corresponds to the generator case; its equation contains a number of parameters related to the intensity and the disposition of the introduced hydrodynamic elements. The numerical values of these parameters are defined so that the basic requirements to longitudinal and lateral size of the case would be satisfied, and an iteration process is applied for this purpose. The found values of these parameters determine the stream function around the designed generator case and the velocity field. There are presented the results for the calculated shape of the case and the distribution of the axial velocity in some cross-sections of the flow. By using dipole with a moment directed along the stream, we can, if necessary, to provide the shape of the case more close to a cylindrical or conical form. It is shown that the disposition of blades in the convergent part of the generator case makes hydrodynamic conditions worse, since they result in decrease of the axial component of the flow velocity in the incoming flow near the root zone of the blades.

Keywords: modeling, generator case, Wind Turbine power-plant, stream function, stream surface, source, dipole

Генераторы ветровых энергетических установок с горизонтальной осью обычно размещаются в корпусах, имеющих вид удлиненных тел вращения. Лопасти крепятся на их подвижную часть. Для крупногабаритных ветровых энергетических установок используется заднее расположение лопастей на корпусе, благодаря чему его ось автоматически отслеживает направление ветра. При переднем расположении лопастей необходимо использовать флюгер. На стадии проектирования ветровых энергетических установок формы корпусов генераторов принято задавать с помощью координат их характерных точек, или некоторых многопараметрических алгебраических функций, в том числе, и с разрывными параметрами. При этом оценка влияния кор-

пуса генератора на набегающий на него поток затруднена и обычно не производится.

Ниже изложен способ теоретического моделирования аэродинамических форм корпусов генераторов ветровых энергетических установок, основанный на методе источников и стоков, изначально разработанном для моделирования потоков, обтекающих тела вращения наперед заданных форм [1–4]. Благодаря современной вычислительной технике и имеющемуся программному обеспечению предложенный способ достаточно просто реализуется и позволяет на стадии проектирования ветровых энергетических установок определять практически приемлемые формы корпусов генераторов и рассчитывать возмущения, индуцируемые ими в набегающих потоках воздуха.

Принимается, что в условиях работы ветровых энергетических установок воздух можно рассматривать как несжимаемую среду, а любой осесимметричный поток, содержащий замкнутую поверхность тока, можно рассматривать как поток, обтекающий тело вращения, имеющее форму этой поверхности тока. Потоки, поверхности тока которых отвечают реальным формам корпусов генераторов ветровых энергетических установок, можно моделировать внесением в основной поток некоторой системы источников, стоков и диполей с соответствующим образом подобранными параметрами.

1. Рассматриваем безграничный осесимметричный поток идеальной жидкости, имеющий на бесконечности скорость V_∞ , моделирующий обтекание корпуса генератора. В цилиндрической системе координат, ось Ox которой совпадает с осью симметрии корпуса, а радиальная координата r определяет расстояние точки потока до оси, функция тока ψ потока должна удовлетворять уравнению Стокса [2]

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0. \quad (1)$$

Компоненты вектора скорости потока связаны с функцией тока формулами

$$v_x = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad v_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (2)$$

В силу линейности уравнения Стокса любая сумма его частных решений тоже является его решением. Для моделирования корпусов генераторов ветровых энергетических установок используем следующие функции, являющиеся решениями уравнения Стокса [2]:

$$\psi = -\frac{1}{2} V_\infty r^2 + \frac{Q_2}{4\pi} \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{Q_2}{4\pi c} \left(\sqrt{r^2 + (x-c)^2} - \sqrt{r^2 + x^2} \right). \quad (9)$$

Уравнение $\psi = 0$ при $Q_2 = 2\pi V_\infty / A$ определяет двухпараметрическое семейство поверхностей вращения, обводы ко-

$$Ar^2 - \frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} - \frac{1}{c} \left(\sqrt{r^2 + (x-c)^2} - \sqrt{r^2 + x^2} \right) = 0. \quad (10)$$

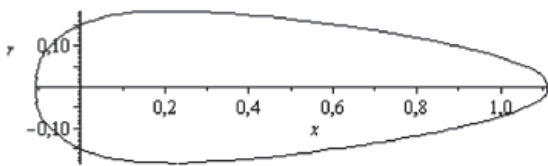


Рис. 1. Обвод двухпараметрической модели малогабаритного корпуса генератора:

$$D_{\max} = 0,367 \text{ м}, \quad L = 1,219 \text{ м}, \quad A = 39,1, \quad c = 1,1, \\ A = 39,1, \quad c = 1.1$$

$$\psi_1 = -\frac{1}{2} V_\infty r^2 \quad (3)$$

(функция тока однородного потока, имеющего скорость V_∞),

$$\psi_2 = \frac{Q_2}{4\pi} \frac{x-a}{\sqrt{r^2 + (x-a)^2}} \quad (4)$$

(функция тока точечного источника обильности $Q_2 > 0$, размещенного в точке $x = a$ оси Ox),

$$\psi_3 = \int_0^c \frac{q_3(\xi)}{4\pi} \frac{(x-\xi)}{\sqrt{r^2 + (x-\xi)^2}} d\xi \quad (5)$$

(функция тока линейного источника, расположенного на отрезке Oc оси Ox , где $q_3(\xi)$ – плотность распределения линейных источников (стоков, если $q_3(\xi) < 0$)),

$$\psi_4 = -\frac{M}{4\pi} \frac{r^2}{\left(\sqrt{r^2 + (x-d)^2} \right)^3} \quad (6)$$

(функция тока диполя с моментом M , помещенного в точку с координатами $x = d$, $r = 0$, ось которого совпадает с осью Ox).

Ограничимся рассмотрением функций тока, имеющих следующую структуру:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4. \quad (7)$$

Если выполняется равенство

$$\int_0^c q_3(\xi) d\xi + Q_2 = 0, \quad (8)$$

то уравнения $\psi = 0$ определяют некоторые поверхности вращения конечных размеров.

2. Практический интерес представляют частные случаи формулы (7), например, поверхности, образованные точечным источником и линейным стоком, для которых функция тока имеет структуру [5]

которые пригодны для проектирования корпусов ВЭУ с передним расположением ветроколеса

Здесь параметр A отвечает в основном за максимальный поперечный размер корпуса D_{\max} , а параметр c – за его длину L . Их значения находятся итеративным методом при моделировании корпуса по заданным численным значениям величин D_{\max} и L . На рис. 1 представлен обвод двухпараметрического теоретического корпуса генератора малогабаритной ветроэнергетической установки с диаметром ветроколеса 2 м.

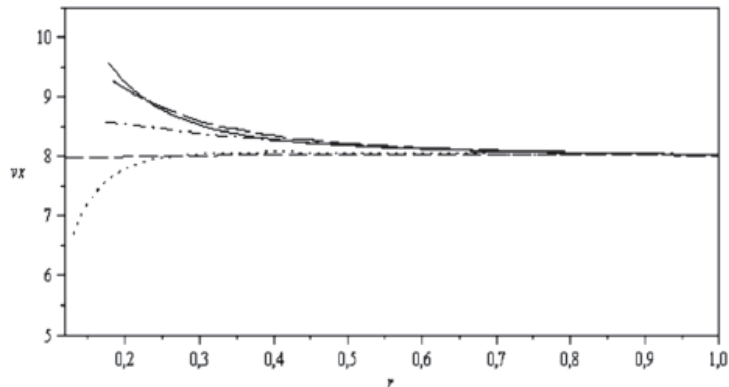


Рис. 2. Графики распределения продольных скоростей в различных сечениях потока, обтекающего двухпараметрическую модель корпуса генератора: $V_{\infty} = 8 \text{ м/с}$, $x = -0,05$, — $x = -0,1$, — · — $x = -0,2$, - - - - - $x = -0,8$ (м)

После того, как определены значения конструктивных параметров A и c , можно теоретически определить и исследовать поле скоростей, порождаемых влиянием корпуса на поток. Для этого по найденным значениям величин параметров A и c по формуле (9) определяется вид функции тока. Компоненты векторов скоростей потока, обтекающего корпус генератора. Вычисляются по формулам (2).

3. Для крупногабаритных ветровых энергетических установок лопасти крепят-

ся в кормовой части корпуса, имеющего сигарообразный вид. Моделирование такого корпуса можно осуществить при условиях

$$Q_2 = 0;$$

$$q_3(\xi) = \begin{cases} q_1 > 0 & \text{при } \xi \leq b \\ -q_2 & \text{при } \xi \geq b_1 \geq b, \end{cases} \quad (11)$$

где $q_1 = \text{const}$, $q_2 = \text{const}$.

При этом имеем

$$\psi = -\frac{1}{2}V_{\infty}r^2 + \frac{q_1}{4\pi} \int_0^b \frac{(x-\xi)}{\sqrt{r^2+(x-\xi)^2}} d\xi - \frac{q_2}{4\pi} \int_{b_1}^c \frac{(x-\xi)}{\sqrt{r^2+(x-\xi)^2}} d\xi - \frac{r}{4\pi} \frac{M}{(\sqrt{r^2+(x-d)^2})^3}. \quad (12)$$

Интегралы, входящие в эту формулу, легко вычисляются. Если q_1 и q_2 связаны соотношением

$$q_1 = b_2(q - c_1b), \quad (13)$$

то равенство (8) выполняется, а формула (12) принимает вид

$$\begin{aligned} \psi = & -\frac{1}{2}V_{\infty}r^2 - \frac{q_2}{4\pi} \frac{c-b_1}{b} (\sqrt{r^2+(x-b)^2} - \sqrt{r^2+x^2}) + \\ & + \frac{q_2}{4\pi} (\sqrt{r^2+(x-c)^2} - \sqrt{r^2+(x-b_1)^2}) - \frac{M}{4\pi} \frac{r^2}{(\sqrt{r^2+(x-d)^2})^3}. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение поверхности корпуса генератора $\psi = 0$ удобно представить в таком виде

$$\begin{aligned} & Br^2 + \frac{c-b_1}{b} (\sqrt{r^2+(x-b)^2} - \sqrt{r^2+x^2}) - \\ & - (\sqrt{r^2+(x-c)^2} - \sqrt{r^2+(x-b_1)^2}) + m \frac{r^2}{(\sqrt{r^2+(x-d)^2})^3} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

где $B = 2\pi V_{\infty} / q_2$;

$$m = M/q_2.$$

Наличие в уравнении (15) шести конструктивных параметров (B, b, b_1, c, d, m) несколько затрудняет итеративный процесс нахождения их величин для построения та-

ких поверхностей вращения, которые описывают приемлемые для практики формы корпусов.

Приняв $b_1 = b$, число конструктивных параметров можно снизить до пяти. Выбором параметров m и d часть поверхности корпуса в зоне его максимального диаметра

при желании можно аппроксимировать цилиндрической или конической формой.

Параметр b отвечает в основном за протяженность передней части корпуса, a параметр c – за протяженность зоны сужения корпуса и за его общую длину. На рис. 3 представлен обвод теоретического пятипараметрического корпуса генератора крупногабаритной ветровой энергетической установки с диаметром ветроколеса 10 м.

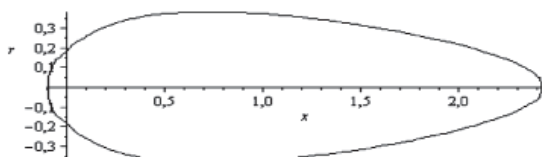


Рис. 3. Обвод пятипараметрической модели крупногабаритного корпуса генератора:

$$D_{max} = 0,759 \text{ м}, L = 2,519 \text{ м}, B = 17,37; \\ b = 0,450; a = 0,450; c = 2,396; m = -0,0999; \\ d = 0,660$$

Если значения всех конструктивных параметров установлены, то можно определить значение параметра q_2 по формуле

$$q_2 = 2\pi V_{\infty} / B \quad (16)$$

и рассчитать с использованием формул (14) и (2) поле скоростей потока, обтекающего корпус генератора. Графики зависимости от радиальной координаты продольных компонент скоростей потока в различных сечениях плоскостями $x = \text{const}$ представлены на рис. 2 и 4 соответственно корпусам, изображенным на рис. 1, 3. Подтверждается (рис. 2, 4 и 5), что вокруг передней части корпуса существует зона повышенных продольных и полных скоростей. Вокруг сужающейся задней части корпуса возможно формирование зоны пониженных продольных и полных скоростей, что ухудшает условия обтекания ветровой установки, так как способствует уменьшению осевой составляющей скорости потока, набегающего на лопасти в их корневой зоне.

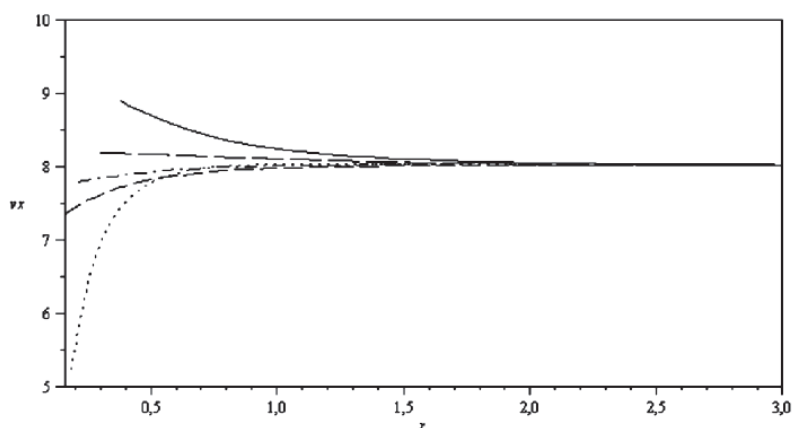


Рис. 4. Графики распределения продольных скоростей в различных сечениях потока, обтекающего пятипараметрическую модель корпуса генератора:

$$V_{\infty} = 8 \text{ м/с}, \dots x = 0,0, \text{ — } x = 0,4 \text{ — — } x = 0,8, \text{ — · — } x = 2,0, \text{ - - - - } x = 2,2 \text{ (м)}$$

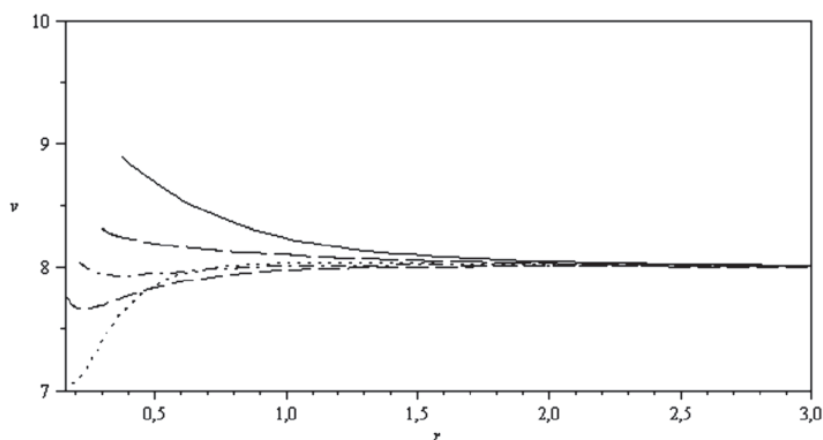


Рис. 5. Графики распределения полных скоростей в различных сечениях потока, обтекающего пятипараметрическую модель корпуса генератора:

$$V_{\infty} = 8 \text{ м/с}, \dots x = -0,0, \text{ — } x = 0,4 \text{ — — } x = 0,8, \text{ — · — } x = 2,0, \text{ - - - - } x = 2,2 \text{ (м)}$$

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», проект ГК № 16.516.11.6106».

Список литературы

1. Ламб Г. Гидродинамика. – М., Л.: ОГИЗ. 1948. – 928 с.
2. Кочн Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, ч.2. – М.: Физматгиз, 1963. – 728 с.
3. Валландер С.В. Лекции по гидроаэромеханике. – Л.: ЛГУ, 1978. – 293 с.
4. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 760 с.
5. Снопов А.И., Сумбатян М.А. Гидромодель корпуса генератора ВЭУ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011.– № 9. – С. 56–57.

References

1. Lamb G. Hidrodinamika.. OGIZ. M. L. 1948. 928 p.
2. Kochn N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Teoreticheskaja gidromehanika, ch.2. M. Fizmatgiz. 1963. 728 p.
3. Vallander S.V. Lekcii po gidroaeromehanike. L. LGU. 1978. 293 p.
4. Bjetchelord Dzh. Vvedenie v dinamiku zhidkosti. M. «Mir».1973. 760 p..
5. Snopov A.I., Sumbatjan M.A. Hidromodel' korpusa generatora VJeU// Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. no. 9. 2011. pp. 56-57

Рецензент –

Потетюнко Э.Н., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры теории упругости факультета математики, механики и компьютерных наук ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет» Министерство науки и образования России», г. Ростов-на-Дону.
Работа поступила в редакцию 26.04.2012.