

УДК 621.65.01

СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ МЕЖДУ ЛОПАСТЯМИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

Павлечко В.Н. (УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь)

Проведен анализ скоростей движения среды между лопастями осевой турбины при вводе потока под некоторым углом к плоскости вращения. Угол наклона лопастей принят постоянным. Осевая скорость среды неизменна, но может изменяться по радиусу турбины. Выведены некоторые соотношения для оценки влияния потока на турбину. Наибольшее воздействие среда оказывает на лопасти на входном участке лопасти, для последующих участков по ходу движения влияние потока ослабевает. Активная длина лопастей, на которых среда влияет на параметры турбины, снижается по мере увеличения угла наклона лопастей и уменьшения угла ввода среды по модулю. С увеличением количества элементарных участков расширяется диапазон изменения угла наклона лопастей, при которых среда перестает влиять на работу лопастей турбины.

Ключевые слова: осевая турбина, угол наклона лопастей, направление потока, скорость среды между лопастями, активная длина лопасти.

Введение

В работе [1] рассмотрено движение среды, вводимой в межлопастное пространство в осевом направлении (рисунок 1). Лопасти имеют постоянный угол наклона β по радиусу и по ходу движения среды. Начальная скорость среды v_s направлена под углом α к плоскости вращения турбины.

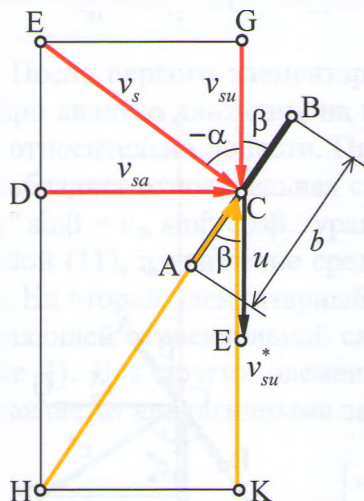


Рисунок 1. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку лопасти

Поскольку углы α и β откладываются от плоскости вращения в разные стороны, то первый из них принят с отрицательным знаком. В результате анализа сил, действующих на элементарную площадку шириной b , выведены формулы для расчета скоростей среды.

В работе [2] начальная скорость ввода среды представлена двумя составляющими: v_{sa} , направленной вдоль оси турбины, и v_{su} , направленной тангенциально. Величины этих скоростей зависят от угла наклона α вектора скорости v_s и определяются зависимостями:

$$v_{sa} = -v_s \sin \alpha ; \quad (1)$$

$$v_{su} = v_s \cos \alpha . \quad (2)$$

Осевая составляющая v_{sa} начальной скорости среды заменена скоростями движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, и вдоль лопасти (рисунок 2), выражения которых с учетом принятых обозначений имеют соответственно вид [1, 2]:

$$c' = v_{sa} \cos \beta ; \quad (3)$$

$$w' = v_{sa} \sin \beta . \quad (4)$$

В свою очередь, скорость c' представлена тангенциальной и осевой составляющими, которые определяются зависимостями:

$$c'_u = v_{sa} \sin \beta \cos \beta; \quad (5)$$

$$c'_a = v_{sa} \cos^2 \beta. \quad (6)$$

Скорость движения элементарной площадки лопасти шириной b под воздействием осевой составляющей потока среды выражается формулой:

$$u' = v_{sa} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (7)$$

Тангенциальная составляющая v_{su} начальной скорости также заменена скоростями движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, и вдоль лопасти (рисунок 3), которые с учетом принятых обозначений представлены соответствующими зависимостями [2]:

$$c'' = v_{su} \sin \beta; \quad (8)$$

$$w'' = v_{su} \cos \beta, \quad (9)$$

а скорость c'' – тангенциальной и осевой составляющими, выражения которых имеют вид:

$$c''_u = v_{su} \sin^2 \beta; \quad (10)$$

$$c''_a = v_{su} \sin \beta \cos \beta. \quad (11)$$

Элементарная площадка под воздействием тангенциального потока перемещается со скоростью

$$u'' = v_{su}. \quad (12)$$

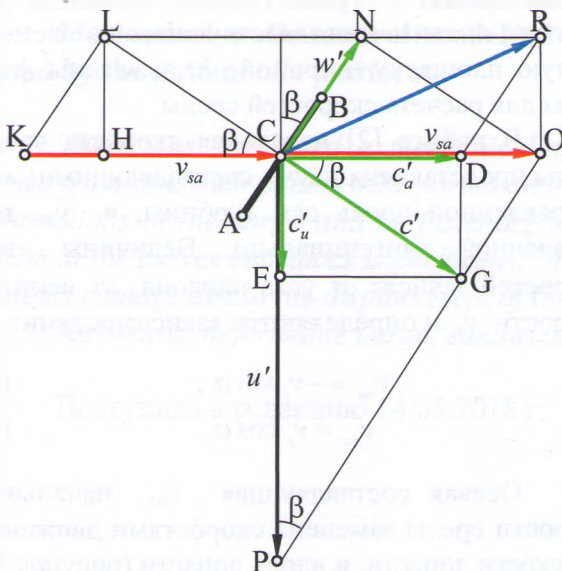


Рисунок 2. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием осевой составляющей потока

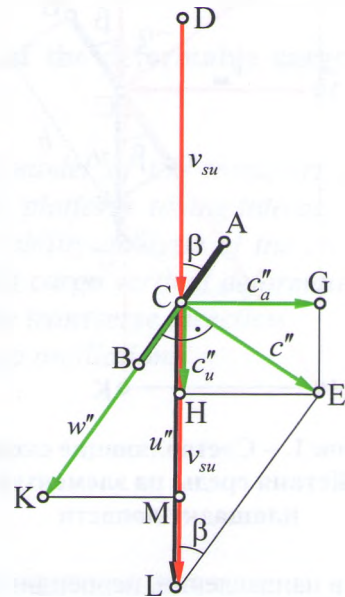


Рисунок 3. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием тангенциальной составляющей потока

Результаты исследований

Перечисленные скорости и их выражения характерны только для первого по ходу движения потока элементарного участка лопасти. Для второго и последующих участков по мере движения среды вдоль оси турбины величины этих скоростей и их соотношения изменяются. В частности, на выходе из межлопастного пространства среда перемещается практически параллельно конечному участку лопасти.

Рассмотрим особенности изменения скоростей среды в пространстве между лопастями.

Для первого по ходу движения среды элементарного участка скорости определяются по формулам (1)-(12). Исходя из условия неразрывности потока, расход среды через межлопастное пространство сохраняет постоянное значение, и скорость движения потока в осевом направлении (на одинаковом расстоянии от оси вращения) для различных элементарных участков лопасти также неизменна, т.е.:

$$v_{sa1} = v_{sa2} = v_{sa3} = \dots = v_{sa} = -v_s \sin \alpha = \text{const} . \tag{13}$$

Нижние индексы 1, 2, 3 и т.д. в уравнении (13) и последующих формулах относятся к скоростям для соответствующих элементарных участков лопасти по ходу движения среды.

Соответственно, тангенциальная составляющая c'_u скорости среды, пропорциональная в соответствии с формулой (5) осевой составляющей скорости потока v_{sa} , для различных элементарных участков лопасти также имеет постоянное значение:

$$c'_{u1} = c'_{u2} = c'_{u3} = \dots = c'_u = v_{sa} \sin \beta \cos \beta = -v_s \sin \alpha \sin \beta \cos \beta = \text{const} . \tag{14}$$

После первого элементарного участка лопасти среда поступает на второй участок, при анализе движения на котором следует учитывать только скорости движения среды относительно лопасти. При тангенциальном вводе среды (рисунок 3) этим качеством обладает относительная скорость w'' . Ее осевая составляющая, равная с учетом (9) $w_1'' \sin \beta = v_{su} \sin \beta \cdot \cos \beta$, уравнивается осевой скоростью c_a'' в соответствии с формулой (11), и движение среды относительно лопасти в осевом направлении отсутствует. На второй элементарный участок лопасти среда воздействует с тангенциальной составляющей относительной скорости, равной $w_1'' \cos \beta = v_{su} \cos^2 \beta$ (отрезок СМ на рисунке 3). Для других элементарных участков лопасти эта составляющая скорости представляется аналогичными зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} w_2'' \cdot \cos \beta &= v_{su2} \cdot \cos^2 \beta; \\ w_3'' \cdot \cos \beta &= v_{su3} \cdot \cos^2 \beta; \\ w_4'' \cdot \cos \beta &= v_{su4} \cdot \cos^2 \beta; \\ &\dots \dots \dots \\ w_{n-1}'' \cdot \cos \beta &= v_{su(n-1)} \cdot \cos^2 \beta. \end{aligned} \right\} . \tag{15}$$

При выходе из лопастного пространства, когда среда вводится на n -ый элементарный участок параллельно лопасти и $\alpha = \beta - 180^\circ$, тангенциальная составляющая скорости потока (желтая линия КС со стрелкой на рисунке 1) принимает значение:

$$v_{su}^* = v_{sa} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \quad (16)$$

При тангенциальном вводе среды ее относительную скорость w'' необходимо дополнить скоростью среды в осевом направлении c'_a , т.к. перемещение лопасти вдоль оси не происходит. Суммарная скорость среды относительно лопасти представлена на рисунке 2 синей линией со стрелкой (отрезок CR).

Выражение тангенциальной составляющей скорости воздействия среды на второй элементарный участок определяется разностью скоростей, направленных в противоположные стороны:

$$v_{su2} = w''_{su1} \cos^2 \beta - c'_{u1} = v_{su} \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta. \quad (17)$$

С использованием аналогичных подходов к третьему и другим элементарным участкам лопасти получены соответствующие выражения относительных тангенциальных скоростей для третьего, четвертого, пятого и других участков:

$$v_{su3} = w''_{su2} \cos \beta - c'_{u2} = (v_{su} \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta; \quad (18)$$

$$v_{su4} = w''_{su3} \cos \beta - c''_{u3} = [(v_{su} \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta] \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta; \quad (19)$$

$$v_{su5} = w''_{su4} \cos \beta - c''_{u4} = \left\{ [(v_{su} \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta) \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta] \times \right. \\ \left. \times \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta \right\} \cos^2 \beta - v_{sa} \sin \beta \cos \beta \quad \text{и т.д.} \quad (20)$$

Отклонение фактической v_{sui} от предельной v_{su}^* тангенциальных составляющих скоростей среды для первого, второго, третьего и других элементарных участков с учетом (1) и (2) определяется выражениями:

$$\Delta v_{su1} = v_{su1} - v_{su}^* = v_{su} - v_{su}^* = v_s \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad (21)$$

$$\Delta v_{su2} = v_{su2} - v_{su}^* = v_s \cos^2 \beta \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}; \quad (22)$$

$$\Delta v_{su3} = v_{su3} - v_{su}^* = v_s \cos^4 \beta \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}; \quad (23)$$

$$\Delta v_{su4} = v_{su4} - v_{su}^* = v_s \cos^6 \beta \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}; \quad (24)$$

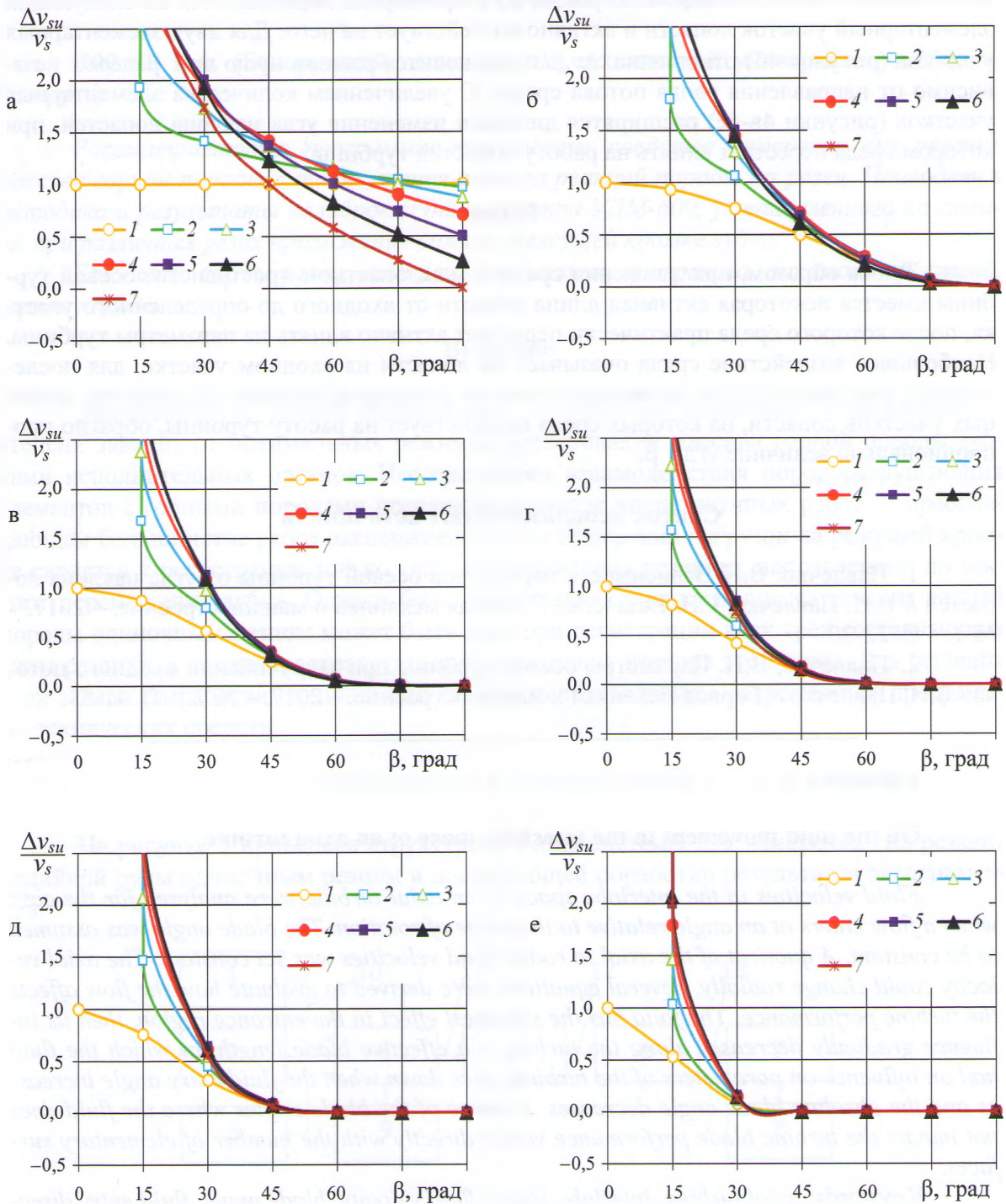
$$\Delta v_{su5} = v_{su5} - v_{su}^* = v_s \cos^8 \beta \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad \text{и т.д.} \quad (25)$$

Анализ формул (21)-(25) и других, не приведенных в настоящей работе, показывает, что они представляют собой геометрическую прогрессию с множителем $\cos^2 \beta$, n -ый член которой можно представить в виде:

$$\Delta v_{sun} = v_s \cos^{2(n-1)} \beta \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta} \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что разность Δv_{su} становится равной нулю при $\beta = 90^\circ$ и при соотношении углов $\alpha = \beta - 180^\circ$, когда поток вводится перпендикулярно начальному участку лопасти.

Графическая зависимость отношения скоростей $\Delta v_{su}/v_s$ от углов α , β и числа элементарных участков лопасти n в соответствии с формулой (26) приведена на рисунке 4.



1 - $\alpha = 0^\circ$; 2 - $\alpha = -15^\circ$; 3 - $\alpha = -30^\circ$; 4 - $\alpha = -45^\circ$; 5 - $\alpha = -60^\circ$; 6 - $\alpha = -75^\circ$; 7 - $\alpha = -90^\circ$;
 а - $n=1$; б - $n=2$; в - $n=3$; г - $n=4$; д - $n=5$; е - $n=10$

Рисунок 4. - Зависимость отношения $\Delta v_{su}/v_s$ от угла β наклона лопастей при различных углах ввода потока α

Для первого элементарного участка (рисунок 4а) скорости v_{su} и v_{su}^* уравниваются только при $\beta = 90^\circ$ и $\alpha = -90^\circ$, когда среда вводится параллельно лопасти. При других значениях этих углов скорости v_{su} и v_{su}^* имеют разные величины, что указывает на наличие тангенциальной скорости, с которой среда перемещается на следующий элементарный участок лопасти и активно воздействует на него. Для двух элементарных участков (рисунок 4б) отношение $\Delta v_{su} / v_s$ становится равным нулю при $\beta = 90^\circ$, независимо от направления ввода потока среды. С увеличением количества элементарных участков (рисунки 4в-4е) расширяется диапазон изменения угла наклона лопастей, при котором среда перестает влиять на работу лопастей турбины.

Вывод

Таким образом, при движении среды в межлопастном пространстве осевой турбины имеется некоторая активная длина лопасти от входного до определенного участка, после которого среда практически перестает активно влиять на параметры турбины. Наибольшее воздействие среда оказывает на лопасти на входном участке, для последующих участков по ходу движения потока ее влияние ослабевает. Количество активных участков лопасти, на которых среда воздействует на работу турбины, обратно пропорционально величине угла β .

Список использованных источников

1. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров осевой турбины от угла наклона лопастей // В.Н. Павлечко, Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 22-30.
2. Павлечко, В.Н. Параметры осевой турбины при закручивании входного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 2. – С. 41-53.

Pavlechko V.N.

On the fluid movement in the interlobe space of an axial turbine

Fluid velocities in the interlobe space of an axial turbine were analyzed for the case when a flow enters at an angle relative to the plane of rotation. The blade angle was assumed to be constant. A quotient of the axial to radial fluid velocities was set constant. The axial velocity could change radially. Several equations were derived to evaluate how the flow affects the turbine performance. The fluid has the strongest effect in the entrance region, then its influence gradually decreases along the turbine. An effective blade length, at which the fluid had an influence on parameters of the turbine, goes down when the fluid entry angle increases and the absolute blade angle decreases. A range of the blade angles where the fluid does not impact the turbine blade performance varies directly with the number of elementary surfaces.

Keywords: *axial turbine, interlobe space, fluid velocity, blade angle, fluid entry direction.*

Поступила в редакцию 01.06.2018 г.