

В. Н. Павлечко, доцент, канд. техн. наук
С. К. Протасов, доцент, канд. техн. наук
(БГТУ, г. Минск)

О ВЛИЯНИИ ЛОПАСТЕЙ НА ДАВЛЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

Основным уравнением лопастных машин является уравнение Эйлера [1, 2], определяющее теоретическое давление, создаваемое рабочим колесом центробежной машины,

$$P_r = \rho(u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_1), \quad (1)$$

которое при использовании тангенциальных составляющих абсолютных скоростей v_{2u} и v_{1u} принимает вид

$$P_r = \rho(u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}). \quad (2)$$

Обычно среда входит в межлопастное пространство колеса в радиальном направлении. В этом случае угол между векторами окружной и абсолютной скоростями среды $\alpha_1 \approx 90^\circ$, что соответствует условию безударного входа среды в колесо. Тогда уравнения (1) и (2) упрощаются

$$P_r = \rho u_2 v_2 \cos \alpha_2 = \rho u_2 v_{2u}. \quad (3)$$

Известные выражения справедливы при радиальном расположении лопастей и равенстве угловых скоростей колеса и среды $\omega = \omega_s$. В действительности при угле наклона лопастей до 90° скорость движения среды меньше, чем у колеса (соответственно $\omega_s < \omega$), а при $\beta > 90^\circ$ может превышать ее [3].

С учетом угла наклона лопастей и ускорения Кориолиса в работе [4] получены зависимости для определения давления, создаваемого радиальным нагнетателем лопастями в тангенциальном, радиальном и перпендикулярном плоскости направления соответственно:

$$P_u = \rho(u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}); \quad (4)$$

$$P_r = \rho \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}); \quad (5)$$

$$P = \rho \frac{u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}}{\sin^2 \beta}. \quad (6)$$

Для давления, создаваемого центробежной силой, получена формула

$$P_u = \rho \frac{v_{2u}^2 - v_{1u}^2}{2}. \quad (7)$$

Определим влияние лопастей колеса на среду при неравенстве скоростей колеса и среды. Рассмотрим лопасть 1-2, которая вращается вокруг оси O с угловой скоростью ω и вынуждает среду двигаться со скоростью v_1 на входе в межлопастное пространство и v_2 на выходе из него (рисунок 1). Эти скорости разложим на две составляющие: v_{1u} , v_{2u} в направлении окружных скоростей и v_{1r} , v_{2r} в радиальных направлениях соответственно.

Поскольку среда вращается вместе с рабочим колесом, то возникает также центробежная сила, вынуждающая ее двигаться со скоростью $v_{ц1}$ на входе и $v_{ц2}$ на выходе из колеса в радиальном направлении. Абсолютные скорости движения среды c_1 на входе и c_2 на выходе из колеса являются геометрической суммой векторов скоростей движения под действием лопастей v_1 , v_2 и центробежной силы $v_{ц1}$ и $v_{ц2}$ соответственно.

Определим силы, с которыми лопасть действует на среду.

В произвольной точке A на лопасти, удаленной на расстоянии r от оси вращения и движущейся со скоростью $u = \omega r$ (рисунок 2), лопасть действует на среду с силой F в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти. Эту силу можно разложить на две составляющие: тангенциальную силу F_u в направлении окружной скорости u и радиальную силу F_r , направленную вдоль радиуса. Векторы сил F и F_r составляют угол β .

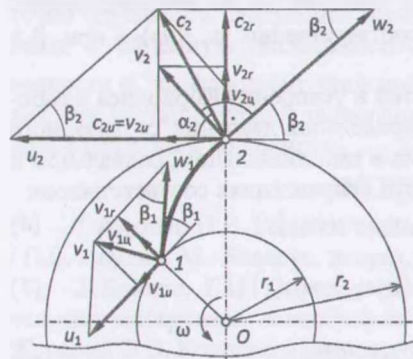


Рисунок 1 – Скорости в рабочем колесе радиального нагнетателя

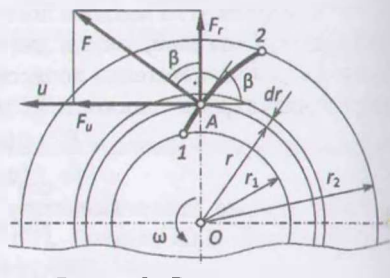


Рисунок 2 – Распределение сил воздействия лопасти на среду

Скорости движения среды в радиальном направлении на входе и выходе из колеса отличаются незначительно, а для спрофилированного колеса равны, и сила F_r расходуется на повышение потенциальной энергии среды, т. е. создает статическое давление. В тангенциальном направлении градиент давления отсутствует и сила F_u

расходуется на повышение кинетической энергии среды, т. е. создает динамическое давление.

Выделим элементарный объем среды возле точки A на расстоянии r от оси вращения шириной, равной ширине лопасти b , высотой dr и длиной dl (рисунок 3).

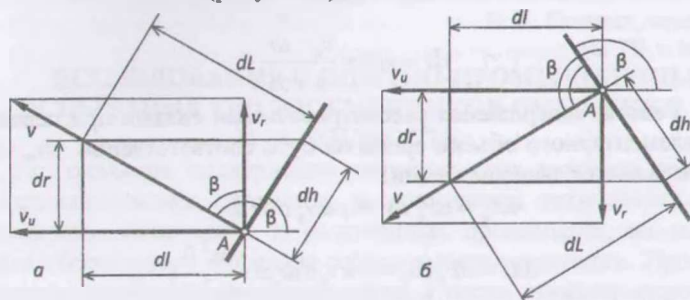


Рисунок 3 – Сечение элементарного объема среды
а) – лопасти отогнуты назад; б) – лопасти отогнуты вперед

Участок лопасти в точке A шириной b и высотой dh движется со скоростью $u = \omega r$ и действует на среду с силой:

а) в направлении окружной скорости

$$dF_u = \rho u^2 b dr ; \quad (8)$$

б) в радиальном направлении

$$dF_r = \rho u^2 b dr \frac{\cos \beta}{\sin \beta} ; \quad (9)$$

в) в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти

$$dF = \rho b dr \frac{u^2}{\sin \beta} . \quad (10)$$

Под действием этих сил элементарный объем среды движется со скоростями: v_u – в направлении окружной скорости, v_r – в радиальном направлении и v – в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, которые, как следует из рисунка 3, связанные соотношениями: $v = v_u / \sin \beta$; $v_r = v_u / \operatorname{tg} \beta$.

Точка A лопасти колеса перемещается на расстояние dl за время $\Delta t = dl / u$. Из рисунка 3 следует, что

$$\Delta t = \frac{dl}{u} = \frac{dr \sin \beta}{u \cos \beta} . \quad (11)$$

За это же время элементарный объем среды под действием лопасти перемещается на расстояния: ds_u в направлении окружной скорости, ds_r в радиальном направлении и ds в направлении, перпенди

кулярном плоскости лопасти, соответственно:

$$ds_u = v_u \Delta t = dr \frac{v_u \sin \beta}{u \cos \beta}; \quad (12)$$

$$ds_r = v_r \Delta t = \frac{v_u}{u} dr; \quad (13)$$

$$ds = v \Delta t = \frac{v_u}{u} \frac{dr}{\cos \beta}. \quad (14)$$

Работа, совершаемая рассматриваемыми силами при перемещении элементарного объема среды на пути соответственно ds_u , ds_r и ds выражается зависимостями:

$$dA_u = dF_u ds_u = \rho u v_u b dr dl; \quad (15)$$

$$dA_r = dF_r ds_r = \rho u v_u b dr dl \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (16)$$

$$dA = dF ds = \rho u v_u b dr dl \frac{1}{\sin^2 \beta}. \quad (17)$$

Удельная работа, отнесенная к элементарному объему среды ($b \cdot dr \cdot dl$), равна удельной энергии, приобретаемой средой в радиальном нагнетателе. Учитывая граничные значения окружных скоростей колеса и среды на входе и выходе из колеса, можно получить формулы (4)–(6), что указывает на справедливость проведенных вычислений.

Таким образом, давление радиального нагнетателя создается силой воздействия лопастей и центробежной силой. Центробежная сила и реакция лопастей в радиальном направлении создают статическое давление, реакция лопастей в тангенциальном направлении – динамическое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М.Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 29–35.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин. – М.: Химия, 1971. – С. 137–139.
3. Павлечко, В.Н. Влияние ускорения Кориолиса на напор радиального нагнетателя / В.Н.Павлечко. Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы МНТК. Минск, 27–29 ноября 2013 г. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 166–170.
4. Павлечко, В.Н. Взаимосвязь скоростей в радиальном нагнетателе / В.Н.Павлечко, О.А.Петров // ИФЖ. 2014. Т. 87, № 2. – С. 351–358.