УДК 621.436.004.5

Н. Г. Куць, к. т. н., доц.

О РАБОТЕ ОТКРЫТОЙ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ

Показана работа вентилятора как теплового насоса. Из анализа общей схемы работы вентилятора определен коэффициент преобразования. В процессе взаимодействия лопаток вентилятора с окружающей атмосферой рассмотрены: ударный механизм отдельных молекул воздуха, возникающие центробежные силы и гидродинамические силы, обусловленные законом Бернулли. Установлено, что мощность, потребляемая вентилятором, зависит от частоты вращения не в кубической степени, а в степени 3/2 с переходом в линейную связь.

Ключевые слова: *вентилятор, тепловой насос, окружающая среда, ламинарное течение, срывное течение, энергосистема, кластер.*

Вступление

В современных условиях энергетический кризис начинает проявляться из-за ограниченности природных углеводородных видов топлива (торфа, угля, нефти, газа) и постоянно растущих цен на эти виды топлива. Выход из создавшегося положения пытаются найти в различных направлениях. Особое значение уделяется способам получения максимального коэффициента преобразования одного вида энергии в другой. В этой области проводятся исследования использования низкопотенциального тепла окружающей среды с применением тепловых насосов.

Автомобиль, как и любое другое транспортное средство, движущееся в земной атмосфере, следует рассматривать как сложную энергосистему открытого типа. В процессе взаимодействия движущегося транспортного средства с окружающей атмосферой может происходить либо передача энергии от движущегося объекта в окружающую среду, либо наоборот – среда передает свою энергию движущемуся объекту.

При движении транспортного средства возникает взаимодействие его с окружающей воздушной средой. Соединяющим звеном передачи энергии «движущийся объект – окружающая среда» или «окружающая среда – движущийся объект» является вентилятор. Поэтому необходимо выяснить:

– какие взаимодействия возникают в процессе формирования вентилятором воздушного потока;

– определить условия, при которых вентилятор переходит в режим работы теплового насоса;

– разработать алгоритм и программу для компьютерного моделирования работы вентилятора как теплового насоса.

Анализ публикаций

В настоящее время в энергетике возникла практически революционная ситуация, когда начались интенсивные поиски новых способов получения и преобразования энергии [3]. В процессе работы тепловых насосов реализуются условия, когда сложная энергосистема становится открытой. В [4] показано, что при работе теплового насоса окружающая среда является активной средой. С этих позиций рассмотрим работу вентилятора как открытой системы, который используется для охлаждения различных нагревательных элементов в сложных энергосистемах.

Основная часть

Как происходит взаимодействие воздушного потока с лопастями вентилятора. Представим лопасти вентилятора в виде одной четверти эллипсоидальной поверхности с большой полуосью a и малой полуосью b. Большая полуось с радиусом r_0 составляет угол α. Ось X направим вдоль полуоси a, а ось Y – вдоль полуоси b. Начало отсчета поместим от оси вращения на расстоянии r_0.

При таком расположении, как изображено на рис. 1, в зону разрежения из окружающей среды будет засасываться воздух со скоростью звука

$$\bar{v} = \sqrt{\kappa \frac{P}{\rho}}, \tag{1}$$

где κ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, P – давление в окружающей среде и ρ – плотность воздуха.

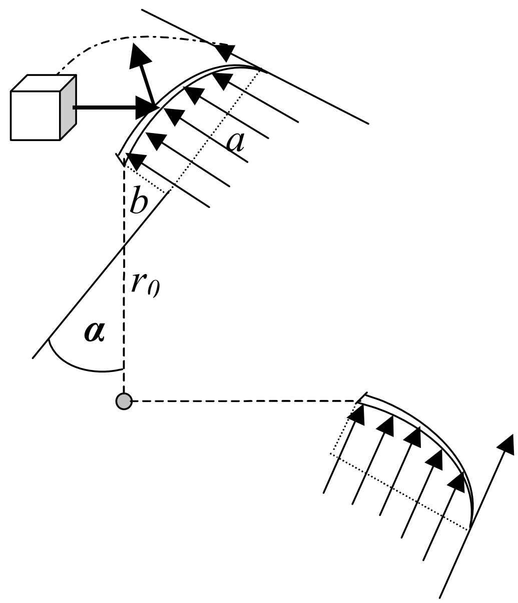

Рис. 1. Профиль лопаток и расположение их относительно оси вращения вентилятора

Со скоростью звука $\bar{v}$ каждая молекула воздуха будет сталкиваться с кластерами, которые формируют кристаллическое состояние вещества, из которого изготовлены лопатки вентилятора. Доля энергии, которая будет при упругом взаимодействии передаваться от молекулы воздуха к кластеру лопатки вентилятора с учетом энергии связи, в первом приближении составит [6]:

$$\Theta = \frac{8Mm_a}{(2M + m_a)^2}, \tag{2}$$

где M – масса кластера.

Каждый кластер воспринимает удары молекул воздуха, поток которых формируется в заданном направлении со скоростью звука. При этом реализуется обычный конвективный теплообмен. Отраженный от лопатки воздух охлаждается до величины

$$\Delta T = T_\infty - \Theta \frac{m_a \bar{v}^2}{2k_Б}. \tag{3}$$

Здесь T_∞ – температура окружающего воздуха.

Важно определить, под каким углом следует располагать лопатки вентилятора, чтобы обеспечить охлаждение воздуха всей взаимодействующей плоскостью лопатки, и когда такое охлаждение будет создавать максимальное увеличение момента на валу вращения вентилятора.

Примерная схема обтекания лопатки вентилятора в зависимости от направления вращения показана на рис. 2.

Когда лопатки вентилятора движутся своей вогнутой стороной, то они как бы захватывают поток (рис. 2. *а*).

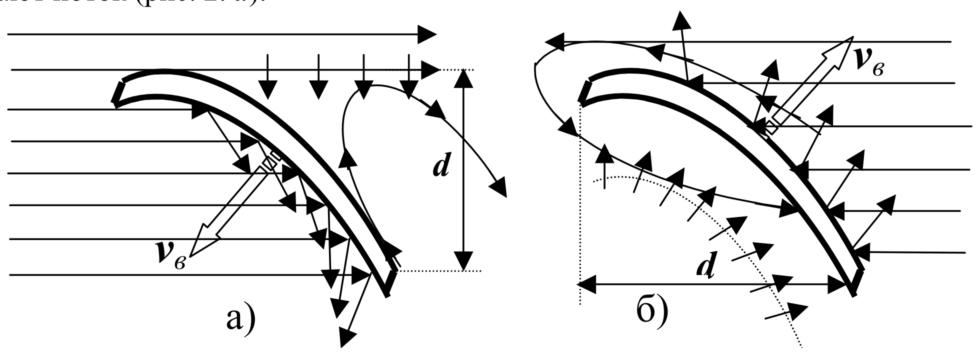

Рис. 2. Схема обтекания лопатки вентилятора при его вращении
а) в направлении вогнутой стороны и б) в направлении выпуклой стороны

Характер взаимодействия молекул воздуха при вращении вентилятора в направлении вогнутой поверхности лопатки приведен на рис. 3. Направление вращения показано фигурной стрелкой. Для вогнутой поверхности на расстоянии x по большой полуоси удар молекул о поверхность происходит под углом δ.

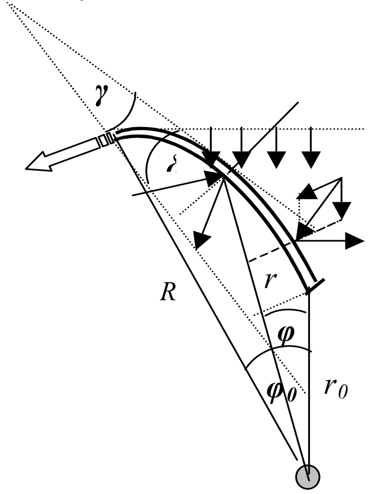

Рис. 3. Схема взаимодействия молекул воздуха с лопаткой вентилятора при вращении вогнутой стороной

Из рисунка 3 следует, что

$$\begin{aligned} \delta &= \pi / 2 - (\alpha - \varphi); \\ \delta' &= \alpha - \varphi \end{aligned}, \qquad (4)$$

а нормальная и тангенциальные скорости равны соответственно:

$$\begin{aligned} v_n(x) &= 2\pi rn \cos(\delta'); \\ v_\tau(x) &= 2\pi rn \sin(\delta'). \end{aligned} \qquad (5)$$

Сила действия на элемент dx определяется тремя составляющими: ударное действие молекул воздуха нормальной составляющей, центробежное воздействие тангенциальной составляющей и действием закона Бернулли вследствие тангенциального движения воздуха вдоль вогнутой поверхности. Преодолевать необходимо только ударное действие молекул воздуха и тратить энергию на формирование потока воздуха за лопаткой.

Если ось Z направить вдоль лопатки по радиусу r_0, то масса воздуха за время dt начнет взаимодействовать с элементом ширины лопатки dl следующей величины:

$$dm = \rho_0 dldz \sin(\delta')v_B dt = 2\pi rn\rho_0 dxdzdt \frac{\sin(\delta')}{\cos(\gamma)} \tag{6}$$

Здесь: $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx/\cos(\gamma)$, а угол γ определяется через производную от эллипсоидальной кривой на расстоянии x вдоль большой полуоси эллипса.

Время $dt = dl/v_\tau = dx/[2\pi rn\cos(\gamma)\sin(\delta')]$.

Учитывая (5) и (6), все три силы, действующие на элемент ширины лопатки dl перпендикулярны радиусу вращения вентилятора, Необходимо все эти силы вентилятору преодолевать, и они равны:

$$\begin{aligned} dF_{уд} &= 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dxdz \frac{\sin(\delta')\cos^2(\delta')}{\cos(\gamma)}; \\ dF_{Ц} &= 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dxdz \frac{\sin^2(\delta')\cos(\delta')}{\cos^2(\gamma)} \frac{dx}{r_{кр}}; \\ dF_{Б} &= 2\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dxdz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos(\gamma)}. \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь r – радиус элемента лопатки от оси вращения равен:

$$r = \sqrt{[r_0 + c\cos(\alpha + arctg(b/a) - c\cos(\alpha + arctg(y(x)/(a-x))]^2 + c^2\sin^2(\alpha + arctg(y(x)/(a-x))}$$

и в свою очередь $c = \sqrt{a^2 + b^2}$,

α – угол менее 45^0 установки лопатки на оси вращения вентилятора; $r_{кр}$ – радиус кривизны эллипсоидальной поверхности на расстоянии x вдоль большой полуоси a, определяемый из равенства производной для эллипса и окружности.

Отсюда следует, что

$$r_{кр} = \sqrt{a^4/b^2 + (a^2/b^2 - 1)x^2} . \tag{8}$$

Результирующая сила представляет собой двойной интеграл вида

$$F_{вып} = -\int_0^a\int_0^h (dF_{уд} + dF_{Ц} + dF_{Б})\frac{dx}{a}\frac{dz}{h}, \tag{9}$$

а результирующий момент силы:

$$M_{вып} = -\int_0^a\int_0^h (dF_{уд} + dF_{Ц} + dF_{Б})r\frac{dx}{a}\frac{dz}{h}. \tag{10}$$

Возрастание температуры воздуха вследствие ударного воздействия лопатками вентилятора произойдет максимум на

$$\Delta T = \frac{m_a 4\pi^2 R^2 n^2}{6k_Б}. \tag{11}$$

При R = 0,1 м и n = 100 Гц ΔT ~ 1,7 К. Такое изменение температуры потока практически можно не учитывать.

В случае вращения вентилятора в направлении выпуклой поверхности (рис. 2 б) только одна сила препятствует движению, а остальные силы, возникающие вследствие вращения вентилятора, направлены в сторону вращения. Поэтому энергопотребление при заданной скорости вращения резко уменьшается и особенно при возрастании скорости вращения вентилятора.

Характер взаимодействия молекул воздуха при вращении вентилятора в направлении выпуклой поверхности лопатки приведен на рис. 4. Направление вращения показано фигурной стрелкой. Для выпуклой поверхности на расстоянии x по большой полуоси удар молекул о поверхность происходит под углом δ.

Из рис. 4 следует, что

$$\delta = \pi/2 - (\gamma + \varphi_0 - \varphi); \qquad (12)$$
$$\delta' = \gamma + \varphi_0 - \varphi,$$

а нормальная и тангенциальная скорости равны соответственно:

$$v_n(x) = 2\pi rn\cos(\delta'); \qquad (13)$$
$$v_\tau(x) = 2\pi rn\sin(\delta').$$

Сила действия на элемент dx определяется тремя составляющими: ударным действием молекул воздуха нормальной составляющей, центробежным воздействием тангенциальной составляющей и действием закона Бернулли вследствие тангенциального движения воздуха вдоль выпуклой поверхности. Преодолевать необходимо только ударное действие молекул воздуха.

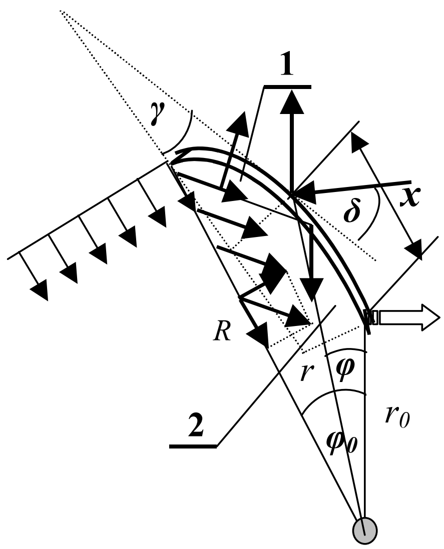

Рис. 4. Схема взаимодействия молекул воздуха с лопаткой вентилятора при вращении выпуклой стороной

Если ось Z направить вдоль лопатки, то масса воздуха за время dt начнет взаимодействовать с элементом ширины лопатки dl следующей величины:

$$dm = \rho_0 dldz\sin(\delta')v_B dt = 2\pi rn\rho_0 dxdzdt\frac{\sin(\delta')}{\cos(\gamma)}. \qquad (14)$$

Здесь $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx/\cos(\gamma)$, а угол γ определяется через производную от эллипсоидальной кривой на расстоянии x вдоль большой полуоси эллипса. Время $dt = dl/v_\tau = dx/[2\pi rn\cos(\gamma)\sin(\delta')]$.

Учитывая (13) и (14), все три силы, действующие на элемент длины лопатки dl перпендикулярно радиусу вращения вентилятора равны:

$$dF_{уд} = 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dxdz \frac{\sin^2(\delta')\cos(\delta')}{\cos(\gamma)};$$
$$dF_{Ц} = 4\pi^2 r^2 n^2 \rho_0 dxdz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos^2(\gamma)} \frac{dx}{r_{кр}}; \quad (15)$$
$$dF_{Б} = 2\pi^2 r^2 n^3 \rho_0 dxdz \frac{\sin^3(\delta')}{\cos(\gamma)}.$$

Результирующая сила представляет собой двойной интеграл вида

$$F_{вып} = \int_0^a \int_0^h (-dF_{уд} + dF_{Ц} + dF_{Б}) \frac{dx}{a} \frac{dz}{h}, \quad (16)$$

а результирующий момент силы:

$$M_{вып} = \int_0^a \int_0^h (-dF_{уд} + dF_{Ц} + dF_{Б}) r \frac{dx}{a} \frac{dz}{h}. \quad (17)$$

Возрастание температуры воздуха вследствие ударного воздействия лопатки вентилятора произойдет в соответствии с (11) максимум на $\Delta T \sim 1{,}7$ К. Такое изменение температуры потока практически можно не учитывать.

За вогнутой стороной лопатки вентилятора образуется только срывное течение, и само взаимодействие с окружающей средой представляет собой сложный процесс. Зона разрежения за срывным течением заполняется воздухом во взаимно перпендикулярных направлениях, как это показано на рис. 4, вдоль радиуса вращения и перпендикулярно радиусу вращения с учетом линейной скорости вращения лопатки. Угол, под которым распространяется поток воздуха, определяется по (34).

На основании рис. 4 заполнение зоны разрежения происходит в двух разных областях по-разному. Разделение первой и второй зон в зависимости от скорости вращения вентилятора происходит на расстоянии $x_{кр1}$, и определяется путем решения нелинейного уравнения вида:

$$arctg\left(\frac{b\sqrt{1-(a-x_{кр1})^2/a^2}}{(a-x_{кр1})}\right) = arctg\left(\frac{c\sin(\alpha + arctg(b/a))}{r_0 + c\cos(\alpha + arctg(b/a))}\right) + arctg\left(\frac{\bar{v} - 2\pi rn}{\bar{v}}\right) - \alpha. \quad (18)$$

Конкретные значения в зависимости от частоты вращения вентилятора приведены в табл. 1. Полученные значения $x_{кр1}$ для второй области являются верхним пределом интегрирования.

В первой области встречаются два потока с взаимно противоположным движением. В результате в этой зоне возникает гидродинамическое давление, равное $0{,}5\rho\bar{v}^2 = 0{,}76$ атм. На внешней стороне на выделенном элементе поверхности воздух движется со скоростью

$$v_\tau = 2\pi rn \sin(\gamma + \varphi_0 - \varphi) \quad (19)$$

и создает гидродинамическое давление $0{,}5\rho v_\tau^2$. Разность этих давлений определяет результирующий момент и соответственно мощность

$$N = \int_{x_{кр1}}^{a} \pi n \rho (\bar{v}^2 - v_\tau^2) r \frac{\cos(\gamma + \varphi_0 - \varphi)}{\cos(\gamma)} h dx \quad (20)$$

Во второй области молекулы воздуха бомбардируют внутреннюю поверхность на расстоянии x вдоль большой полуоси a под углом δ'', который равен:

$$\delta'' = \beta - \gamma; \quad \delta''' = \beta + \varphi_0 - \varphi - arctg\left(\frac{b\sqrt{1 - x^2/a^2}}{a - x}\right). \quad (21)$$

Нормальная и тангенциальная скорости удара молекул воздуха о вогнутую поверхность лопатки вентилятора определяются так:

$$v_n = \bar{v}\sin(\delta''); \quad v_\tau = \bar{v}\cos(\delta'') . \tag{22}$$

На элемент длины эллипсоидальной поверхности лопатки dl воздействует масса

$$\Delta m = \rho dldz\bar{v}\sin(\delta'')dt , \tag{23}$$

где $dt = dl / v_\tau = dl / \bar{v}\cos(\delta'')$.

На основании (21) – (23) силы воздействия на элемент длины выразятся так:

$$\begin{aligned} &\Delta F_{уд} = \rho dxdz\bar{v}^2 \frac{\sin^2(\delta'')\cos(\delta''')}{\cos(\gamma)}; \\ &\Delta F_{Ц} = \rho dx^2 dz\bar{v}^2 \sin(\delta'')\cos(\delta'')\cos(\delta''')/[\cos^2(\gamma)r_{кр}]; \\ &\Delta F_{Б} = \rho dxdz\bar{v}^2\cos^2(\delta'')cos(\delta''')/\cos(\gamma). \end{aligned} \tag{24}$$

Результирующая сила перпендикулярна радиусу вращения

$$F_{рез} = \int_0^{x_{кр}}\int_0^h (\Delta F_{уд} + \Delta F + \Delta F)\frac{dxdz}{ah} , \tag{25}$$

а момент силы:

$$M_{рез2} = \int_0^{x_{кр}}\int_0^h (\Delta F_{уд} + \Delta F + \Delta F)r\frac{dxdz}{ah} . \tag{26}$$

Такому моменту силы соответствует мощность:

$$N_2 = 2\pi nM_{рез2} \tag{27}$$

Поток воздуха, отбрасываемый вентилятором, охладится в среднем на:

$$\Delta T = \int_0^{x_{кр}} \frac{\Theta m_a(\bar{v} - 2\pi rn)^2}{2k_Б}\frac{dx}{a} \tag{28}$$

Время полного заполнения зоны разрежения в срывном течении:

$$t_{зап} = \frac{c\cos(\alpha+\eta)}{\bar{v}} , \tag{29}$$

где угол $\eta = arctg(b/a)$; $R = \sqrt{[r_0 + c\cos(\alpha+\eta)]^2 + c^2\sin^2(\alpha+\eta)}$ – радиус ометаемой поверхности лопатками вентилятора и r_0 – радиус круга вентилятора.

За время $t_{зап}$ лопатка вентилятора сместится на угол

$$\varphi_0 = 2\pi nt_{зап} \tag{30}$$

Здесь n – частота вращения вентилятора.

При заданной скорости вращения вентилятора за время t лопатка сместится на угол φ. Если угол φ будет меньше угла φ_0, то срывное течение образуется на некотором расстоянии x от начала лопатки. Это расстояние может быть найдено путем решения нелинейного уравнения вида:

$$\frac{1}{2\pi n}arctg\left(\frac{c\sin(\alpha+\eta) - c_1\sin(\alpha+\eta')}{r_0 + c\cos(\alpha+\eta) - c_1\cos(\alpha+\eta')}\right) = t_{зап} , \tag{31}$$

где $c_1 = \sqrt{x^2 + b^2(1 - x^2/a^2)}$ и $\eta' = arctg\left(b\sqrt{1 - x^2/a^2}/(a-x)\right)$.

Произведем конкретные оценки для лопаток вентилятора, выполненных из алюминия в виде эллипсоидальной поверхности с размерами большой полуоси a = 5 см, малой полуоси b = 2 см и с радиусом круга r_0 = 5 см. Радиус ометаемой поверхности при угле наклона большой полуоси по отношению к радиусу вращения $\alpha = 32^0$ равен 9,265 см.

Кластер алюминия представляет собой простую кубическую структуру, состоящую из семи трехатомных молекул Al_3, что соответствует гранецентрированной структуре кристалла алюминия. Поэтому масса кластера алюминия равна $21m_am_0 = 21{\cdot}26{,}98{\cdot}1{,}66{\cdot}10^{-27} = 9{,}41{\cdot}10^{-24}$ кг (m_a – атомный вес атома алюминия и m_0 – масса одной единицы атомного веса). При упругом столкновении молекул воздуха с кластером алюминия доля передаваемой энергии равна $\Theta = 0{,}097$.

За выпуклой стороной лопатки вентилятора образуется зона срывного течения. Полностью зона срывного течения образуется за время, определяемое уравнением (29). Оно равно $9{,}2{\cdot}10^{-5}$ сек. Этому времени соответствует критическая частота вращения 844 Гц. Чтобы за вентилятором образовывалось полностью срывное течение, его лопасти должны вращаться со сверхзвуковой скоростью. При дозвуковых скоростях вращения срывное течение будет образовываться, но только в небольшой области. Эта область определяется путем решения нелинейного уравнения (31). На каких расстояниях возникает срывное течение при различных скоростях вращения представлено табл. 1.

Таблица 1

Положение точки срыва течения на большой полуоси в зависимости от частоты вращения

Параметры	Частота вращения, Гц							
	30	50	60	75	100	200	300	400
φ_0, град.	1,00	1,66	2,00	2,49	3,33	6,65	9,98	13,30
$x_{кр}$, см	0,92	1,01	1,06	1,12	1,23	1,66	2,12	2,63
$x_{кр1}$, см	2,95	2,84	2,79	2,70	2,55	1,84	0,97	0

Из табл. 1 следует, что при малых скоростях вращения срывное течение образуется вблизи осевой части лопатки. До точки срыва реализуется ламинарное обтекание. Скорость движения потока обусловлена только скоростью вращения вентилятора. При этом отсутствует ударный механизм взаимодействия. Реализуются только центробежные силы и силы, возникающие вследствие уменьшения давления в соответствии с законом Бернулли. Эти силы на элемент длины лопатки dl равны:

$$\begin{aligned}\Delta F_Ц &= 2\rho\pi^2 r^2 n^2 (R-r)(\varphi_0-\varphi)dxdz\frac{\cos(\delta)}{\cos(\gamma)}\frac{1}{r_{кр}};\\ \Delta F_Б &= 2\rho\pi^2 r^2 n^2 (R-r)(\varphi_0-\varphi)dxz\frac{\cos(\delta)}{\cos(\gamma)}\end{aligned}, \tag{32}$$

где r – радиус вращения точки x на большой полуоси a, φ_0 – угол, перекрываемый лопаткой по дуге ометаемой поверхности, угол $\delta = \alpha + \varphi_0 - \varphi$. Эти силы создают вращающий момент, противоположный направлению вращения вентилятора, который равен:

$$M = \int_{x_{кр}}^{a} -(\Delta F_Ц + \Delta F_Б) r \frac{dx}{a}. \tag{33}$$

Образующееся разрежение в срывном течении заполняется воздухом во взаимно перпендикулярных направлениях, как это показано на рис. 4 вдоль радиуса вращения и перпендикулярно радиусу вращения с учетом линейной скорости вращения лопатки. Угол, под которым распространяется поток воздуха, равен:

$$\beta = arctg\left(\frac{\bar{v} - 2\pi rn}{\bar{v}}\right) \tag{34}$$

Молекулы воздуха бомбардируют внешнюю поверхность на расстоянии x вдоль большой полуоси a под углом δ, который равен:

$$\delta = \pi / 2 - \delta'; \; \delta' = (\alpha + \beta - \varphi) . \tag{35}$$

Нормальная и тангенциальная скорости удара молекул воздуха о вогнутую поверхность лопатки вентилятора равны:

$$v_n = \bar{v} \sin(\delta'); \quad v_\tau = \bar{v} \cos(\delta') . \tag{36}$$

На элемент длины эллипсоидальной поверхности лопатки dl воздействует масса

$$\Delta m = \rho dl dz \bar{v} \cos(\delta') dt , \tag{37}$$

где $dt = dl / v_\tau = dl / \bar{v} \cos(\delta')$.

На основании (34) – (37) силы воздействия на элемент длины будут иметь такое выражение:

$$\begin{aligned} \Delta F_{уд} &= \rho dx dz \bar{v}^2 \frac{\sin(\delta')\cos^2(\delta')}{\cos(\gamma)}; \\ \Delta F_{Ц} &= \rho dx^2 dz \bar{v}^2 \sin^2(\delta')\cos(\delta') / [\cos^2(\gamma) r_{кр}]; \\ \Delta F_{Б} &= \rho dx dz \bar{v}^2 \sin^3(\delta') / \cos(\gamma). \end{aligned} \tag{38}$$

Результирующая сила перпендикулярно радиусу вращения

$$F_{рез} = \int_0^{x_{кр}} \int_0^{h} (\Delta F_{уд} - \Delta F - \Delta F) \frac{dxdz}{ah} , \tag{39}$$

а момент силы:

$$M_{рез1} = \int_0^{x_{кр}} \int_0^{h} (\Delta F_{уд} - \Delta F - \Delta F) r \frac{dxdz}{ah} . \tag{40}$$

Потребляемая мощность вентилятором в соответствии с (40) равна:

$$N_1 = 2\pi n M_{рез1} . \tag{41}$$

Мощность, потребляемая вентилятором, от частоты вращения в соответствии с общим определением должна зависеть пропорционально третьей степени частоты вращения. Реально эта зависимость пропорциональна примерно 3/2 и с ростом скорости вращения уменьшается и переходит в линейную зависимость. Это результат воздействия многих сил на лопасти вентилятора, которые возникают вследствие взаимодействия их с окружающей атмосферой. С ростом числа ступеней вентилятора мощность потребления незначительно уменьшается.

Вентилятор отбрасывает воздух перпендикулярно плоскости своего вращения. Каждая лопасть вентилятора формирует скорость потока воздуха:

$$\dot{Q} = \int_0^{a} (\bar{v} - 2\pi r n)(1 - \sqrt{\Theta}) \frac{dx}{a} . \tag{42}$$

С ростом скорости вращения скорость отбрасываемого потока уменьшается почти по линейному закону. Максимальная скорость отбрасываемого потока возникает при малых скоростях вращения вентилятора, поэтому системы, работающие в вентиляторном режиме, функционируют при малых скоростях их вращения. Если использовать такие системы в качестве вихревого теплового насоса, то эффективность их применения

$$\eta = \frac{\dot{Q}^3 + 2\dot{Q} R_Г \Delta T / m_a}{\bar{v}^3} . \tag{43}$$

Здесь $R_Г$ = 8,3144 Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная.

При скорости вращения 10 Гц коэффициент преобразования составляет 2,10%, а при 100 Гц – это 1,36%. При таких коэффициентах преобразования вентилятор использовать в качестве теплового насоса нецелесообразно. Потому вентиляторы в автомобильном транспорте широко используются для охлаждения корпуса работающего двигателя внутреннего сгорания.

Выводы

Разработана общая схема работы вентилятора и обосновано, каким образом определяется коэффициент преобразования такой открытой энергосистемы. Выяснены, какие типы взаимодействия возникают в процессе формирования вентилятором воздушного потока. Определены условия, при которых вентилятор переходит в режим работы теплового насоса. Созданы алгоритм и программное обеспечение для компьютерного моделирования работы вентилятора как теплового насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречихин Л. И. Аэродинамика малоразмерного БЛА / Л. И. Гречихин, Д. А. Сахарук, А. Б. Сивашко // Proceedings 4th International Conference on SAUAV-2010. – 2010. – P. 39.
2. Гацукевич А. С. Работа турбин в качестве теплового насоса // А. С. Гацукевич, Л. И. Гречихин Гражданская авиация XX1 век: Сб. материалов 1 Международной молодежной научной конференции 23 – 24 апреля 2009 г. – Ульяновск: УВАУ ГА – 2009 – С. 9 – 10.
3. Гречихин Л. И. Современная энергетика. Пути и методы развития и применение на транспорте / Л. И. Гречихин, Куць Н. // Наукові нотатки. – 2010. – Вып. 28 (май 2010) – С. 162 – 165.
4. Гречихин Л. И. Получение и преобразование энергии в открытых системах / Л. И. Гречихин // Энергетика. – 2004. – № 4. – С. 76 – 81.
5. Плешивцев Н. В. Физика воздействия ионных пучков на материалы / Н. В. Плешивцев, А. И. Бажин – М.: Вузовская книга, 1998. – 392 с.
6. Стасенко А. Л. Физические основы полета / А. Л. Стасенко – М.: Бюро квантум, 2005. – 256 с.

Куць Надежда Григорьевна – к. т. н., доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство», тел. моб. – 0660821228, e-mail – Kuts_n@mail.ru

Луцкий национальный технический университет.