

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ФАР

О.И. Крахин, В.А. Зенин

Московский авиационный институт (ГТУ)

Статья посвящена разработке технических основ создания энергетической установки (ЭУ), обеспечивающей частичную рекуперацию теп-ловой энергии из системы жидкостного охлаждения крупногабаритных ФАР. Основой такой установки является теплоэнергетическая установка (ТЭУ), преобразующая тепловую энергию теплоносителя системы охлаждения в механическую. В качестве актуаторов в ней применены элементы из сплава с памятью.

Предлагаемая схема построения ТЭУ представляет собой установку турбинного типа, ротор на обод которого размещены герметичные пневмоцилиндры, частично погружён в тёплую воду. Движение поршня пневмоцилиндров в нагретом состоянии (в воде) производится активным элементом из сплава с памятью, а обратное движение в охлаждённом состоянии (на воздухе) – за счёт разрежения в цилиндре. Движущий момент ротора создаётся разностью за счёт подъёмной силы модулей, находящихся в воде.

Разработана методика расчёта ТЭУ и основе расчётов даны рекомендации по оптимизации схемы и конструкции ТЭУ рассматриваемого типа.

В отличие от других видов антенн фазированные антенные решётки (ФАР) значительное количество энергии за счёт потерь в электронных (фазирующих) блоках и необходимости обеспечения охлаждения теплонагруженных и теплочувствительных элементов. Особенно эти потери велики в крупногабаритных стационарных ФАР, и составляют десятки или сотни кВт. Для обеспечения требуемого режима, как правило, используются жидкостные системы охлаждения.

Целью настоящей работы является разработка технических основ создания энергетической установки (ЭУ), обеспечивающей частичную рекуперацию тепловой энергии из системы охлаждения. Энергетическая установка состоит из теплоэнергетической установки (ТЭУ), преобразующей тепловую энергию теплоносителя системы охлаждения в механическую, и генератора, преобразующего механическую энергию в электрическую. Задача создания специального генератора была решена ранее. Поэтому далее рассматриваются вопросы, связанные с созданием ТЭУ, выполненной на основе элементов из сплава с памятью.

Известно, что сплавы с эффектом памяти (ЭП) обладают способностью пластически деформироваться при охлаждении и восстанавливать исходную форму при нагреве. Это обусловлено протекающими в них структурными превращениями мартенситно-аустенитного типа. Для расчета функциональных характеристик устройств и элементов из материалов с ЭП необходимо знать связь между деформациями материала и приложенными к нему механическими напряжениями при разных температурах.

В настоящее время существует большое количество технических решений по созданию тепловых двигателей, на основе свойств сплавов с памятью, преобразующих тепло в механическую работу при малых перепадах температур. Однако такие двигатели обладают низкой эффективностью. Это объясняется отсутствием метода проектирования таких установок, учитывающего большое количество факторов, определяющих их работоспособность. К последним относятся специальные свойства материалов, требования к конструкции активных элементов и термодинамическим режимам работы установок.

В качестве материала с памятью используется Ni-Ti сплав (нитинол), обладающий большой величиной генерируемого напряжения в режиме восстановления и коррозионной стойкостью. Критический порог температур нитинола может достигать широкого диапазона (от +100°C до -150°C) в зависимости от соотношения никеля и титана и наличия примесей в сплаве.

Нитинол имеет две фазы: мартенситную или аустенитную. Мартенситная фаза находится ниже теплового порога, а аустенитная - выше. Характеризуя нитиноловый образец, можно говорить о двух специфических температурах, так как температура, до которой образец должен быть нагрет, чтобы началась аустенитная фаза (начальная аустенитная температура A_s) несколько выше температуры, до которой он должен быть охлажден, чтобы наступила мартенситная фаза (мартенситная начальная температура M_s). Можно говорить о диапазоне примерно в 20 °C, разделяющих A_s и M_s , как градиент, через который материал проходит из одной фазы в другую. Восстановление формы в аустенитной фазе происходит при нагревании образца до температуры 900 - 600 °C в течении нескольких минут. Трансформация нитинола сопровождается заметным

изменением многих физических характеристик материала. Наиболее важной из них является термомеханическое преобразование, которое представляет собой изменение внутренней кристаллической структуры от ромбоидрического типа в холодной фазе, до кубического типа в горячей фазе. В этом состоянии деформация происходит с малыми потерями тепла за счет смещения микрограниц внутри одного кристалла. Поскольку в этом процессе отсутствуют атомные связи, он обратим. При нагревании кристалла выше его температуры трансформации происходит образование кубической формы, и атомы стремятся занять свои первоначальные места. Этим и объясняется основное свойство нитинола, заключающееся в том, что деформированный путем охлаждения материал после нагревания приобретает свою первоначальную форму.

Предлагаемая схема построения ТЭУ представляет собой установку турбинного типа.

Рассмотрим принцип действия установки и проведем расчет суммарного момента для пары элементов при повороте колеса на 360° . Принципиальная схема представлена на рисунке 1.

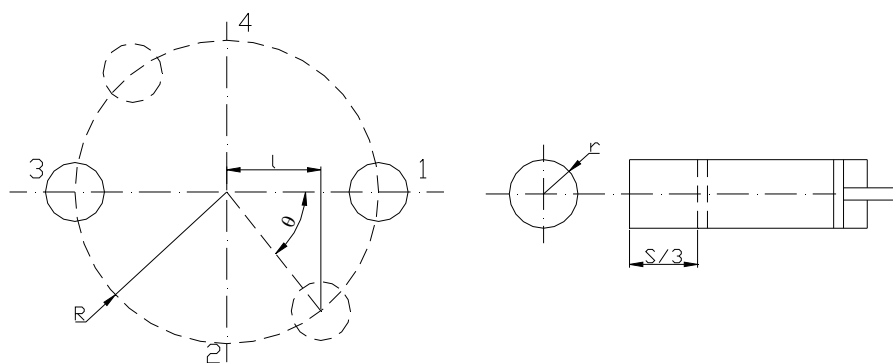


Рис.1. Схема ТЭУ

Ротор, частично погружённый в тёплую воду, конструктивно представляет собой колесо, на ободе которого размещены герметичные пневмоцилиндры (модули) (рис. 2). Количество пневмоцилиндров и габаритные размеры определяются задаваемой мощностью и нагрузкой. В исходном состоянии пневмоцилиндры имеют объём равный примерно $1/3$ от рабочего. Перемещение поршня производится активным элементом из сплава с памятью (АЭ).

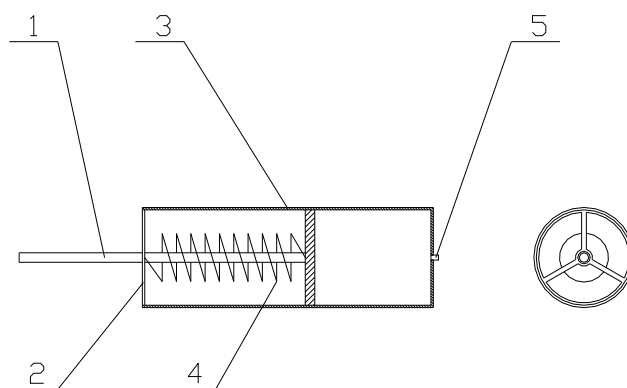


Рис.2. Схема пневмоцилиндра; 1-поршень, 2-крышка стакана, 3-стакан, 4-АЭ, 5 - клапан.

Каждый модуль поочередно погружается в воду. При этом АЭ, нагреваясь, совершает рабочий ход в на участке 1-2 и увеличивает рабочий объём пневмоцилиндра до полного в результате чего в пневмоцилиндре создаётся разрежение. На участке 2-3 модуль создаёт полезный

движущий момент за счёт подъёмной силы. Движущий момент ротора определяется разностью моментов от подъёмной силы модулей на участке 1-2 и участке 2-3.

После выхода пневмоцилиндра из воды АЭ охлаждается, сплав переходит в мартенситное состояние, и за счёт разности наружного и внутреннего давления поршень пневмоцилиндра в пределах половины оборота возвращается в исходное состояние.

Из условия известно, что объём газа в цилиндре зависит от угла θ . В положении 1 (до момента когда элемент погрузится в жидкость) объём газа равен $\frac{1}{3} \cdot S \cdot F$, где $F = 2 \cdot \pi \cdot r$ - площадь цилиндра.

Определим зависимость объёма газа от положения цилиндра $V(\theta)$. Во время прохождения элементом участка 1-2 объём газа в поршне будет меняться по линейному закону в зависимости от угла θ :

$$V = k \cdot \theta + b;$$

$$\text{при } \theta=0 \quad b = \frac{1}{3} \cdot S \cdot F;$$

$$\text{при } \theta = \frac{\pi}{2} \quad k = \frac{4 \cdot S \cdot F}{3 \cdot \pi};$$

тогда

$$V_{1-2} = S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right).$$

(1)

На участке 2-3 объём газа не зависит от угла θ и равен:

$$V_{2-3} = S \cdot F.$$

(2)

Рассмотрим действие выталкивающей силы, которая равна:

$$F_B = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_T,$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости;

$$g = 9.8 \frac{м}{с^2} - \text{ускорение свободного падения};$$

V_T -объём тела, погруженного в жидкость, в нашем случае объём газа в поршне.

В зависимости от положения элемента выталкивающая сила будет разной (с учетом

[1]):

выталкивающая сила зависит от угла по закону (с учетом (1)):

$$F_{B_{1-2}} = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right);$$

(3)

На участке 2-3 выталкивающая сила не зависит от угла и равна с учетом (2):

$$F_{B_{2-3}} = \rho_{ж} \cdot g \cdot S \cdot F.$$

(4)

Во время движения элемента по кругу будет меняться величина l (расстояние от элемента до вертикальной оси) (см. рис.3.). Величина l зависит от угла θ по закону:

$$l = R \cdot \cos(\theta). \quad (5)$$

Выразим моменты, которые создаются выталкивающей силой, от угла θ на всех участках движения С учетом (3), (4) и (5) получаем.

Участок 1-2:

$$M_{1-2} = R \cdot \cos(\theta) \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot S \cdot F \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right);$$

(6)

Участок 2-3:

$$M_{2-3} = R \cdot \cos(\theta) \cdot \rho_{жс} \cdot g \cdot S \cdot F;$$

(7)

преобразуем уравнения (6) и (7) к виду:

$$M = A \cdot \gamma \cdot R \cdot S \cdot F; \quad (8)$$

где

$$\gamma = \rho_{жс} \cdot g$$

R – радиус колеса;

S – ход поршня;

F – площадь сечения цилиндра;

$$A = \begin{cases} -\cos(\theta) \cdot \left(\frac{4 \cdot \theta}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{3} \right), \theta \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right]; \\ -\cos(\theta), \theta \in \left[\frac{\pi}{2}; \pi \right]; \\ 0, \theta \in [\pi; 2\pi]. \end{cases}$$

График зависимости величины A от угла θ представлен на рисунке 3.

Полученные результаты показывают, что для обеспечения работы установки достаточно разместить на колесе 4 модуля (рис.4), а для устойчивого положения 16 и более (рис.5).

Таким образом, проведенные расчёты показали практическую возможность создания теплоэнергетической установки по предложенной схеме, работа которой обеспечивается, во-первых, за счёт применения актуаторов из сплава с памятью, использующих температурный потенциал между нагретой водой системы охлаждения и воздухом и, во-вторых, подъёмной силы, создаваемой пневмоцилиндрами.

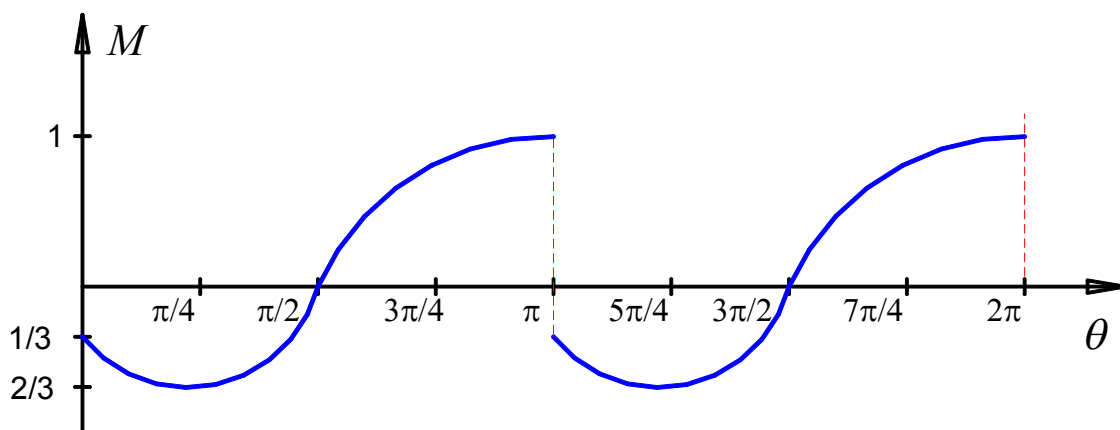


Рис.3. График $M=f(\theta)$ для пары модулей

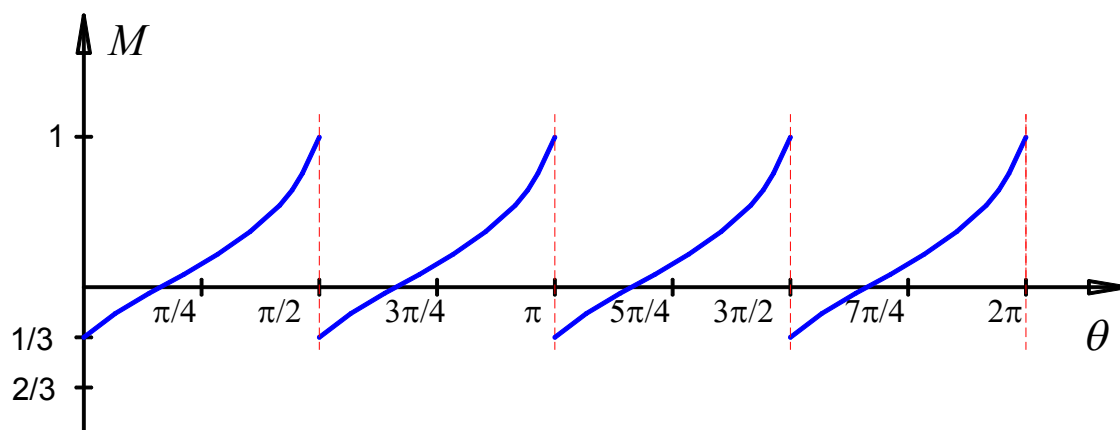


Рис.4. График $M=f(\theta)$ для двух пар модулей

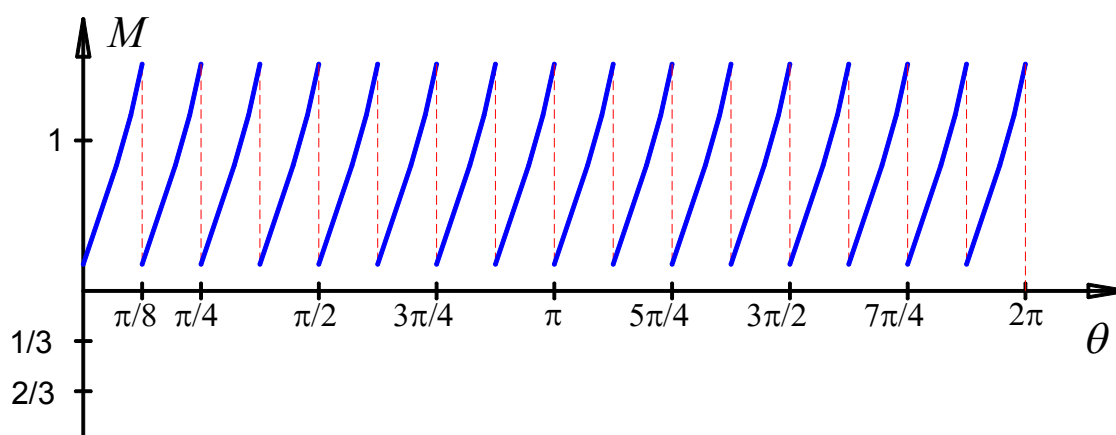


Рис.5. График $M=f(\theta)$ для восьми пар модулей

Можно также отметить, что спроектированная в соответствии с разработанным методом экологически чистая теплоэнергетическая установка, отличается малой массой, бесшумностью, компактностью, способностью сохранять работоспособность в различных агрессивных средах, в вакууме, обладает высокой точностью позиционирования и возможностью регулирования скорости без снижения нагрузочной способности, имеет в номинальном режиме мощность на выходе во много больше существующих аналогов.

Помимо рекуперации энергии в системах охлаждения крупногабаритных устройств, установка может использоваться как автономный источник электроэнергии в труднодоступных и малонаселенных районах страны, где не потребуются сооружения линии электропередачи и подвоза топлива.

Авторы:

Д.т.н., проф. **О.И. Крахин**
 МАИ (ГТУ), Волоколамское ш., д.4
 125993 Москва
 Тел./факс (095) 158-45-03
 E-mail: koi@mai.ru

инженер В.А. Зенин

МАИ (ГТУ), Волоколамское ш., д.4
 125993 Москва
 Тел./факс (095) 158-45-03
 E-mail: koi@mai.ru