

Гречихин¹ Л.И., Куць² Н.Г.¹Минский государственный высший авиационный колледж²Луцкий национальный технический университет**МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА**

Разработана молекулярно-кинетическая теория работы двигателя Стирлинга. Произведены расчеты мощности в зависимости от температуры нагреваемой поверхности двигателя Стирлинга. Установлено, что отсос тепловой энергии от нагретого тела происходит только в момент выполнения внешней работы. Показано, в каком направлении следует совершенствовать двигатели Стирлинга повышая их эффективность работы.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, эффективность, работа, математическая модель.

Вступ. Постановка проблемы. 27 сентября 1816 г. шотландский священник Роберт Стирлинг запатентовал двигатель, в котором жидкое или газообразное рабочее тело движется в замкнутом объеме с внешним подогревом. В настоящее время двигатели Стирлинга с независимой камерой сгорания приобрели особую популярность.

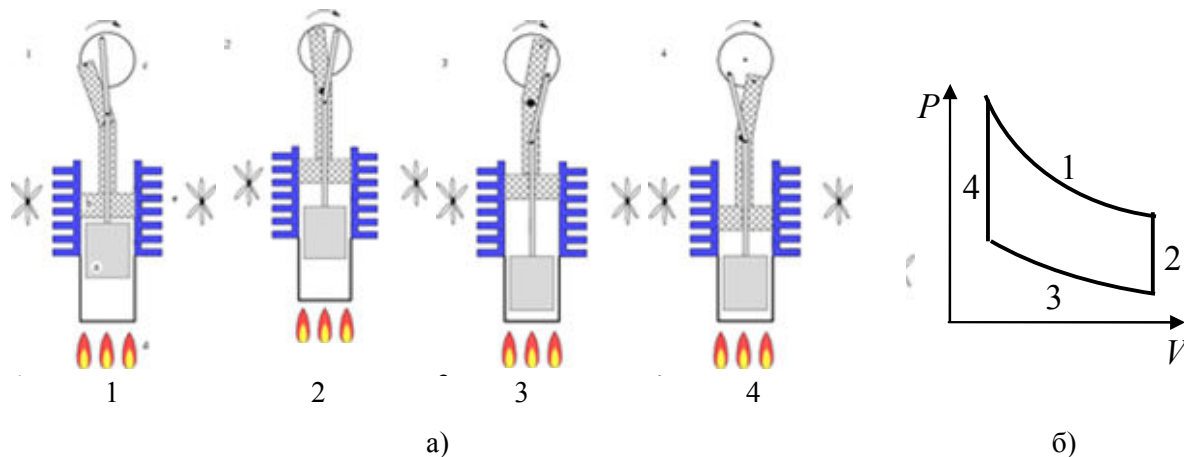


Рис. 1. Схематическое изображение реализации термодинамического цикла двигателя Стирлинга а) схема работы двигателя; б) PV-диаграмма замкнутого термодинамического цикла Стирлинга

В современном исполнении двигателя Стирлинга работают по следующей схеме (рис. 1а):

- 1 – изотермическое расширение с подводом тепла,
- 2 – изохорный отвод тепла от рабочего тела к регенератору,
- 3 – изотермическое сжатие рабочего тела с отводом тепла к холодильнику,
- 4 – изохорический нагрев рабочего тела с подводом тепла от регенератора.

Замкнутый термодинамический цикл Стирлинга изображен на PV-диаграмме рис. 1б. Двигатели Стирлинга конструктивно реализуются с применением и без применения регенератора. С регенератором двигатель Стирлинга обладает тремя конструктивными особенностями, которые показаны на рис. 2.

Принципиальное отличие двигателя Стирлинга от других типов тепловых двигателей заключается в следующем: 1 – работать может от любого источника тепла (сжигание жидкого и газового углеводородного топлива, сжигание водорода, нагрев от теплового насоса, нагрев от солнечного излучения и др.); 2 – рабочее тело не контактирует с окружающей средой, и поэтому может работать в любых условиях; 3 – с применением регенератора обеспечивает максимально возможный коэффициент преобразования подводимого тепла в механическую работу (33,3%); 4 – применение в качестве рабочего тела водорода или гелия обеспечивает минимальную теплоотдачу от рабочего тела к конструкции двигателя; 5 – позволяет непосредственно осуществлять преобразование тепловой энергии в механическую работу или электрическую энергию.

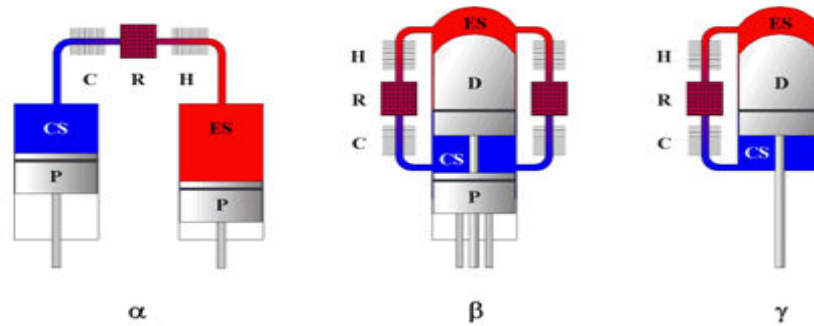


Рис. 2. Различные варианты реализации двигателя Стирлинга с регенератором

С позиций термодинамики понятен принцип работы двигателя Стирлинга и качественно обоснованы все преимущества такого двигателя. Если необходимо разработать оптимальную конструкцию в определенных условиях эксплуатации, то приходится подбирать такую конструкцию чисто экспериментально. Компьютерное моделирование проводить не возможно, так как идеальные замкнутые термодинамические циклы этого делать не позволяют. Для применения компьютерного моделирования необходимо иметь адекватную физико-математическую модель, которая бы полностью соответствовала реально реализуемому замкнутому термодинамическому циклу работающего теплового двигателя. В этом плане применим молекулярно-кинетическую теорию к работе двигателя Стирлинга

Цель работы. Разработать молекулярно-кинетическая теория работы двигателя Стирлинга для разработки оптимальной конструкции в определенных условиях эксплуатации.

Основная часть. Молекулярно-кинетическая теория двигателя Стирлинга. Чтобы применить молекулярно-кинетическую теорию для описания работы двигателя Стирлинга, следует создать правильную модель работы такого устройства. Для этого представим работу двигателя Стирлинга в модельном представлении, как это показано на рис. 3.

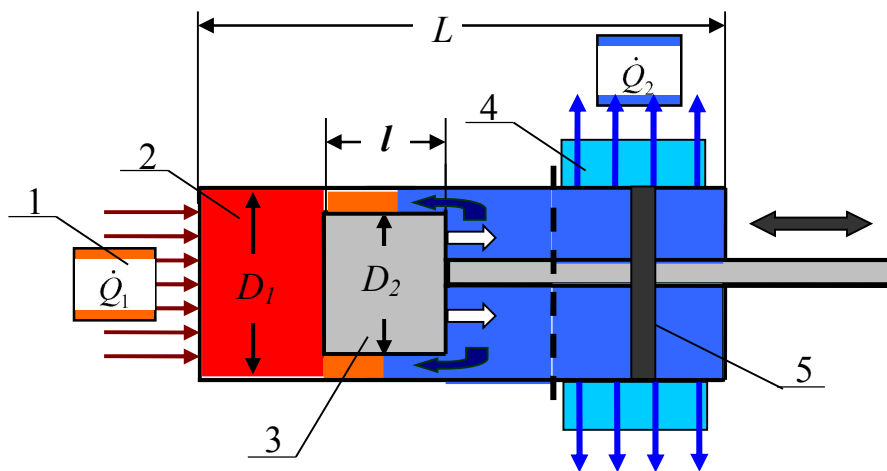


Рис. 3. Модель работы двигателя Стирлинга:

1 – источник тепла; 2 – зона нагретого воздуха; 3 – вытеснительный поршень;
4 – холодильник; 5 – рабочий поршень

Внутри рабочего цилиндра 2 совершает возвратно поступательное движение выталкивающий поршень 3. Между выталкивающим поршнем и стенками цилиндра имеется зазор, через который происходит перекачка рабочего тела из нагретой области в холодную и наоборот. Когда выталкивающий поршень начинает свое движения из области нагретого газа источником тепла 1 в область холодного газа, охлаждаемого холодильником 4, то он совершает механическую работу под действием противодавления

$$\Delta P = P_H - P_X = nk_B (T_H - T_X), \quad (1)$$

где $P_H = nk_B T_H$ и $P_X = nk_B T_X$ – соответственно давление газа в области его нагрева нагревателем и давление в области, где он охлаждается холодильником. Под действием такой разности давлений с учетом того, что концентрация газа не изменяется справа и слева относительно вытеснительного поршня, то будет совершаться работа следующей величины

$$A = \Delta P S \Delta L. \quad (2)$$

Здесь S – площадь вытеснительного поршня, ΔL – ход поршня.

Получается, что механическая работа, совершаемая двигателем Стирлинга, определяется габаритными размерами двигателя и создаваемой разностью температур между холодной и нагретой зонами внутри цилиндра двигателя. Тогда, обеспечив более интенсивное охлаждение газа холодильником, можно получить достаточно большой КПД такого двигателя. Охлаждение газа в контакте с твердым телом происходит вследствие конвективного теплообмена. Конвективный теплообмен между газом и твердым телом происходит вследствие упругого столкновения молекул газа с кластерами твердого тела. В этом случае интенсивное охлаждение реализуется для более тяжелого газа, когда коэффициент передачи энергии при упругом столкновении стремится к единице. Отсюда следует, что в двигателе Стирлинга для его более эффективной работы следовало бы использовать более тяжелые газы. Реально применяют самые легкие газы типа водорода или гелия, которые в принципе не могут интенсивно отдавать свое тепло корпусу двигателя и охлаждаться в контакте с холодильником. Получается какое-то противоречие.

Кроме этого зазор между вытеснительным поршнем и внутренней стенкой цилиндрического корпуса изготавливается достаточно малого размера. В то время как для обеспечения постоянства концентрации частиц рабочего газа между холодной и горячей областями этот зазор должен быть большим. Но при большом зазоре двигатель Стирлинга вообще не работает. Выходит, что процессы, сопровождающие работу двигателя Стирлинга, весьма и весьма сложные. Ниже рассмотрим эти процессы детальнее.

Предположим, что вытеснительный поршень 3 начинает движение с области, где расположен нагреватель. В процессе движения поршня область нагретого газа расширяется, и газ должен охлаждаться как за счет расширения вследствие возникновения политропического процесса изменения состояния газа, так и за счет совершения работы. При малом зазоре газ из холодной зоны в зону горячего газа поступает с запозданием вследствие возникновения вязкого течения. При вязком течении возникает пограничный слой, в котором скорость течения почти по экспоненте падает вдоль нормали к поверхности. Чем большая длина зазора, тем большее сопротивление испытывает газ в процессе движения вдоль такого зазора. Количество холодного газа, поступающего в горячую зону, резко уменьшается. Произведем расчет количества газа, поступающего в горячую зону.

Пусть по тонкому зазору движется газовый поток в условиях термодинамического равновесия. Принципиальная схема взаимодействия газового потока с внутренней и внешней поверхностью твердого тела показана на рис. 4.

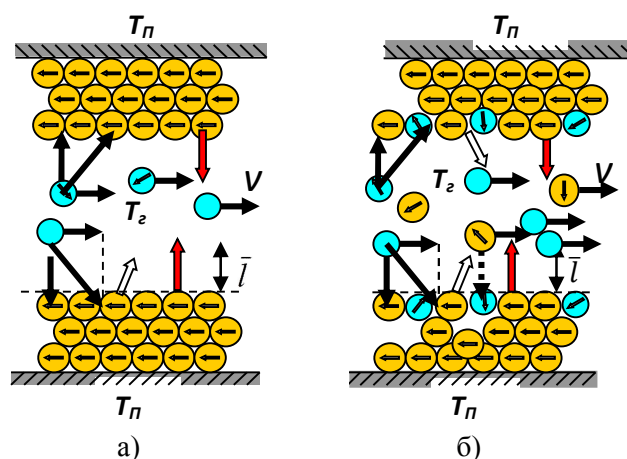


Рис. 4. Схема взаимодействия воздушного потока в зазоре между двумя поверхностями:
а) – при входе в зазор и б) – в момент выхода из зазора

Непосредственно с поверхностью твердого тела взаимодействуют молекулы, которые удалены от поверхности на длину свободного пробега. В такой модели происходит столкновение молекул рабочего газа с адсорбционным слоем, и происходит передача импульса стенке поршня. Каждая молекула внешнего адсорбционного слоя с внутренним слоем взаимодействует ковалентной и ионной связью. Энергетическая связь реализуется между молекулами рабочего газа внутри адсорбированного слоя и бинарное взаимодействие этих молекул на поверхности с кластерами твердого тела. Для расчета такого типа взаимодействий воспользуемся формулами (1.2) – (1.5) на примере твердого тела, состоящего из алюминия. Исходные данные для кластера алюминия и молекул водорода и гелия приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Исходные параметры, по которым производился расчет энергий бинарной связи

Частицы	Параметры								
	Θ_1 , эВ	Θ_2 , эВ	Θ_3 , эВ	r_1 , Å	r_2 , Å	r_3 , Å	Z^*_1	Z^*_2	Z^*_3
H ₂	15,43	34,1	-	0,824	0,587	-	0,882	1,388	-
He ₂	24,59	54,42	-	0,764	0,494	-	1,302	1,864	-
Al _{кл.}	1,107	2,125	2,540	4,290	3,587	3,083	0,318	0,529	0,541

Выполненный расчет энергий бинарной связи представлен в табл. 2.

Таблица 2.

Энергия различных типов бинарной связи

Тип связи	$E_{ков.}$, эВ	$E_{ион.}$, эВ	$E_{рез.}$, эВ	$E_{кл.}$, эВ
H ₂ – H ₂	1,274	0,361	1,635	0,065
He ₂ – He ₂	1,494	0,0579	1,552	0,024
H ₂ – Al _{кл.}	0,0713	0,0254	0,0966	-
He ₂ – Al _{кл.}	0,0715	0,0137	0,0852	-

Так как энергия бинарной связи сравнительно большая, то в адсорбированных слоях молекулы водорода и гелия должны пребывать в виде кластерных образований, которые формируют объемцентрированную структуру. Межкластерное взаимодействие при не очень высоких температурах полностью компенсируется температурной составляющей окружающей среды. Поэтому в газовой фазе гелий и водород пребывают в виде отдельных кластеров с количеством молекул, равном 7, а на твердом теле кластеры водорода и гелия формируют объемцентрированную структуру. Это свойство газового агрегатного состояния присуще всем веществам. Поэтому газы обладают мощными флуктуационными свойствами, вследствие непрерывного образования и распада кластерных структур, что и определяет интенсивное рассеяние света газами.

Так как адсорбированные молекулы рабочего газа на поверхности твердого тела образуют кластеры с объемцентрированной структурой, то результирующая энергия бинарной связи между кластерами внутри адсорбционного слоя составляет

$$E_{св.,0} = E_{ков.} + E_{ион.} \quad (3)$$

Если частица находится на поверхности твердого тела, то ее энергия связи ослаблена только на одну степень свободы. Это значит, что результирующая энергия связи при температуре поверхности T_{II} будет ослаблена на величину $0,5k_B T_{II}$. Тогда каждый кластер внешнего слоя находится в потенциальной яме с энергией

$$E_{св.} = E_{св.,0} - 0,5k_B T_{II} \quad (4)$$

Если поверхность корпуса двигателя и вытеснительного поршня находятся при нормальной температуре $T_{II} = 295$ К, то энергия связи для кластеров водорода $E_{св.} = 0,052$ эВ, а энергия связи кластеров молекул гелия $0,011$ эВ. При более высоких температурах, при которых работает двигатель Стирлинга, энергия связи кластеров с основой равна нулю. Поэтому на поверхности алюминия будут адсорбироваться молекулы водорода или гелия и образовывать плотноупакованную структуру. В двигателях Стирлинга в качестве рабочего газа целесообразно

использовать гелий, так как адсорбированный водород вступает в химическую реакцию с образованием гидратов, что обуславливает интенсивную коррозию конструкционных материалов.

Поток частиц на нагреваемую поверхность и на вытеснительный поршень со стороны рабочего газа равен

$$J_X = \frac{1}{4} \frac{P_{\infty}}{k_B T} \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_a}}, \quad (5)$$

где m_a – масса молекул гелия или водорода.

В нормальных условиях поток молекул гелия или водорода на поверхность корпуса двигателя равен $2,08 \cdot 10^{27}$ и $4,15 \cdot 10^{27}$ $1/\text{м}^2\text{с}$ соответственно. Такой поток на поверхность поршня в зазоре за время dt будет переносить импульс

$$dp_{(a,\kappa),\infty} = \kappa J_X m_a v S_{\Pi} dt, \quad (6)$$

где v – скорость движения потока газа в зазоре и $\kappa = \int_0^{E_{св.}} f(E, T) dE$ – коэффициент

аккомодации, который свидетельствует о том, что поверхность корпуса и выталкивающий поршень перенесенный импульс с такой вероятностью восприняли, и возникает торможение газового потока. Длина вытеснительного поршня должна быть меньше той, где возникает турбулентное течение. Поэтому толщину вытеснительного поршня подбирают экспериментально. Если такая длина l подобрана, то при наличии разности давлений на газ в зазоре действует объемная сила торможения

$$\frac{F_3}{V} = \frac{P_H - P_X}{l}.$$

Отсюда после несложных преобразований получаем силу действия движущегося потока рабочего газа в зазоре на вытеснительный поршень

$$F_3 = \pi (r_1^2 - r_2^2) n k_B (T_H - T_X), \quad (7)$$

а результирующая сила действия на вытеснительный поршень

$$F = \pi n k_B [r_1^2 T_H - (r_1^2 - r_2^2) T_X], \quad (8)$$

где n – концентрация частиц в поршне, T_H и T_X – температура газа перед вытеснительным поршнем и за поршнем, а r_1 и r_2 – соответственно внешний и внутренний радиусы зазора.

Если поршень совершает поступательное движение вдоль длины L , то совершается работа

$$A = \int_0^L F dL. \quad (9)$$

Важно также выяснить каким образом происходит теплопередача от нагретого твердого тела к окружающему газу.

Величина теплоотдачи от нагретой части корпуса двигателя определяется количеством тепла, которое сообщают нагретой поверхности твердого тела при хаотическом температурном движении газа, равного с учетом (5)

$$Q_T = \kappa J_X \frac{3}{2} k_B T_X, \quad (10)$$

а поток энергии с поверхности твердого тела вследствие термоэмиссии

$$Q_{\Pi} = J_T \frac{m_a v_{\Pi}}{2}, \quad (11)$$

где поток отдельных частиц при термоэмиссии равен [3]

$$J_T = \frac{\sqrt{8}}{3\sqrt{\pi} m_a} \frac{1}{\bar{d}^3} \frac{1}{(k_B T_H)^{3/2}} \int_{E_{св.}}^{\infty} \left(1 - \frac{E_{св.}}{E}\right)^{1/2} E \exp\left(-\frac{E}{k_B T_H}\right) dE \quad (12)$$

и

$$v_{\Pi} = \left(\frac{2 \int_{E_{св.}}^{\infty} E f(E, T) dE}{m_a} \right)^{1/2}, \text{ м/с} \quad (13)$$

средняя скорость термоэмиссии. Здесь \bar{d} - диаметр молекулы гелия или водорода и $f(E, T)$ - функция распределения Максвелла-Больцмана. Из закона сохранения массы следует, что $\kappa J_X = J_H$.

При термоэмиссии импульс в направлении движения не переносится, а происходит обмен энергиями от корпуса в окружающую среду. Поток тепла с нагретой пластины в окружающую среду составит

$$\dot{Q}_T = Q_{\Pi} - Q_{\Gamma}. \quad (14)$$

Разогрев газа окружающей среды не будет происходить при $\dot{Q}_T = 0$. Из этого условия следует, что время установления термодинамического равновесия нагретой пластины с окружающим газом у самой поверхности нагретой пластины

$$t = \frac{6k_B(T_H - T_X)}{\pi \bar{d}^2 \dot{Q}_T} \quad (15)$$

Здесь \dot{Q}_T соответствует начальной разности температур $(T_H - T_X)$.

Так как с увеличением температуры поток термоэмиссии возрастает значительно, то для выполнения условия $\dot{Q}_T = 0$ должно происходить оголение поверхности от адсорбированных частиц и тогда испарение с этих участков будет отсутствовать. В результате разогрев окружающего газа будет ослаблен на величину оголения разогретой поверхности. Доля разогретой поверхности, которая не будет участвовать в нагреве окружающего газа

$$\delta = \frac{3P v_T T_{\Pi}}{4J_H m_a v_{\Pi}^2 T_{\Gamma}}. \quad (16)$$

Максимальная температура, до которой целесообразно разогревать топку в двигателе Стирлинга составит

$$T_{\max} = \frac{2E_{св.}}{3k_B}. \quad (17)$$

Для алюминиевого корпуса и гелия в качестве рабочего тела $T_{\max} \approx 659$ К. Получается, что двигатель Стирлинга работает только при сравнительно низких температурах. Поэтому вытеснительный поршень в двигателе Стирлинга обычно изготавливают из дерева. Это принципиально, так как на деревянной основе энергия адгезии молекул окружающего газа стремится к нулю и возникающий обратный термоэмиссионный поток с поверхности вытеснительного поршня, не ослабляет поток частиц рабочего тела на вытеснительный поршень, который определяет величину преобразования тепловой энергии в механическую работу.

Во время движения вытеснительного поршня от в.м.т. до н.м.т. газ разогревается термоэмиссионным потоком только у нагретой поверхности топки двигателя толщиной не более трех длин свободного пробега. Разогрев остальной области происходит теплопереносом по газовой среде и определяется такой поток по формуле

$$\dot{Q}_{\Pi} = -K \frac{\Delta T}{\Delta L}, \quad (18)$$

где $K = \frac{1}{3} \rho C_V \bar{c} \lambda$ - коэффициент теплопроводности. Здесь ρ - плотность воздуха, C_V - удельная теплоемкость, $\bar{c} = \sqrt{\frac{\gamma k_B T_T}{m_a}}$ - скорость звука в газе и $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n}$ - длина свободного пробега.

В каждый момент времени t газ непосредственно под поршнем приобретает температуру

$$T(t) = \left[T_{\Pi} + \frac{2\dot{Q}_{\Pi}}{3k_B n \Delta V} \right] \left(\frac{L(t)}{L(t) + \Delta V} \right)^{\gamma-1}, \quad (19)$$

где $L(t)$ - положение вытеснительного поршня в момент времени t и ΔV - приращение объема за время Δt .

В процессе движения поршня от в.м.т. до н.м.т. градиент температуры отличен от нуля и поэтому происходит разогрев газа за счет теплопроводности с отсосом теплоты от нагретой поверхности. Работа, которая при этом совершается равна

$$A_{\Pi} = \int_0^{1/2f} n k_B T(t) v(t) \pi (D/2)^2 dt, \quad (20)$$

а $v(t) = \pi L f \sin(2\pi ft)$ и D - диаметр поршня.

Когда поршень движется в обратном направлении градиент температуры равен нулю и отсоса теплоты от нагретой поверхности не происходит. Работа при этом затрачивается на перекачку газа из нагретой зоны в холодную, которой можно пренебречь.

Выполним конкретный расчет для следующих исходных данных, представленных таблицей 3:

Таблица 3.

Исходные данные

№№ пп	Наименование	Значение
1	Рабочий газ	гелий
2	Начальное давление рабочего газа, Атм	1
3	Диаметр вытеснительного поршня, см	11
4	Диаметр рабочего цилиндра, см	11,2
5	Ход вытеснительного поршня, см	12,5
6	Температура холодного газа, К	295
7	Частота вращения, Гц	10
8	Коэффициент сжатия	15
9	Температура топки, К	переменная

Мощность такого двигателя Стирлинга в зависимости от температуры топки приведена на рис. 5. Мощность двигателя Стирлинга, как это следует из общего определения такого двигателя, линейно зависит от температуры, реализуемой в топке. Так как развиваемые температуры в топке двигателя Стирлинга не достаточно высокие, то и мощность также не достаточно большая. Коэффициент полезного действия поршневого двигателя, каким является двигатель Стирлинга, определяется следующим образом

$$\eta = \frac{A_{II}}{A_{II} + Q_1 + Q_2}, \quad (21)$$

где $Q_1 = \frac{3}{2}\pi(D/2)^2 nL[1 + 1/(\varepsilon - 1)]k_B(T_{II} - T_{Г})$ - тепло, которое пошло на разогрев рабочего газа и $Q_2 = 3\pi DLk_B(T_{II} - T_{Г})/\bar{d}^2$ - тепло, которое пошло на разогрев корпуса двигателя, т.е., на разогрев адсорбционного плотноупакованного слоя молекул гелия. Если учесть потери тепловой энергии, получаемой в топке двигателя, то эффективный КПД резко уменьшится.

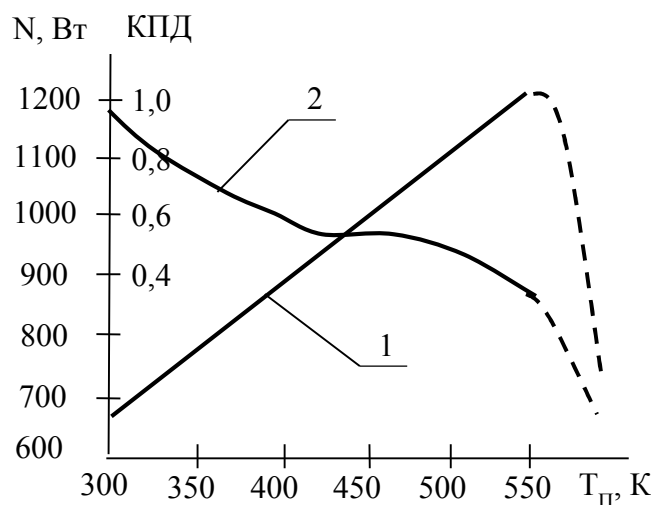


Рис. 5. Зависимость мощности (1) и КПД (2) от температуры топки двигателя Стирлинга

КПД тепла, полученного от нагретой поверхности рабочим газом внутри двигателя, в процессе его преобразования в механическую работу на основании (2.30) в зависимости от температуры нагретой поверхности представлен на рис. 5. Получается, что чем меньше разность температур между нагретой поверхностью и рабочим газом за вытеснительным поршнем, тем выше КПД преобразования тепла в механическую работу, т.е., эффективность работы двигателя Стирлинга достаточно высокая реализуется при сравнительно малой разности температур между нагретой поверхностью и рабочим газом за вытеснительным поршнем.

Применение второго рабочего поршня и регенерации тепла при сравнительно высоких температурах нагреваемой поверхности можно существенно поднять КПД двигателя. При этом следует обеспечить более интенсивный теплоотвод от нагретой поверхности двигателя путем понижения температуры за вытеснительным поршнем. Эту возможность реализуют принудительным охлаждением рабочего газа холодильником.

Эффективный КПД двигателя Стирлинга определяется преимущественно потерями внутри топки. Если эти потери уменьшить, то возможно всю выделившуюся энергию в топке превратить в работу, что практически почти реализовано в двигателях Стирлинга α -, β - и γ .

Вместо маховика, применяемого в двигателе Стирлинга, можно использовать второй рабочий цилиндр. Мощность при этом возрастет в два раза. Если диаметр поршня увеличить в два раза, а ход поршня в 1,5 раза и температуру нагретой поверхности довести до 250°C , то мощность может составить ~ 15 кВт. Такая мощность представляет коммерческий интерес.

Выводы. Разработанная молекулярно-кинетическая теория описания работы двигателя Стирлинга позволяет осуществить компьютерное моделирование для получения оптимальных условий работы такого двигателя в заданных условиях его применения.

1. Лапцевич А.А., Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Энергетическая база беспилотных летательных аппаратов. /Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011, № 3. С. 64-78.
2. Куць Н.Г. Ефективність роботи дизеля при впливі стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності / Наукові нотатки, 2011. Вип. 34. С. 154-162.
3. Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Молекулярно-кинетическая теория работы двигателя внутреннего сгорания с внешним поджогом. / Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. 2011. Вып. 41. С. 92-103.
4. Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Водяное охлаждение двигателя внутреннего сгорания. / Нукові нотатки. 2011. Вип. 32. С. 109-117.
5. Гречихин Л.И., Куць Н.Г. Аллотропия в металлах и ее влияние на работу теплового двигателя. / Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. 2011. Вып. 42. С. 83-89.

REFERENCES

1. Laptsevich, A.A., Grechikhin, L.I. & Kuts', N.G. (2011). Energeticheskaya baza bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Energy base of unmanned aerial vehicles]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG*. Vol. 3, pp. 64-78.
2. Kuts, N.H. (2011). Efektyvnist roboty dyzelia pry vplyvi statsionarnoi ta nestatsionarnoi teploprovidnosti [The efficiency of diesel under the influence of stationary and non-stationary heat conduction]. *Naukovi notatky*. Vol. 34, pp. 154-162.
3. Grechikhin, L.I. & Kuts', N.G. (2011). Molekulyarno-kineticheskaya teoriya raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya s vneshnim podzhogom [Molecular-kinetic theory of the internal combustion engine with an external arson]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya. Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov*. Vol. 41, pp. 92-103.
4. Grechikhin, L.I. Kuts', N.G. (2011). Vodyanoe okhlazhdenie dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Water cooling of the internal combustion engine]. *Naukovi notatki*. Vol. 32, pp. 109-117.
5. Grechikhin, L.I. & Kuts', N.G. (2011). Allotropiya v metallakh i ee vliyanie na rabotu teplovogo dvigatelya [Allotropy in metals and its impact on the operation of the heat engine]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya. Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov*. Vol. 42, pp. 83-89.

АВТОРЫ:

ГРЕЧИХИН Леонид Иванович, доктор физико-математических наук, Минский государственный высший авиационный колледж, г. Минск, Беларусь.

КУЦЬ Надежда Григорьевна, кандидат технических наук, Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина.

AUTHORS:

Leonid GRECHIKHIN, D.Sc., Professor, Minsk State Higher Aviation College, Minsk, Belarus;

Nadezhda KUTS', Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University; e-mail: kuts_n@mail.ru

РЕЦЕНЗЕНТ:

МАТЕЙЧИК В.П., д.т.н., профессор, декан автомеханического факультета, Национальный транспортный университет, Киев, Украина.

РЕЦЕНЗЕНТ:

МАТЕЙЧИК В.П., д.т.н., професор, декан автомеханічного факультету, Національний транспортний університет, Київ, Україна.

REVIEWER:

V. MATEICHUK, Doctor of Science in Technology, Professor, Dean of Automobile Mechanic Faculty, National Transport University, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла в редакцію 06.09.2014р.