

ВЛИЯНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ

Куць Н.Г., Гречихин Л.И. (Луцкий национальный технический университет, г.Луцк, Украина; Минский государственный высший авиационный колледж, г.Минск, Беларусь)
Тел. – +38 (0332) 746145; Kuts_n@mail.ru

Анотация. На атомно-молекулярном уровне определена структура сложных молекул, которые обеспечивают процесс теплопередачи. Установлена структура твердого тела и адгезионного слоя на наноуровне при движении жидкости или газа как теплоносителя. Разработан механизм передачи тепловой энергии от твердого тела к жидкостному или газовому теплоносителю и наоборот. Выяснены условия оптимального использования водяного и газообразного теплоносителя для обеспечения эффективного теплообмена

Ключевые слова. Адгезия, десорбция, процессы теплообмена, тепловой двигатель, атомно-молекулярный уровень, нанокластерная структура

Введение. При работе тепловых двигателей происходит передача энергии твердому телу от нагретого газа внутри камеры сгорания (КС) и охлаждение твердого тела при его разогреве. В первом случае возникает конвективный и лучистый теплообмен, а во втором случае теплообмен с окружающей средой реализовать сложнее. Возникают проблемы, обусловленные адсорбцией и десорбцией частиц окружающей среды с поверхностью твердого тела, в результате происходит передача энергии от нагретого твердого тела к окружающему газу или к жидкости с обеспечением эффективного охлаждения. Возникают явления, на границе перехода двух агрегатных состояний. Что представляет эта граница и какое влияние оказывают явления адгезии и десорбции на процессы теплообмена между твердым телом, газом и жидкостью остается не ясным.

Цель: создать модели различных процессов теплопередачи на границе двух агрегатных состояний с учетом последних достижений в той области на наноуровне.

Задачи:- на атомно-молекулярном уровне определить структуру сложных молекул, которые обеспечивают процесс теплопередачи; - определить нанокластерную структуру твердого тела и адгезионного слоя в процессе взаимодействия с окружающей средой при наличии градиента температуры; - разработать механизм передачи тепловой энергии от твердого тела к жидкому или газовому теплоносителю; - выяснить условия оптимального использования жидкостного или газообразного теплоносителя для обеспечения эффективного теплообмена.

Основное содержание. Рассмотрим сформулированные задачи применительно к работающему дизелю. При рассмотрении теплообмена между твердым телом и жидкостью или газом рассматривают два случая: 1) когда теплоноситель обладает температурой выше температуры поверхности твердого тела и 2) когда теплоноситель обладает температурой меньше температуры поверхности твердого тела. При анализе процесса теплопередачи необходимо выяснить, как происходит адсорбция и десорбция частиц окружающей среды на поверхности твердого тела.

1. Адсорбция частиц окружающей среды на поверхность твердого тела. Эффективность адсорбции частиц окружающей среды на поверхности твердого тела определяется энергией связи этих частиц с кластерной структурой твердого тела.

Каждая ячейка адсорбции формируется числом частиц, которое определяется кристаллической структурой кластерных частиц или межкластерной структурой твердого тела. При этом рассматривается бинарное взаимодействие с каждой отдельной частицей той структуры, которая представляет собой ячейку адсорбции. Потенциал бинарного взаимодействия для ковалентной связи представляется в виде [1]

$$E_{св.рез} = \begin{cases} -\frac{2E_{св}R_0^6}{r^6} + \frac{E_{св}R_0^{12}}{r^{12}}, & \text{при } r \leq R_0; \\ \sum_{i=1}^3 N_i \kappa_i^2 \left[\sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 Z_{a,k}^* Z_{b,l}^* \int_{(a)} \int_{(b)} \rho_{e,a}(\varepsilon_k) \rho_{e,l}(\varepsilon_l) \left(\frac{H_{1,1} + H_{1,2}}{1+S} \right) d\varepsilon_k d\varepsilon_l \right] & \text{при } r > R_0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R_0 – равновесное расстояние между взаимодействующими частицами; $E_{св}$ – результирующая энергия связи на равновесном расстоянии; N_i – число частиц в i -й координационной сфере; κ_i – коэффициент видности; $Z_{a,k}^*, Z_{b,l}^*$ – эффективные заряды взаимодействующих частиц; $\rho_{e,a}(\varepsilon_k), \rho_{e,b}(\varepsilon_l)$ – распределение электронной плотности вокруг силовых центров взаимодействующих частиц в k -ом и l -ом энергосостояниях; $H_{1,1}, H_{1,2}$ и S – соответственно квантово-механические интегралы: кулоновский, обменный и перекрытия. Энергию ионной связи для одинаковых частиц определяют:

$$E_{ион} = \Theta S \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_{a,b}}, \quad (2a)$$

где $\Theta = 2P_1 = 0,25 + 0,25 = 0,5$.

Для различных частиц энергия ионной связи выражается более сложно, именно [2]

$$E_{ион.,1} = \frac{P_1(1-P_2)S(1-S)e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_{a,b}}; \quad (26)$$

$$E_{ион.,2} = \frac{P_2(1-P_1)S(1-S)e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_{a,b}}.$$

Учтено, что если валентный электрон первой частицы перешел ко второй частице, то валентный электрон второй частицы не переходит к первой с совместной вероятностью $(1 - P_2)(1 - S)$. Аналогично происходит с переходом валентного электрона второй частицы к первой [вторая формула в (26)]. Рассматривая взаимодействие одинаковых частиц, которые образуют двухатомную молекулу, то энергия связи точечного заряда с диполем определяется [1]

$$E_{e-d} = j(1-S) \frac{ep_\partial}{4\pi\varepsilon_0 r_e^2}, \quad (3)$$

где r_e – равновесное расстояние между центрами атомов в двухатомной молекуле. Появление члена $(1 - S)$ в (3) обусловлено тем, что взаимодействие точечный заряд-диполь не реализуется при нахождении обоих валентных электронов вблизи одного из атомов. В этом случае возникает ионная связь и полностью исключается взаимодействие точечный заряд-диполь. Если оба взаимодействующих атома обладают дипольным электрическим моментом, то $j = 2$, а если один из них, то $j = 1$. В общем случае диполь-дипольное взаимодействие следует определять следующим образом:

$$E_{дип-дип} = \frac{p_{\partial,1} p_{\partial,2} \varphi(\alpha_i, N_i)}{4\pi\varepsilon_0 R_i^3}. \quad (4)$$

Здесь R_i – расстояние между взаимодействующими частицами, которое определяется

структурой кристалла или из плотности вещества; $\varphi(\alpha_i, N_i)$ - функциональная связь от взаимного расположения электрических диполей в структуре конденсированной среды; $p_{э,1}$ и $p_{э,2}$ – электрические моменты взаимодействующих диполей. Для простой кубической структуры энергия связи частиц определяется по формуле [1]

$$E_{\text{дун}} = \frac{8p_{э}^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \left(-1 + \frac{0,5776}{2^{3/2}} - \frac{0,669}{3^{3/2}} \right). \quad (5)$$

С учетом строения кристалла и взаимного расположения диполей друг относительно друга в объемцентрированной кубической структуре получаем выражение для определения диполь-дипольного взаимодействия внутри кристалла [2]:

$$E_{\text{дун}} = \frac{8p_{э}^2}{4\pi\epsilon_0 R^3}. \quad (6)$$

Таким образом, сложное по своей конфигурации электрическое поле, формируемое диполями в кристаллических структурах, приводит к тому, что следует учитывать взаимное расположение диполей друг относительно друга, которое определяется строением кристалла. Диполь-дипольное взаимодействие ослабляется крутильными колебаниями электрических диполей в плоскостях XZ и YZ . Это две степени свободы, поэтому $E_{\text{дун,рез}}(1) = E_{\text{дун}} + k_B T$. При взаимодействии со вторым и третьим координационными слоями добавляются еще две степени свободы, обусловленные колебаниями частиц вещества в плоскости, перпендикулярной радиусу, соединяющего взаимодействующие частицы,

$$E_{\text{дун,рез}}(2,3) = E_{\text{дун}} + 2k_B T. \quad (7)$$

Корпус теплового двигателя изготовлен из жаропрочной стали, основой которой является кластерная решеточная структура железа. Некоторые детали теплового двигателя изготовлены из твердых сплавов алюминия, основу которых составляет кластерная решеточная структура алюминия. С такой кластерной структурой взаимодействуют молекулы воздуха, а это 21% молекул кислорода и 79% --азота.

2. Основные энергетические параметры молекул кислорода и азота. В валентной области молекул кислорода и азота пребывают два электрона. Для первого внешнего электрона энергия связи является энергией ионизации. Для молекулы кислорода это $\theta_i = 12,071$ эВ, а для молекулы азота - 15,581 эВ [3-4] с эффективным радиусом вращения соответственно 0,957 и 1,04 Å [3]. Вторую кратность ионизации можно определить, используя метод, предложенный Слэтером [5]. В соответствии с этим методом среднее удаление электрона в поле центральных сил представляется::

$$\bar{r} = \frac{(2n^* + 1)n^*}{2(Z - \gamma)} a_0. \quad (8)$$

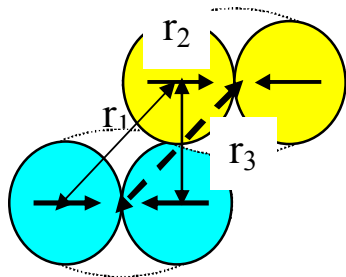
Здесь $n^* = \sqrt{E_H / \theta_i}$ - эффективное главное квантовое число, a_0 – радиус первой орбиты Бора и $(Z - \gamma)$ – эффективный заряд.

При определении радиуса вращения второго валентного электрона следует эффективный заряд увеличивать на 0,35. Тогда радиус электрона второй кратности ионизации для молекулы кислорода будет 0,693 Å, а для молекулы азота – 0,700 Å. Отсюда вторая кратность ионизации для кислорода составляет 37,5 эВ, а для азота – 42,28 эВ. Отдельные атомы кислорода и азота содержат встроенные электрические моменты, которые в двухатомных молекулах пребывают в виде положительных ионов. Для иона азота встроенный электрический момент равен $1,19 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а для иона кислорода $3,202 \cdot 10^{-30}$ Кл·м [2]. Эти встроенные дипольные электрические моменты в

двухатомных молекулах под действием ковалентной связи взаимно компенсируются, образуя неустойчивое равновесие. Наличие встроенных электрических моментов в двухатомных молекулах следует учитывать при различных взаимодействиях таких молекул с другими частицами. Для молекул воздуха N_2 и O_2 были выполнены соответствующие расчеты и получены значения потенциалов ионизации, размеров орбит вращения валентных электронов и эффективных зарядов. Эти данные приведены в табл. 1. Эффективные радиусы этих молекул $r_{N_2} = 0,985 \text{ \AA}$ $r_{O_2} = 0,962 \text{ \AA}$

Таблица 1. Значения потенциалов ионизации, размеров орбит вращения, эффективных зарядов и межъядерного расстояния молекул азота и кислорода

Молекула	Основные параметры						
	$\Theta_{i,1}, \text{эВ}$	$\Theta_{i,2}, \text{эВ}$	$r_1, \text{ \AA}$	$r_2, \text{ \AA}$	Z_1^*	Z_2^*	$r_e, \text{ \AA}$
N_2	15,58	41,19	1,020	0,736	1,103	2,103	1,098
O_2	12,08	37,02	0,952	0,700	0,797	1,797	1,207



Молекулы кислорода и азота взаимодействуют между собой и друг с другом. Максимальная энергия бинарного взаимодействия реализуется, когда расположение этих молекул друг относительно друга будет такое, которое приведено на рис. 1. При таком расположении двухатомных молекул результирующая энергия связи

$$E_{св.} = E_{ков.} + E_{ион.} + E_{e-\partial} + E_{\partial-\partial}. \quad (9)$$

Рис. 1. Расположение двухатомных молекул при их взаимодействии

Конкретный расчет всех видов взаимодействий, выполненный по (1)-(8) с учетом эффективных радиусов молекул, приведен в табл. 2.

Таблица 2. Энергия связи и ковалентные радиусы взаимодействующих молекул

Молекулы	Радиусы атомов, \AA		Энергия связи, эВ				Результирующая, эВ
	$r_{ков.,1}$	$r_{ков.,2}$	Ков.	Ион.	$e-\partial$	$\partial-\partial$	
$N_2 - N_2$	0,71	0,71	0,762	0,458	-	0,0067	1,227
$O_2 - O_2$	0,66	0,66	0,799	0,468	-	0,039	1,306
$N_2 - O_2$	0,71	0,66	1,092	0,423	-	0,037	1,552

Так как энергия связи между двухатомными молекулами в воздухе достаточно большая, то, выходит, что в воздухе как азот, так и кислород должны пребывать в виде кластерных образований, состоящих из 13 молекул (рис.2). Такие кластеры в воздухе должны формироваться преимущественно в зоне тени, т.е. ночью, а днем под действием солнечного света они распадаются на молекулы, вследствие поглощения оптического излучения начиная с ближнего инфракрасного диапазона. Поэтому в шахтах и в пещерах воздух должен быть совершенно другой. Он достаточно насыщен кластерами двухатомных молекул. Ситуация интересная и достаточно сложная. При поступлении воздуха в камеру сгорания двигателя начинают образовываться кластеры двухатомных молекул. Концентрация частиц резко падает, что приводит к изменению давления в замкнутом объеме. На основании данных табл. 1 и 2, возможно произвести расчет энергий физической адгезии молекул азота и кислорода на поверхности

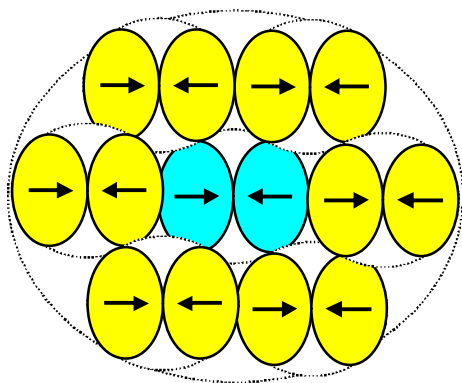


Рис. 2. Структура кластера из двухатомных молекул в горизонтальной плоскости

металлов. Но для этого надо знать строение кластерной решеточной структуры металла.

3. Кластерная решеточная структура алюминия и железа. Кластеры железа обладают объемноцентрированной структурой, а кластеры алюминия – гранецентрированной структурой [4]. Структура кластеров алюминия изображена на рис. 3а, а для железа на рис. 3б. Энергия бинарной связи атомов в основном кластере железа и алюминия обладают соответственно 1,437 и 1,708 эВ. Дипольный электрический момент ионов остова кластеров алюминия и железа определен по методике, изложенной в [2] и равен: $3,342 \cdot 10^{-30}$ и

$6,996 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Из структуры кластеров следует, что результирующий дипольный электрический момент кластерных образований для алюминия составляет $13,42 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а для железа – $46,6 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

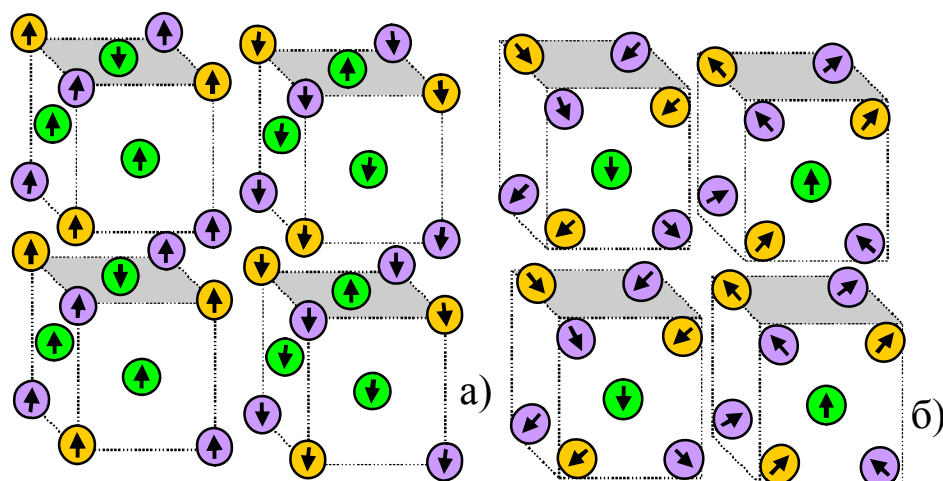


Рис. 3. Решеточная структура кластеров: а) гранецентрированная для алюминия и б) – объемноцентрированная для железа

Размеры кластеров составляют более одного нанометра. Поэтому ковалентной и ионной связями можно пренебречь. Тогда межкластерная связь формируется только электрон-дипольным и диполь-дипольным взаимодействием. Электрон-дипольное взаимодействие взаимно компенсируется, а энергия диполь-дипольного взаимодействия максимально возможная для гранецентрированной структуры алюминия составляет

$$E_{св.,кл,1} = \frac{p^2 \epsilon}{4\pi \epsilon_0 (2r_a)^3} (11,983 - 6,211 + 15,204 - 3,643 + 1,254) = 0,0804 \text{ эВ}, \quad (10)$$

а для объемноцентрированной структуры железа –

$$E_{св.,кл,2} = \frac{4p^2 \epsilon}{4\pi \epsilon_0 (2r_a)^3} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{16} \right) = 0,158 \text{ эВ}. \quad (11)$$

Температура, при которой будет эффективно разрушаться такая связь для алюминия – это 932,4 К, а для железа - 1833 К. При таких температурах межкластерная связь полностью разрушается и не возникает нитевидных формирований, как у

некоторых керамиках. В работе [1] было показано, что при температуре плавления в межкластерных объемах многих металлов формируются двухатомные молекулы. Это приводит к резкому уменьшению обменной энергии связи и общему уменьшению энергии связи межкластерного взаимодействия скачкообразно. При этом возникает превращение твердого тела в жидкое состояние, т.е. происходит плавление. Чтобы такое явление имело место максимальная энергия диполь-дипольного взаимодействия между кластерами не должна превышать энергию теплового движения. Экспериментальные данные по температуре плавления для алюминия – 933 К и для железа – 1812 К. Совпадение с экспериментальными данными вполне убедительное и поэтому при температуре плавления в металлах должен происходить полный разрыв связи между кластерами. Получается, что плавление металлов возникает не только когда в межкластерных объемах формируются двухатомные молекулы данного металла на основании [1], но и при этом максимальная энергия диполь-дипольного взаимодействия между кластерами и их энергия связи должна быть примерно равна энергии теплового движения. На основании полученных результатов произведем расчет энергии связи физической адгезии молекул азота и кислорода на кластерах железа и алюминия.

4. Физическая адгезия молекул азота и кислорода на кластерной решеточной структуре алюминия и железа. Кластеры металлов располагаются на поверхности так, чтобы энергия связи латерального взаимодействия была максимальной. Физическая адгезия других частиц реализуется в ячейках адгезии, которые формируются в межкластерном пространстве, как это показано на рис. 4 для гранецентрированной и объемцентрированной структур. Очевидно, что при таком расположении адсорбированных частиц в виде двухатомных молекул энергия физической адгезии будет максимальной.

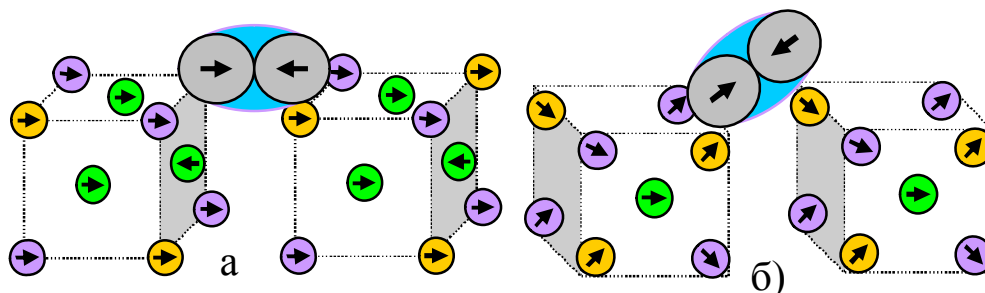


Рис. 4. Расположение двухатомных молекул на поверхности металла: а) – для алюминия и б) – для железа

Для гранецентрированной структуры энергия адсорбции:

$$E_{адс.} = \frac{2p_{э,1}p_{э,2}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{(a+b)^3} - \frac{\cos^2\left(\arctg \frac{\sqrt{(a+b)^2 - a^2}}{a}\right)}{(a+b)^3} - \frac{2\cos^2\left(\arctg \frac{a+b}{\sqrt{5}a}\right)}{\left(\sqrt{(a+b)^2 + 5a^2}\right)^3} + \frac{\cos^2\left(\arctg \frac{a+b}{2a-r_e}\right)}{\left(\sqrt{(a+b)^2 + (2a-r_e)^2}\right)} + \frac{2\cos^2\left(\arctg \frac{a+b}{\sqrt{(4a-r_e)^2}}\right)}{\sqrt{r'^2 + (a+b)^2}} \right\}; \quad (12)$$

Аналогично для объемоцентрированной структуры имеем

$$E_{адс.} = \frac{2p_{э,1}p_{э,2}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{\cos 45^0}{(a+b)^3} - \frac{\cos 45^0}{(a+b+r_e)^3} + \frac{\cos\left(\arctg \frac{1}{\sqrt{2}}\right)}{(\sqrt{(2a+b)^2 + a^2})} - \frac{\cos\left(\arctg \frac{1}{\sqrt{2}}\right)}{(\sqrt{(2a+b+r_e)^2 + a^2})} \right\}. \quad (13)$$

Здесь a и b – радиусы взаимодействующих атомов, r_e – межъядерное расстояние в двухатомной молекуле, $r' = \sqrt{(4a+r_e)^2 + a^2}$ и $p_{э,1}$, $p_{э,2}$ – соответственно дипольные электрические моменты взаимодействующих ионов.

Таблица 3. Энергия физической адгезии молекул азота и кислорода на различных поверхностях твердого тела

Молекулы	ГЦК структура Al	ОЦК структура Fe	Структура углерода		
			Молекула C ₂	Графит	Алмаз
N ₂	0,149	0,090	0,719	0,242	0,139
O ₂	0,422	0,271	2,108	0,690	0,393

Выполненный расчет энергий физической адгезии при расположении молекул на кластерных структурах различных твердых тел по (12) и (13) приведен в табл. 3. Получается, что в процессе столкновения молекул воздуха с нанокластерными структурами различных конструкционных материалов при температуре поверхности менее 1000 К будут адсорбироваться молекулы азота и кислорода, а при температуре поверхности более 1000 К – преимущественно молекулы кислорода. Зная энергию адсорбции молекул азота и кислорода на поверхности твердого тела, рассмотрим процесс переноса энергии нагретым газом к твердому телу и, наоборот, от нагретого твердого тела к холодному газу. В первом случае процесс теплообмена приводит к разогреву твердого тела, а во втором – наоборот теплопередача приводит к охлаждению.

5. Процесс теплопередачи от нагретого газа к твердому телу. Процесс теплопередачи от нагретого газа к твердому телу в двигателе внутреннего сгорания возникает внутри камеры сгорания. Так как внутренняя поверхность камеры сгорания выполнена из жаропрочных сталей (основа железо), а температура всегда больше 1000 К [7], то адсорбция частиц окружающего нагретого газа реализуется налипанием только молекул кислорода при их бомбардировке внутренней поверхности камеры сгорания вследствие хаотического температурного движения молекул воздуха. Поток

молекул кислорода с их адсорбцией на внутреннюю поверхность камеры сгорания составит

$$\dot{N}_{O_2} = \frac{1}{4} W_{O_2} n_0 \bar{v} \chi_{O_2}. \quad (14)$$

Здесь $W_{O_2} = 0,21$ - вероятность того, что падающая частица является молекулой кислорода; $n_0 = P/k_B T$ - общая концентрация частиц в газе; $\bar{v} = \sqrt{8k_B T / \pi m_a}$ - среднехаотическая скорость движения молекул газа внутри камеры сгорания; $\chi_{O_2} = 1 - \exp(-E_{св.,1}/k_B T)$ - коэффициент аккомодации, т.е. коэффициент физической адсорбции молекул кислорода на внутренней поверхности КС. Коэффициент $1/4$ обусловлен тем, что в заданном направлении нормально к поверхности движется только $1/6$ часть молекул газа, а с учетом столкновений под разными углами этот коэффициент возрастает до $1/4$.

Если выражение (14) умножить на время между двумя последовательными столкновениями $\tau_1 = \lambda_a / \bar{v}$ ($\lambda_a = 1/\sqrt{2} \cdot 0,21 n_0 \pi \bar{d}^2$ - длина свободного пробега при столкновении молекул кислорода друг с другом и \bar{d} - средний диаметр частиц внутри газа), то получим общее число адсорбированных молекул кислорода на единицу площади внутренней поверхности камеры сгорания. Общее число мест адсорбции в соответствии с рис. 4 находится по значению размера кристаллической решетки материала КС, т.е. $\delta_m = (1/2a)^2$. Тогда вероятность того, что данное место адсорбции занято молекулой кислорода определится так

$$\phi_1 = \frac{\dot{N}_{O_2} \tau_1}{\delta_m}. \quad (15)$$

Для четырехцилиндрового четырехтактного двигателя поток энергии от нагретого газа на внутренние стенки камеры сгорания составит

$$\dot{Q} = \frac{1}{4} \left(\frac{P}{k_B T} \right) \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m_a}} [0,21 \cdot (1 - \phi_1) E_{св.} + \phi_1 k_B (T - T_0) + \theta (1 - \phi_1) k_B T]. \quad (16)$$

В квадратных скобках первый член соответствует передаче энергии при адсорбции молекул кислорода на свободное место; второй член - передаче энергии при столкновении всех частиц нагретого газа с адсорбированной молекулой кислорода и третий член - передаче энергии при упругом столкновении всех частиц нагретого газа с кластером материала, из которого изготовлена камера сгорания. В свою очередь T - температура газа в КС, T_0 - температура стенки КС и $\theta = 4m_a M_{кл.} / (m_a + M_{кл.})$ - коэффициент передачи энергии при упругом столкновении молекул воздуха с кластером материала КС. За время рабочего цикла на внутреннюю поверхность камеры сгорания будет перенесена энергия

$$J_{адс.} = \int_0^{1/4f} \dot{Q} S(t) dt, \quad (17)$$

где f - частота вращения коленчатого вала; $S(t)$ - внутренняя площадь камеры сгорания.

Обратному процессу адсорбции соответствует испарение. Поток частиц с нагретой поверхности определен в [7]. Учитывая это, с внутренней поверхности камеры сгорания за время рабочего хода поршня будет перенесена энергия

$$J_{исп.} = \int_0^{1/4f} \dot{N}_{исп.} (E_{св.} + k_B T) S(t) dt, \quad (18)$$

где поток испарения $\dot{N}_{исп.}$ определяется следующим образом [7]:

$$\dot{N}_{исп.} = \frac{\sqrt{8}}{3\sqrt{\pi}m_a} \frac{1}{\bar{d}^3} \frac{1}{k_B T_0} \int_{E_{св.}}^{\infty} \left(1 - \frac{E_{св.}}{E}\right)^{1/2} E \exp\left(-\frac{E}{k_B T_0}\right) dE, \text{ 1/м}^2\text{с.} \quad (19)$$

Результирующая энергия, которая переносится за время прохождения рабочего цикла внутри камеры сгорания, составит

$$J = J_{адс.} - J_{исп.} \quad (20)$$

Под действием такого потока энергии в нестационарных условиях непрерывно поддерживается температура монокластерного слоя, равная температуре окружающего нагретого газа. За время dt монокластерный слой нагреется до температуры

$$dT = J / c_d \rho S(t) \bar{d} dt, \quad (21)$$

c_d – теплоемкость материала, из которого изготовлен двигатель, и ρ – его плотность.

Если не отбирать от двигателя тепло, то он будет непрерывно нагреваться в процессе его работы. Следовательно, необходимо двигатель охлаждать. В этом случае происходит теплопередача от твердого тела к окружающему газу.

6. Теплопередача от нагретого твердого тела к холодному газу. Теплопередача от нагретого твердого тела к холодному газу имеет место для внешней поверхности двигателя внутреннего сгорания. Его внешняя поверхность обладает температурой всегда меньше 1000 К. Поэтому на этой поверхности будут адсорбироваться как молекулы кислорода, так и молекулы азота.

Адсорбированные молекулы кислорода и азота с нагретой поверхности твердого тела испаряются при температуре $T' = T_{\infty} + \Delta T$, где T_{∞} – температура окружающей среды и ΔT – разность температур между нагретым телом и окружающей атмосферой. Со временем вблизи поверхности твердого тела молекулы воздуха неподвижной атмосферы достигнут насыщения, и процесс испарения прекратится. Чтобы обеспечить непрерывный процесс испарения, необходимо создать разность давлений между поверхностью твердого тела и окружающим газом и непрерывно эту разность давления поддерживать. Для этого можно использовать закон Бернулли. Тогда необходимо создавать поток воздуха относительно нагретой поверхности.

На рис. 5 показана модель непрерывного теплообмена между нагретым твердым телом и движущимся потоком воздуха. Вследствие хаотического движения молекул воздуха внешняя поверхность работающего двигателя бомбардируется молекулами азота и кислорода. Поток молекул кислорода определяется по (14) при T' , а молекул азота

$$\dot{N}_{N_2} = \frac{1}{4} W_{N_2} n_0 \bar{v} \chi_{N_2}. \quad (22)$$

Все величины, входящие в формулу (22) аналогичны, как для молекулы кислорода, но со своими значениями вероятности того, что падающая молекула является азотом, Среднехаотическая скорость и коэффициент аккомодации рассчитываются для молекул азота. Умножая формулу (14) на время между последовательными столкновениями молекул

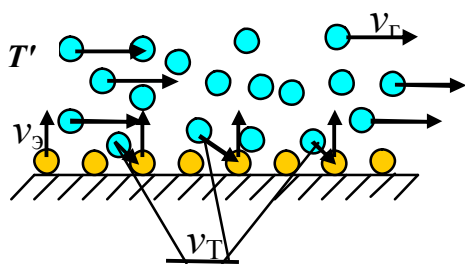


Рис. 5. Модель обмена энергией между нагретым твердым телом и движущимся газом

кислорода, а формулу (22) на время между столкновениями молекул азота, получаем значения количества мест адсорбции, занятых молекулами кислорода и азота. Затем по формуле (15) определяем вероятность того, что место адсорбции занято азотом, предполагая его свободным от молекулы кислорода, а именно

$$\phi_2 = (1 - \phi_1) \frac{\dot{N}_{N_2} \tau_2}{\delta_m}. \quad (23)$$

Поток энергии со стороны холодного газа на внешнюю поверхность четырехцилиндрового двигателя внутреннего сгорания составляет

$$\dot{Q}' = \frac{1}{4} \left(\frac{P}{k_B T_\infty} \right) \sqrt{\frac{8k_B T_\infty}{\pi m_a}} \left[(1 - \phi_1)(1 - \phi_2)(0,21 \cdot E_{cв.,1} + 0,79 \cdot E_{cв.,2}) + (\phi_1 + \phi_2)k_B T_\infty + \theta(2 - \phi_1 - \phi_2)k_B T_\infty \right] \quad (24)$$

а поток энергии, который переносят частицы воздуха на внешнюю поверхность двигателя, равен

$$J'_{адс.} = \int_0^{1/4f} \dot{Q}' S_{внеш.}(t) dt. \quad (25)$$

При термоэмиссии адсорбированных молекул азота и кислорода происходит охлаждение поверхности твердого тела. Поток частиц в этом случае

$$\dot{N}_{исп.,1(2)} = \frac{\sqrt{8}}{3\sqrt{\pi m_a}} \frac{1}{\bar{d}^3} \frac{1}{k_B T'} \int_{E_{св.}}^{\infty} \left(1 - \frac{E_{св.,1(2)}}{E} \right)^{1/2} E \exp\left(-\frac{E}{k_B T'}\right) dE \quad (26)$$

а общий поток энергии

$$J'_{исп.} = \int_0^{1/4f} [\dot{N}_{исп.,1}(E_{св.,1} + k_B T') + \dot{N}_{исп.,2}(E_{св.,2} + k_B T)] S_{внеш.}(t) dt. \quad (27)$$

Температура, до которой охладиться внешний монокластерный слой работающего двигателя внутреннего сгорания, составит

$$dT' = (J'_{исп.} - \dot{Q}') / c_a \rho S_{внеш.} dt. \quad (28)$$

В стационарных условиях в соответствии с законом превращения энергии получаем следующее равенство

$$(J_{адс.} - J_{исп.}) S(t) = (J'_{исп.} - \dot{Q}') S_{внеш.}. \quad (29)$$

Из этого условия определяется температура внешнего монокластерного слоя в каждый момент времени в процессе выполнения рабочего цикла, т.е.

$$T(t) = (J_{адс.} - J_{исп.}) \frac{S(t)}{S_{внеш.}} \frac{1}{k_B}. \quad (30)$$

При такой температуре скорость потока эмиссии

$$\bar{v}_\Sigma = \frac{1}{2} \left(W_{N_2} \int_{E_{св.,2}}^{\infty} v f(v) dv + W_{O_2} \int_{E_{св.,1}}^{\infty} v f(v) dv \right). \quad (31)$$

Здесь $f(v)$ – функция распределения Максвелла по скоростям.

Двигаясь нормально к поверхности, эмитируемые частицы сталкиваются с молекулами воздуха, которые движутся вдоль поверхности. Полное их торможение произойдет после трех и более столкновений. Чтобы не происходило их обратное движение, следует эмитируемые с поверхности частицы уносить потоком воздуха, создаваемого вентилятором. В этом случае

$$t = \frac{3\lambda_a}{\bar{v}_\Sigma} = \frac{L}{v}. \quad (32)$$

Отсюда скорость потока воздуха вдоль внешней поверхности двигателя

$$v = \bar{v}_\Sigma \frac{L}{3\lambda_a}, \quad (33)$$

где L – характерный размер рассматриваемого двигателя.

Зная, какую необходимо обеспечить скорость движения воздуха, выбирается вентилятор соответствующей мощности.

Произведем конкретный расчет тепловых потерь, возникающих при работе дизеля Д-245. Параметры двигателя даны в техническом описании [8].

7. Сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными.
Двигатель Д-245 с турбонаддувом обладает эксплуатационной мощностью 74 кВт при удельном расходе топлива 0,229 кг/(кВт.ч) [8]. В результате за один час работы двигателя будет израсходовано топлива 16,946 кг. При полном сгорании топлива с теплотворной способностью 10600 ккал/кг реализуется выделение тепловой мощности 208,8 кВт. КПД двигателя 35,4%. Предельно возможный коэффициент полезного действия не может превышать 33,3% для поршневых тепловых двигателей. Незначительное увеличение КПД обусловлено тем, что не все учтено в предложенной модели. Например, какое количество масла дополнительно к топливу попадает в камеру сгорания. Мощность тепловых потерь для двигателя Д-245 -- 134,8 кВт.

Поток тепла на внутреннюю поверхность камеры сгорания

$$\dot{Q}_1 = \frac{1}{8} \theta n m_a \bar{v}^3 \chi S, \quad (34)$$

где θ - доля передаваемой энергии при упругом столкновении молекул воздуха с кластерами оксида железа, которая определена в (16); n – концентрация молекул воздуха в камере сгорания; $\bar{v} = \sqrt{8k_b T / \pi m_a}$ - среднехаотическая скорость движения

молекул воздуха; $\chi = r_a^2 / r_{кл.}^2$ - доля мест адсорбции молекул воздуха на поверхности железа. На протяжении рабочего хода мощность по (35), расходуемая на разогрев корпуса двигателя составляет 108,6 кВт. Поток тепла, выбрасываемый в атмосферу

$$\dot{Q}_2 = n m_a \bar{v}^2 V / f. \quad (35)$$

Здесь V – рабочий объем одного цилиндра и f - частота вращения коленчатого вала. Оценки по (35) дают значение 14,5 кВт.

Получается, что топливо в двигателе Д-245 сгорает не полностью. За один час работы двигателя в окружающую среду выбрасывается в виде несгоревшей сажи почти один килограмм. Это известный экспериментальный факт. Действительно, работающий дизель сбрасывает в атмосферу сажевое облако, которое наблюдается визуально.

В двигателе Д-245 применено жидкостное охлаждение. Температура охлаждающей жидкости в пределах 85°-95° С. Тогда разность температур относительно окружающей среды с температурой 295 К составит 60° -70°. Чтобы обеспечить мощность теплоотвода от двигателя 108,6 кВт при разности температур относительно окружающей среды в 60°-70°С, необходимо реализовать площадь радиатора с трубками диаметром 6 мм $\approx 4,38$ -3,76 м². Если площадь радиатора 0,5Х0,6 м² с расстоянием между трубопроводами в слое и между слоями 2 мм, то толщина радиатора должна быть 4,96-4,25 см, что соответствует реальной конструкции радиатора.

Выводы.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Обоснована кластерная структура твердого тела и адгезионного слоя, когда твердое тело находится в жидкостной или в газообразной среде.
2. Разработаны теоретические основы механизма теплообмена между твердым телом и жидкостью или газообразной средой с учетом образования адгезионного слоя на поверхности твердого тела.

3. Выяснены оптимальные условия эффективного теплообмена между твердым телом и движущимся потоком жидкости или газа.

Список литературы: 1. Гречихин Л. И. Наночастицы и нанотехнологии. – Мн.: Право и экономика. 2008. – 406 с. 2. Гречихин Л. И., Шмермбекк Ю. Наноразмерные обоснования ОКГ конденсированных сред. – Мн.: ООО «Право и экономика», 2010. – 73 с. 3. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. – М.: Атомиздат, 1980. – 240 с. 4. Справочник химика в 6 томах. Т. 1. Общие сведения: Строение вещества, свойства важнейших веществ, лабораторная техника. – М. – Л.: Химия, 1971. – 1072 с. 5. Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев, Н.А. Бабушкина А. М. Братковский и др.; Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова, - М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. 5. Гомбаш П. Проблема многих частиц в квантовой механике – М.: ИЛ, 1952. – 279 с. 6. Гречихин Л. И. Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимального управления. Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 270 с. 7. Дизели Д-243, Д-245 и их модификации. Руководство по эксплуатации 243-0000100РЭ. – Мн. ОАО «Минский моторный завод», 2009. 50 с.

INFLUENCE OF STATIONARY AND UNSTEADY HEAT ON PERFORMANCE DIESEL

Kutz N., Grechihin L. (Lutsk State Technical University, Lutsk, Ukraine; Minsk State Higher Aviation College, Minsk, Belarus) Tel. - +38 (0332) 746145 Kutz_n@mail.ru

Abstract:. At the atomic and molecular level, the structure of complex molecules that provide process heat. The structure of a rigid body and an adhesive layer on the nanoscale in the motion of a liquid or gas as a coolant. The mechanism of transfer of heat from solid to liquid or gas coolant and vice versa. The conditions for optimum use of water and a gaseous coolant to ensure efficient heat transfer

Key words: Adhesion, desorption processes of heat transfer, heat engine, the atomic-molecular level, nanocluster structures

ВПЛИВ СТАЦІОНАРНОЇ І НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДИЗЕЛЯ

Куць Н. Г., Гречіхін Л. І. (Луцький національний технічний університет, м.Луцьк, Україна; Мінський державний вищий авіаційний коледж, м.Мінськ, Білорусь
Тел. - 38 (0332) 746145; Kutz_n@mail.ru

Анотація. На атомно-молекулярному рівні визначено структуру складних молекул, які забезпечують процес теплопередачі. Встановлено структуру твердого тіла і адгезійного шару на нанорівні при русі рідини або газу як теплоносія. Розроблено механізм передачі теплової енергії від твердого тіла до рідинному або газового теплоносія і навпаки. З'ясовано умови оптимального використання водяного і газоподібного теплоносія для забезпечення ефективного теплообміну

Ключові слова. Адгезія, десорбція, процеси теплообміну, тепловий двигун, атомно-молекулярний рівень, нанокластерна структура

Надійшла до редколегії 02.06.2011 р.