

**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*)
Tel. – +38 (0332) 746145; *Kuts_n@mail.ru*

Аннотация. На атомно-молекулярном уровне определена структура сложных молекул, которые обеспечивают процесс теплопередачи. Установлена структура твердого тела и адгезионного слоя наnanoуровне 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 nanoуровне.

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 наличие 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]

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

Здесь R_0 – равновесное расстояние между взаимодействующими частицами; $E_{c\text{v}}$ – 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:

$$E_{ion} = \Theta S \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 R_{a,b}}, \quad (2a)$$

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

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

$$\begin{aligned} E_{ion,1} &= \frac{P_1(1-P_2)S(1-S)e^2}{4\pi \epsilon_0 R_{a,b}}; \\ E_{ion,2} &= \frac{P_2(1-P_1)S(1-S)e^2}{4\pi \epsilon_0 R_{a,b}}. \end{aligned} \quad (2b)$$

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 (2б)]. Рассматривая взаимодействие одинаковых частиц, которые образуют двухатомную молекулу, то энергия связи точечного заряда с диполем определяется [1]

$$E_{e-d} = j(1-S) \frac{ep_e}{4\pi \epsilon_0 r_e^2}, \quad (3)$$

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:

$$E_{dip-dip} = \frac{p_{e,1} p_{e,2} \varphi(\alpha_i, N_i)}{4\pi \epsilon_0 R_i^3}. \quad (4)$$

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; $p_{3,1}$ и $p_{3,2}$ – электрические моменты взаимодействующих диполей. Для простой кубической структуры энергия связи частиц определяется по формуле [1]

$$E_{\text{dip}} = \frac{8p_3^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \left(-1 + \frac{0,5776}{2^{3/2}} - \frac{0,669}{3^{3/2}} \right). \quad (5)$$

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

$$E_{\text{dip}} = \frac{8p_3^2}{4\pi\epsilon_0 R^3}. \quad (6)$$

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 $E_{\text{dip}, \text{рез}}(1) = E_{\text{dip}} + k_B T$. При взаимодействии со вторым и третьим координационными слоями добавляются еще две степени свободы, обусловленные колебаниями частиц вещества в плоскости, перпендикулярной радиусу, соединяющему взаимодействующие частицы,

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

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

двуатомных молекулах под действием ковалентной связи взаимно компенсируются, образуя неустойчивое равновесие. Наличие встроенных электрических моментов в двуатомных 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^*
N_2	15,58	41,19	1,020	0,736	1,103	2,103
O_2	12,08	37,02	0,952	0,700	0,797	1,797

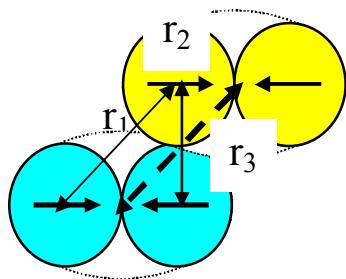


Рис. 1. Расположение двухатомных молекул при их взаимодействии

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

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

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
	$r_{\text{ков.},1}$	$r_{\text{ков.},2}$	Ков.	Ион.	$e-\delta$	$\delta-\delta$	
$N_2 - N_2$	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

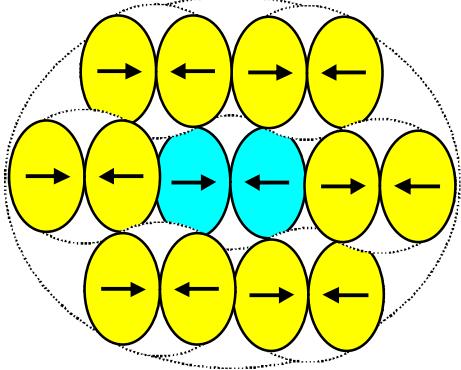


Рис. 2. Структура кластера из двухатомных молекул в горизонтальной плоскости

$6,996 \cdot 10^{-30}$ 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.

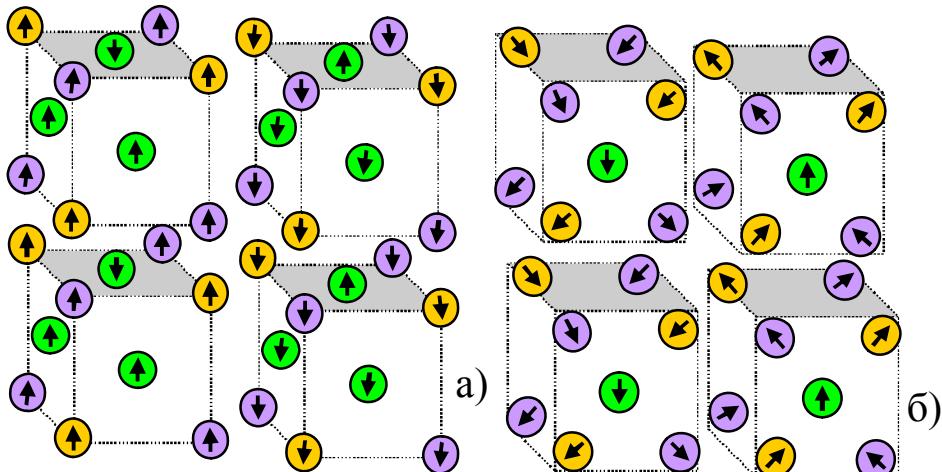


Рис. 3. Решеточная структура кластеров: а) гранецентрированная для алюминия и б) – объемоцентрированная для железа

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

$$E_{c\sigma.,kl,1} = \frac{p_{\exists}^2}{4\pi\epsilon_0(2r_a)^3} (11,983 - 6,211 + 15,204 - 3,643 + 1,254) = 0,0804 \text{ эВ}, \quad (10)$$

а для объемоцентрированной структуры железа –

$$E_{c\sigma.,kl,2} = \frac{4p_{\exists}^2}{4\pi\epsilon_0(2r_a)^3} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{16} \right) = 0,158 \text{ эВ}. \quad (11)$$

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

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

3. Кластерная решеточная структура алюминия и железа. Кластеры железа обладают объемоцентрированной 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: $342 \cdot 10^{-30}$ и $6,996 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

некоторых керамиках. В работе [1] было показано, что при температуре плавления в межклластерных объемах многих металлов формируются двухатомные молекулы. Это приводит к резкому уменьшению обменной энергии связи и общему уменьшению энергии связи межклластерного 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 межклластерных 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 межклластерном пространстве, как это показано на рис. 4 для гранецентрированной и объемоцентрированной структур. Очевидно, что при таком расположении адсорбированных частиц в виде двухатомных молекул энергия физической адгезии будет максимальной.

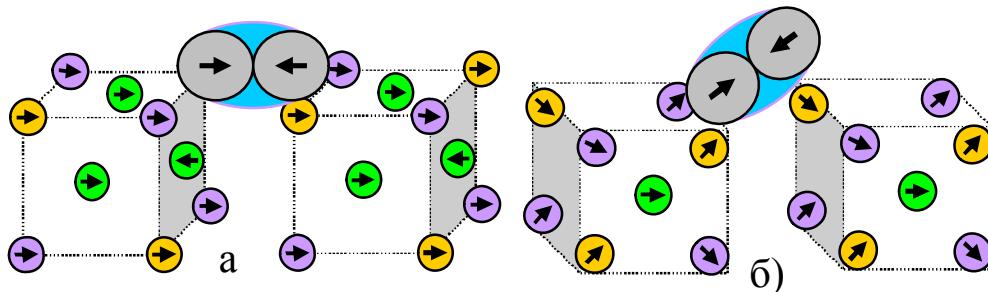


Рис. 4. Расположение двухатомных молекул на поверхности металла: а) – для алюминия и б) – для железа

Для гранецентрированной структуры энергия адсорбции:

$$E_{adsc.} = \frac{2 p_{\vartheta,1} p_{\vartheta,2}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{(a+b)^3} - \frac{\cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(a+b)^2 - a^2}}{a} \right)}{(a+b)^3} - \frac{2 \cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{a+b}{\sqrt{5}a} \right)}{\left(\sqrt{(a+b)^2 + 5a^2} \right)^3} \\ & + \frac{\cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{a+b}{2a-r_e} \right)}{\left(\sqrt{(a+b)^2 + (2a-r_e)^2} \right)} + \frac{2 \cos^2 \left(\operatorname{arctg} \frac{a+b}{\sqrt{(4a-r_e)^2}} \right)}{\sqrt{r'^2 + (a+b)^2}} \end{aligned} \right\}; \quad (12)$$

Аналогично для объемоцентрированной структуры имеем

$$E_{adsc.} = \frac{2 p_{\vartheta,1} p_{\vartheta,2}}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\cos 45^0}{(a+b)^3} - \frac{\cos 45^0}{(a+b+r_e)^3} + \frac{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} \right)}{\left(\sqrt{(2a+b)^2 + a^2} \right)} - \frac{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2}} \right)}{\left(\sqrt{(2a+b+r_e)^2 + a^2} \right)} \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Здесь a и b – радиусы взаимодействующих атомов, r_e – межъядерное расстояние в двухатомной молекуле, $r' = \sqrt{(4a+r_e)^2 + a^2}$ и $p_{\vartheta,1}$, $p_{\vartheta,2}$ – 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 нагревого 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 нагревого газа к твердому телу. Процесс теплопередачи от нагревого 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 нагревого 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; $\bar{v} = \sqrt{8k_B T / \pi m_a}$ - среднеквадратичная скорость движения молекул газа внутри камеры сгорания; $\chi_{O_2} = 1 - \exp(-E_{c\sigma,1}/k_B T)$ - коэффициент аккомодации, т.е. коэффициент физической адсорбции молекул кислорода на внутренней поверхности КС. Коэффициент $\frac{1}{4}$ 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 $\frac{1}{4}$.

Если выражение (14) умножить на время между двумя последовательными столкновениями $\tau_1 = \lambda_a / \bar{v}$ ($\lambda_a = 1/\sqrt{2} \cdot 0,21n_0\pi\bar{d}^2$ - 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

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

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 $\theta = 4m_a M_{kl.} / (m_a + M_{kl.})$ - коэффициент передачи энергии при упругом столкновении молекул воздуха с кластером материала КС. За время рабочего цикла на внутреннюю поверхность камеры сгорания будет перенесена энергия

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

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

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

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

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

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

$$J = J_{adc.} - J_{ucn}. \quad (20)$$

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

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

c_{∂} – 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 нагревого твердого тела к холодному газу. Теплопередача от нагревого 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

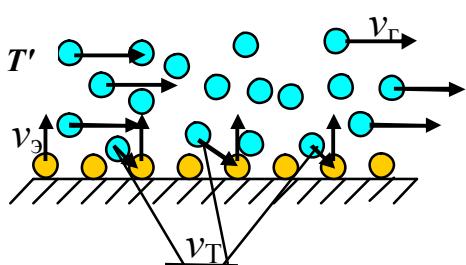


Рис. 5. Модель обмена энергией между нагретым твердым телом и движущимся газом

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

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

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

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

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

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

а общий поток энергии

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

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

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

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

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

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

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

При такой температуре скорость потока эмиссии

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

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

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

Отсюда скорость потока воздуха вдоль внешней поверхности двигателя

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

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; $\bar{v} = \sqrt{8k_b T / \pi m_a}$ - среднекаотическая скорость движения молекул воздуха; $\chi = r_a^2 / r_{kl}^2$ 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°C, необходимо реализовать площадь радиатора с трубками диаметром 6 мм $\approx 4,38-3,76 \text{ м}^2$. Если площадь радиатора $0,5 \times 0,6 \text{ м}^2$ 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., Шмермбек Ю. Наноуровень 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 Kuts_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
Tel. - 38 (0332) 746145; Kuts_n@mail.ru

Анотація. На атомно-молекулярному рівні визначено структуру складних молекул, які забезпечують процес тепlop передачі. 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.