

**Список литературы:**

1. Стационарные газотурбинные установки: справочник / [Л. В. Арсеньев, В. Г. Тырышкин, И. А. Богов и др.] ; под ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырышкина. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 543 с. 2 Нигматулин И. Н. Тепловые двигатели / Нигматулин И. Н., Шляхин П. Н., Ценев В. А. ; под ред. И. Н. Нигматулина. – М. : Высшая школа, 1974. – 375 с. 3. Братута Е. Г. Удосконалена методика розрахунку температурних характеристик теплообмінних апаратів з перехресним плином та їх систем / Е. Г. Братута, А. М. Ганжа // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2008. – № 1. – С. 61–65. 4. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: справочник / [С. С. Кутателадзе]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 367 с. 5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравли-

ческим сопротивлениям / Идельчик И. Е. – М. : Машиностроение, 1975. – 559 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Stacionarnye gazoturbinnye ustanovki: spravochnik / [L. V. Arsen'ev, V. G. Tyryshkin, I. A. Bogov i dr.] ; pod red. L. V. Arsen'eva i V. G. Tyryshkina. – L. : Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1989. – 543 s. 2 Nigmatulin I. N. Teplovyye dvigateli / Nigmatulin I. N., Shljahin P. N., Cenev V. A. ; pod red. I. N. Nigmatulina. – M. : Vysshaja shkola, 1974. – 375 s. 3. Bratuta E. G. Udoskonalena metodika rozrahunku temperaturnih karakteristik teploobminnih aparativ z perehresnim plinom ta ih sistem / E. G. Bratuta, A. M. Ganzha // Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. – 2008. – № 1. – S. 61–65. 4. Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie: spravochnik / [S. S. Kutateladze]. – M. : Jenergoatomizdat, 1990. – 367 s. 5. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam / Idel'chik I. E. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 559 s.

УДК. 629.113

**Г.П. Подзноев, канд. геол.-мин. наук, У.А. Абдулгазис, д-р техн. наук**

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ

**Постановка проблемы**

Исторически развитие транспортного сектора экономики было тесно привязано к природным ресурсам углеводородных энергоносителей. В рамках этого направления шло также и совершенствование конструкций двигателей. В то же время неуклонно приближается период истощения пригодных к добыче углеводородов, из чего следует, что в ближайшей перспективе должна быть найдена и технически обеспечена адекватная энергетическая альтернатива углеводородам, что и предопределило бурную активизацию исследований по разработке технологий альтернативного энергообеспечения транспорта. Необходимость радикального пересмотра углеводородной концепции энергообеспечения силовых установок транспортных средств диктуется также и кумулятивным разрушением природного экологического равновесия, вызываемого переизбытком не утилизируемых продуктов сжигания топлива, ведущих к серьезным негативным сдвигам в системе человек - природа

**Информационный анализ**

Наиболее реальной перспективой решения энергетической проблемы для транспорта признается использование водорода, который привлекает высокой энергией сгорания (120 МДж/кг), практически неисчерпаемыми природными ресурсами, неограниченной возобновляемостью и безупречной экологичностью в едином природном кругообороте «вода → (водород + кислород) → вода».

По данным интернет-сайтов [1] практически все энергетические корпорации вкладывают ог-

ромные средства в престижные водородные программы.

Как топливо водород в разработанных на настоящий момент автомобильных двигателях используется в двух принципиально различных вариантах: - в топливных элементах, вырабатывающих электроэнергию для питания электродвигателей, или непосредственно в двигателях внутреннего сгорания с принудительным воспламенением. В последнем случае (BMW 750hL) [2] преимущество состоит в том, что двигатели могут работать на любом из двух видов топлива – и на бензине, и на водороде.

Фирма «Ford» установила на модели Focus C-MAX водородный ДВС (H<sub>2</sub> ICE). Сжатый водород размещался под давлением 35 МПа в трех баках общим объемом 119 литров (2,75 кг), что позволяло автомобилю пройти около 200 км.

Более эффективными считаются водородные системы с топливными элементами (ТЭ), с вдвое большим КПД.

GM в модели Chevrolet Equinox Fuel Cell [3] применила блок топливных элементов мощностью 93 кВт, питающих через никель-металлогидридные аккумуляторы электродвигатель. Водород содержится в углекислотных баллонах под давлением до 70МПа. Одной заправки (всего 4,2 кг водорода) хватает на 320 км пробега. Аналогично сконструированы модели Honda Civic FCX и DM Ну-Wire с водородом массой 4,5–4,9 кг (570 МДж) в специальных сверхпрочных баллонах объемом

150–160 дм<sup>3</sup> под давлением 35 МПа, обеспечивающих всего 400–450 км пробега.

Как следует из приведенного краткого обзора, водород, как энергоноситель, несмотря на свои теплотехнические и экологические преимущества, обладает весьма серьезными проблемными характеристиками, трудноразрешимыми в разработанных концепциях водородных автомобилей. Наиболее серьезный недостаток водорода - весьма низкая объемная энергоемкость и плотность, требующих использования чрезмерно высоких давлений или весьма низких температур, что сопряжено со сложностью и высокой стоимостью оборудования для его производства, транспортировки, хранения и эксплуатации. Вторая серьезная проблема водорода связана с его весьма высоким взрывным потенциалом при смешивании с кислородом воздуха (24 кг тротилового эквивалента на 1 кг H<sub>2</sub>) и наличие под сиденьем его сжатого до 35 МПа заряда (4 – 5 кг) в случае аварийной ситуации может привести к весьма серьезным катастрофическим последствиям.

Более перспективным может быть использование ряда комплексных металлгидридов, особенно на основе гидрида алюминия (AlH<sub>3</sub>), в условном адекватном объеме которого (150 дм<sup>3</sup>) содержится 22,2 кг связанного водорода с энергопотенцией около 2665 МДж [3]. Алюмогидрид легко взаимодействует с водой с выделением удвоенного (44,4 кг) количества водорода с энергопотенциалом уже 5330 МДж, что выше таковой для 150 дм<sup>3</sup> бензина (5060 МДж). Кроме этого при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (13,2 МДж/кг AlH<sub>3</sub>, или около 2918 МДж в варианте 150 дм<sup>3</sup> AlH<sub>3</sub>). Таким образом, полный энергопотенциал AlH<sub>3</sub> может достигать 8250 МДж, что в 1,6 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,3 раза выше, чем для сжатого до 35 МПа водорода.

В работе [4] рассмотрен вариант использования гидрида алюминия в термодинамическом цикле Дизеля, в котором перед адиабатным сжатием введен предварительный процесс гидролиза AlH<sub>3</sub> оборотной водой, получаемой при конденсации пара отходящих газов. Обратная вода к тому же используется для регенерации теплоты отработанных газов. Тем самым достигается значительное увеличение количества полезной работы при адекватности количества вводимой теплоты и термического КПД цикла, но с более мягкими параметрическими характеристиками рабочего тела. Отработавшие газы представляют собой лишь пары воды и инертный азот.

В развитие концепции алюмогидридного энергоносителя было предложено заменить кислород воздуха, как окислитель, на жидкий пероксид водорода [4], содержание активного кислорода в

котором составляет 47%, т. е. значительно выше такового для других веществ. При нагревании пероксид разлагается на кислород и воду. При этом выделяется 2,9 МДж/кг теплоты, что является дополнительным (около 13%) источником энергии, позволяющим снизить расход основного топлива..

В то же время традиционная схема работы типового дизеля характеризуется рядом непродуктивных процессов, к которым следует отнести два практически нерабочих хода поршня в которых происходит выпуск отработавших газов и впуск свежего заряда. То есть один поворот коленчатого вала из двух является по своей сути насосным, но на его совершение тратится энергия рабочего хода, время и ресурс двигателя. Кроме этого существенная доля полезной работы тратится на адиабатное сжатие воздуха.

В первом случае проблема может быть решена использованием в двигателе нового типа принципа двухтактного двигателя [5]. Поскольку при этом процессы очистки и наполнения цилиндров совмещены, двухтактный двигатель более прост в конструкции. Кроме этого мощность двухтактного двигателя, при одинаковых размерах цилиндра и частоте вращения вала, теоретически в два раза больше четырехтактного за счет в два раза большего числа рабочих тактов.

#### Цель исследований

Одним из затратных процессов цикла двигателя внутреннего сгорания является адиабатное сжатие воздуха или топливной смеси, на выполнение которого расходуется существенная часть получаемой при адиабатном расширении механической работы и необходимость сброса остаточной теплоты и горячих отработавших газов в окружающую среду. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование принципа внешнего сгорания, когда процесс формирования рабочего тела с требуемыми термодинамическими характеристиками по давлению и температуре осуществляется в отдельной камере.

В задачу исследований входило проведение термодинамического моделирования и оптимизации основных характеристик полного цикла формирования рабочего тела, совершения работы и регенерации теплоносителя и теплоты в замкнутой системе «гидролизатор – поршневой двигатель». В расчетах учитывались масса исходного энергоносителя (гидрид алюминия), квота теплоносителя (вода), количество регенерируемой теплоты, степень сжатия. Расчетными характеристиками являлись теплота гидролиза, теплота диссоциации пероксида, теплота сгорания водорода, массовая и молярная доли паровой фазы, температура и давление пара на выходе из гидролизатора, в конце адиабатного расширения, остаточная доля теплоты

после регенерации, коэффициент полезного использования теплоты и количество получаемой работы. В первой серии расчетов моделировались варианты с шаговыми значениями массы алюмогидрида (в диапазоне 0,03-0,05г), квоты воды (2-5 г), количества регенерируемой теплоты (1200 -2000 Дж) и степени адиабатного сжатия (5-20) На основе полученных результатов оптимизировались варианты с наиболее приемлемыми значениями температуры и давления.

Во второй серии расчетов по приемлемым вариантам уточнялось наиболее оптимальное сочетание всех параметров и характеристик полного цикла двигателя нового типа, приведенных в табл.1.

Таблица 1. Численные значения параметрических характеристик двухтактного двигателя нового типа в зависимости от массы алюмогидрида и пергидроля, количества регенерируемой теплоты и добавочной воды

Цикл	Дизель	Двигатель нового типа
$m_{гид.г}$	0,114	0,04
$m_{пероксида.г}$	-	0,153
$H_2O,г$	-	3,0
$\varepsilon$	17	10
$Q_{гидролиза}$	-	725,8
$Q_{регенерации}$	-	2000
$Q_{диссоциации}$	-	219,2
$Q_{сгорания}$	-	967,4
$q_1$	5083	3912,4
$q_2$	1995	2375,7
$q_3$	-	375,7
$t_2$	298	1100,5
$t_3$	850	1942,0
$t_4$	2246	-
$t_5$	1096	790,6
$t_6$	-	298
$p_2$	1,0	1,8
$p_3$	48,5	63,6
$p_4$	48,5	-
$p_5$	3,68	2,58
$\eta_{терм}$	0,607	-
$\eta_{кип}$	-	0,904
$A$	3084	3536,8

В таблице 1 даны:  $m_{гид.}$  - масса гидрида алюминия, подаваемого на гидролиз (г);  $m_{пероксида.}$  - масса пергидроля ( $H_2O_2$ ), подаваемого в камеру сгорания (г);  $H_2O$  - масса добавочной воды на гидролиз (г);  $\varepsilon$  - степень сжатия рабочего тела;  $Q_{гидролиза.}$  - количество генерируемой при гидролизе теплоты (Дж);  $Q_{регенерации}$  - количество теплоты, регенерируемой оборотной водой (Дж);  $q_{дисс.}$  - количество теплоты, генерируемой при термической

диссоциации пероксида водорода (Дж);  $q_{сгорания}$  - теплота, получаемая за счет сгорания  $H_2$  (Дж);  $q_1$  - суммарная теплота, введенная в процесс (Дж);  $q_2$  - теплота в конце адиабатного расширения (Дж);  $q_3$  - остаточная теплота после регенерации, выводимая из цикла в окружающую среду (Дж);  $t_2$  - температура паро-водородной фазы перед адиабатным сжатием ( $^{\circ}K$ );  $t_3$  - температура паро-водородной фазы после адиабатного сжатия ( $^{\circ}K$ );  $t_4$  - температура рабочего тела в конце сгорания ( $^{\circ}K$ );  $t_5$  - температура рабочего тела в конце адиабатного расширения ( $^{\circ}K$ );  $t_6$  - температура воды после теплообменника;  $p_2$  - давление перед адиабатным сжатием ( $10^5$  Па);  $p_{3.4}$  - давление в конце сжатия ( $10^5$  Па);  $p_5$  - давление паро-газовой фазы в конце адиабатного расширения (МПа);  $\eta$  - термический КПД;  $\eta_{кип}$  - коэффициент использования теплоты  $A$  - совершаемая работа адиабатного расширения.

#### Анализ полученных результатов

Общий тепловой баланс процесса формирования рабочего тела в оптимизированном варианте формируется на 18,5% за счет гидролиза алюмогидрида, на 51,1% - регенерируемой теплотой, на 5,6% - термической диссоциацией пероксида водорода и всего на 24,7% - при сгорании основного энергоносителя - водорода.

Рассчитанные наиболее оптимальные значения параметрических характеристик - температуры и давления паровой фазы в гидролизаторе позволяют существенно снизить степень сжатия рабочего тела, уменьшив тем самым затраты энергии на этот процесс. При этом сжатие начинается, когда поршень проходит примерно половину пути к верхней мертвой точке. До этого происходит выталкивание половины отработавшей паровой фазы в выпускной коллектор. Далее поршень перекрывает коллектор и в рабочий цилиндр вводится свежий заряд из камеры внешнего сгорания - гидролизатора. При этом стартовые значения температуры и давления в конце сжатия достаточны для получения полезной работы, соизмеримой с традиционным дизелем.

Поскольку отработавшая паровая фаза по составу идентична рабочему телу, то происходит своего рода внутренняя регенерация (возврат) части остаточной теплоты со своим термическим потенциалом в рабочий процесс без выхода за пределы рабочей камеры (внутренняя циркуляция теплоты). Ушедшая же в коллектор половина отработавшей паровой фазы проходит через теплообменник, пе-

редавая основную долю теплоты оборотной воде на гидролиз, получаемой в конденсаторе.

#### Выводы

1. Рассмотренный выше вариант двигателя нового типа позволяет существенно упростить процесс формирования рабочего тела по принципу внешнего сгорания и значительно облегчить работу поршневой группы.

2. Практически полная идентичность состава рабочего тела и отработавшей паровой фазы позволяет при движении поршня к верхней мертвой точке совместить процесс вытеснения части отработавшего пара, ввод нового заряда и адиабатное сжатие паровой фазы с почти двукратным снижением степени сжатия. При этом снижаются энергозатраты на процесс сжатия, дополнительно используется инерционная энергия маховика и частично возвращается в процесс остаточная теплота.

3. Ориентировочный расчет эффективности подобного двигателя с внешним формированием рабочего тела на основе алюмогидридного энергоносителя в сравнении с традиционным дизелем показывает, что при адекватной по объему емкости с алюмогидридом пробег автомобиля возрастает в 5,24 раза по сравнению с дизелем или почти в 10,5 раза в сравнении со сжатым до 35 МПа водородом в моделях на топливных элементах, а учитывая снижения затрат на сжатие рабочей смеси и трение, то при одинаковой базовой мощности сможет теоретически проработать более в чем в 13 раз дольше,

чем традиционный дизель.

#### Список литературы:

1. Бюро международных информационных программ Госдепартамента США. Водород все шире внедряется на транспорте и в электроэнергетике [Электронный ресурс] Режим доступа <http://www.america.gov/st/washfile-russian>.
2. General Motors Generation V fuel cell stack [Электронный ресурс] - Режим доступа. <http://green.autoblog.com/17.08.2009/>.
3. Подзноев Г.П. Металлогидридные системы энергообеспечения транспорта. / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004.- С. 32-36.
4. Подзноев Г.П., Возможности использования пероксида водорода в качестве окислителя в двигателях внутреннего сгорания / Г.П. Подзноев. У.А. Абдулгасис // Ученые записки КИПУ. - Вып. 20. 2009. С.15-21.
5. Подзноев Г.П., Абдулгасис У.А. Особенности термодинамического цикла двухтактного Н-Дизеля с использованием алюмогидридного энергоносителя и пероксида водорода. / Г.П. Подзноев, У. А. Абдулгасис // Ученые записки КИПУ. - Симферополь. - Вып. 24. - 2010. - С. 41-47.

#### Bibliography (transliterated):

1. Bjuro mezhdunarodnyh informacionnyh pro-gramm Gosdepartamenta SShA.. Vodorod vse shire vnedrjaetsja na transporte i v jelektrojenergetike [Jelektronnyj resurs] Rezhim dostupa <http://www.america.gov/st/washfile-russian>.
2. General Motors Generation V fuel cell stack [Jelektronnyj resurs] - Rezhim dostupa. <http://green.autoblog.com/17.08.2009/>.
3. Podznoev G.P. Metallogidridnye sistemy jenergoobespechenija transporta. / G.P. Podznoev, U.A. Abdulgazis. // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2004.- S. 32-36.
4. Podznoev G.P., Vozmozhnosti ispol'zovanija peroksida vodoroda v kachestve okislitelja v dvigateljah vnutrennego sgoranija / G.P. Podznoev. U.A. Abdulgazis // Uchenye zapiski KIPU. - Vyp. 20. 2009. S.15-21.
5. Podznoev G.P., Abdulgazis U.A. Osoben-nos-ti termodinamicheskogo cikla dvouhtaktnogo N-Dizelja s ispol'zovaniem aljumogidridnogo jenergo-nositelja i peroksida vodoroda. / G.P. Podznoev, U. A. Abdulgazis // Uchenye zapiski KIPU. - Simfero-pol'. - Vyp. 24. - 2010. - S. 41-47.