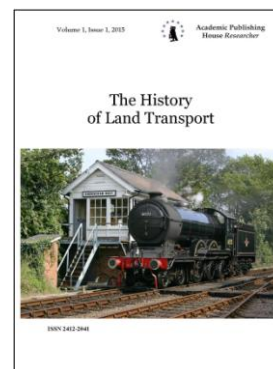


Copyright © 2017 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
The History of Land Transport
Has been issued since 2015.
ISSN: 2412-2041
E-ISSN: 2413-760X
2017, 3(1): 39-50

DOI: 10.13187/hlt.2017.1.39
www.ejournal38.com



A 1.6 Liter Hydrogen and Petrol Engine

Nikolay V. Koshcheev ^a

^a Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikova, Russian Federation

Abstract

An investigation was made of the effective performance of an internal combustion engine on various fuels. Effective parameters of the engine were studied for different mix compositions and ignition timing when the engine was running on hydrogen. The calculated data are presented: tables and graphs for studies.

Keywords: coefficient of excess air alpha, effective efficiency, specific fuel consumption, detonation resistance.

1. Введение

Двигатель внутреннего сгорания (сокращённо ДВС) — это тип двигателя, тепловая машина, в которой химическая энергия топлива (обычно применяется жидкое или газообразное углеводородное топливо), сгорающего в рабочей зоне, преобразуется в механическую работу. На данный момент ДВС является одним из самых распространённых типов двигателей, поэтому весьма актуально перевести его работу на более экологически чистое топливо – водород (**Двигатель внутреннего сгорания...**).

Водородное топливо впервые применили для обычных ДВС в сентябре 1941 года в блокадном Ленинграде. Всего за 10 дней перевели с бензина на водород 200 грузовиков, что позволило в условиях нехватки бензина защитить город, поднимая в небо аэростаты заграждения (**СССР: водородное топливо...**).

Наблюдаемое в мире в последние десятилетия резкое увеличение интереса к водороду как к горючему и энергоносителю определяется следующими его основными особенностями:

- запасы водорода практически неограниченны;
- водород – универсальный вид энергоресурса, так как может использоваться в качестве горючего для производства электричества в рабочих циклах различного типа, и в качестве энергоносителя для транспортировки в газообразном, жидком и связанном состояниях;
- при помощи водорода возможна аккумуляция энергии;
- среди прочих видов органического топлива водород отличается наибольшей теплотворной способностью на единицу массы и наименьшим отрицательным воздействием на окружающую среду (**Шаманов, Калмыков, 2006**).

Водород, получаемый из воды – один из наиболее энергонасыщенных видов носителей энергии. Так теплота сгорания 1 кг водорода составляет 120 МДж/кг (по низшему пределу), в то время как теплота сгорания бензина или лучшего углеводородного авиационного топлива всего 46 – 50 МДж/кг, т.е. в 2,5 раза меньше. К тому же водород – легко возобновляемое топливо.

Одним из важнейших фактором перевода двигателя на водород является детонационное свойство водорода, которое зависит от коэффициента избытка воздуха – альфа (далее α).

Как показывают многочисленные исследования, с обеднением смеси склонность к детонации у водорода снижается (Мищенко, 1984).

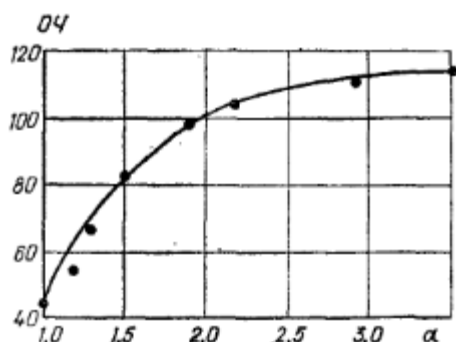


Рис. 1. График зависимости октанового числа от коэффициента α водородного ДВС.

2. Материалы и методы

Методика, лежащая в основе проводимых исследований – тепловой расчет на основе безразмерных дифференциальных уравнений. В настоящей статье представлена система дифференциальных уравнений в безразмерной форме. Подобная система пригодна одновременно, и для расчета и для анализа рабочих процессов в ДВС, так как уравнения включают взаимозаменяемые слагаемые, что позволяет получить соотношение, связывающее непосредственно давление и объем (или угол поворота вала двигателя), то есть описывающее индикаторную диаграмму.

3. Результаты

В соответствии с кинематикой кривошипно-шатунного механизма объем рабочей камеры равен:

$$V = V_c + F_n \cdot r \cdot \left[1 - \cos \varphi + \frac{\lambda_k}{4} \cdot (1 - \cos 2\varphi) \right] \quad (1.1)$$

а изменение объема:

$$dV = F_n \cdot r \cdot \left[\sin \varphi + \frac{\lambda_k}{2} \cdot \sin 2\varphi \right] d\varphi \quad (1.2)$$

где: V_c – объем камеры сгорания;

F_n – площадь поршня;

r , λ_k – соответственно, радиус кривошипа и геометрический коэффициент, равный отношению радиуса кривошипа к длине шатуна.

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad (1.3)$$

где: V_h – рабочий объем цилиндра;

ε – степень сжатия.

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot S}{4} \quad (1.4)$$

После деления формулы (1.2) на формулу (1.1) и преобразований получим безразмерное уравнение объема:

$$\frac{dV}{V} = \frac{\left[\sin \varphi + \frac{\lambda_k}{2} \cdot \sin 2\varphi \right] d\varphi}{\frac{2}{\varepsilon - 1} + \left[1 - \cos \varphi + \frac{\lambda_k}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]} \quad (1.5)$$

Дифференциальное уравнение массового баланса имеет вид:

$$dm = dm_{en} - dm_e + \Delta m_u dx \quad (1.6)$$

где: dm_{en} , dm_e – соответственно, элементарные количества массы, поступающей через органы впуска и вытекающей через органы выпуска;

Δm_u – цикловая подача топлива;

x – доля топлива, участвовавшего в процессе сгорания.

$$\Delta m_u = \frac{m_{возд}}{L_0} \quad (1.7)$$

$$x = 6.908 \frac{m+1}{\phi_z} \cdot \left(\frac{\phi - \phi_0}{\phi_z} \right)^m \cdot e^{-6.908 \cdot \left(\frac{\phi - \phi_0}{\phi_z} \right)^{m+1}} \quad \text{- формула Вибе} \quad (1.8)$$

где: $L_0=14.957$ кг – теоретическая масса воздуха которая требуется для сгорания 1 кг топлива; $m_{возд}$ – масса воздуха поступившего в цилиндр двигателя в такт впуска и начала такта сжатия;

ϕ_z – угол горения;

ϕ_0 – угол начала горения;

ϕ – текущий угол поворота коленчатого вала;

m – коэффициент.

Разделив почленно выражение (1.6) на соотношение $pV=RmT$, представляющее уравнение состояния для рабочего тела произвольной массы, найдем

$$\frac{dm}{m} = \frac{RT}{pV} (dm_{en} - dm_e + \Delta m_u dx) \quad (1.9)$$

Для решения уравнения (1.9) используют сопутствующие формулы:

- элементарной массы:

$$dm_{en} = (\mu F)_{en} W_{en} \rho_{en} dt \quad (1.10)$$

$$dm_e = (\mu F)_e W_e \rho_e dt \quad (1.11)$$

- скорости в органах газораспределения: подкритическая скорость течения газа через выпускной клапан (при $P/P_k > \beta_{кр}$):

$$W_{en} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_k \left[1 - \left(\frac{P}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1.12)$$

Подкритическая скорость течения газа через выпускной клапан (при $P_m/P > \beta_{кр}$):

$$W_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}-1} R_{\Gamma} T \left[1 - \left(\frac{P_{\Gamma}}{P} \right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}} \right]} \quad (1.13)$$

Надкритическая скорость течения газа через выпускной клапан (при $P/P_k < \beta_{кр}$):

$$W_{en} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_k} \quad (1.14)$$

Надкритическая скорость течения газа через выпускной клапан (при $P_m/P < \beta_{кр}$):

$$W_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2k_{\Gamma}}{k_{\Gamma}+1} R_{\Gamma} T} \quad (1.15)$$

плотность газа при течения через органы газораспределения

$$\rho_{en} = \frac{P_k}{RT_k} \left(\frac{P}{P_k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (1.16)$$

$$\rho_{\varepsilon} = \frac{P}{R_{\Gamma} T} \left(\frac{P_{\Gamma}}{P} \right)^{\frac{1}{k_{\Gamma}}} \quad (1.17)$$

где: $(\mu F)_{en}$, $(\mu F)_{\varepsilon}$ – эффективные площади проходных сечений в органах впуска и выпуска;
 k , k_{Γ} , R , R_{Γ} – показатели адиабаты и газовые постоянные соответственно для воздуха и продуктов сгорания;

P_k , T_k – давление и температура на впуске;

P_{Γ} – давление на выпуске;

$\beta = 0,528$ – для воздуха.

К числу основных, относится также уравнение баланса энергии рабочего тела, составляемое на основе первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы:

$$d(mc_{\nu}T) = dE + dQ + dL \quad (1.18)$$

где: C_v – теплоемкость при постоянном объеме, а слагаемые в правой части учитывают энергетические потоки, обусловленные массообменом (dE), теплообменом (dQ) и механическим взаимодействием с внешней средой (dL).

Расшифровать эти слагаемые можно следующим образом: изменение энергии за счет массообмена:

$$dE = (C_{pk} T_k + \frac{W_k^2}{2}) dm_{en} - (C_p T + \frac{W^2}{2}) dm_e + (c T_T + \frac{W_T^2}{2}) dm_T \quad (1.19)$$

где: C_{pk} , C_p , C – соответственно теплоемкости при постоянном давлении свежего заряда, отработавших газов и топлива [Дж/(кг*К)], температуры (T_k , T , T_T) и скорости (W_k , W , W_T) указанных рабочих тел.

Теплоемкость воздуха:

$$C_{pk} = 0.0963 T_{cp} + 100; \quad (1.20)$$

$$T_{cp} = \frac{T_k + T_w}{2} \quad (1.21)$$

Теплоемкость продуктов сгорания:

$$C_p = 0.0762 \cdot T_{cp} - 837.4 \quad (1.22)$$

$$T_{cp} = \frac{T + T_w}{2} \quad (1.23)$$

Обычно влияние кинетических составляющих энергии невелико, также можно пренебречь энергообменом за счет поступления топлива, тогда последнюю формулу можно записать в упрощенном виде:

$$dE = C_{pk} T_k dm_{en} - C_p T dm_e \quad (1.24)$$

Слагаемое dQ в уравнении (1.18) представляет тепловое воздействие за счет сгорания и теплообмена со стенками. Другие тепловые эффекты в рабочей полости ДВС (затраты теплоты на испарение топлива, на диссоциацию продуктов сгорания и т.п.) незначительны, однако при необходимости они также могут быть учтены. Величина:

$$dQ = H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt \quad (1.25)$$

где: H_u – теплота сгорания топлива;

α_w – коэффициент теплоотдачи на границе рабочее тело – стенка;

F_w – площадь поверхности теплоотдачи;

T_w – температура стенки.

Выражение для теплоотдачи стенки составлено на основе формулы Ньютона, в которой с помощью суммы учтены локальные условия теплообмена (различные температуры стенок, а также различные условия формирования пограничного слоя).

Величины x и α_w определяют, как правило, по эмпирическим формулам, отражающим обобщенные результаты многочисленных экспериментов.

$$\alpha_w = C \cdot D^{-0.22} \cdot T^{-0.52} \cdot P^{0.78} \cdot C_m^{0.78} \quad \text{Формула Цапфа} \quad (1.26)$$

$$C_m = \frac{S \cdot n}{30} \quad \text{средняя скорость поршня} \quad (1.27)$$

Во время горения топлива используется следующая формула для коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_w = \frac{\sqrt{0.00036 \left(\frac{T + T_w}{2} \right)^{0.75} \cdot \left(0.0762 \frac{T + T_w}{2} + 837.4 \right) \cdot \frac{P}{R \cdot \frac{T + T_w}{2}}}}{\sqrt{\omega}} \cdot \left[0.5 + 0.256 \frac{H_u \cdot x}{\left(0.0762 \frac{T + T_w}{2} + 837.4 \right) \cdot (T - T_w)} \right] \quad (1.28)$$

Третье слагаемое в правой части уравнения (1.18) представляет собой механическую работу на поршне:

$$dL = -pdV \quad (1.29)$$

в которой знак минус означает, что при увеличении объема внутренняя энергия рабочего тела уменьшается.

С учетом соотношений (1.24), (1.25), (1.29) уравнение баланса энергии (1.18) запишем:

$$d(mC_v T) = C_{pk} T_k dm_{en} - C_p T dm_e + H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt - pdV \quad (1.30)$$

Приняв, что теплоемкость C_v изменяется незначительно в пределах малого интервала времени и, продифференцировав левую часть уравнения, найдем:

$$C_v (m dT + T dm) = C_{pk} T_k dm_{en} - C_p T dm_e + H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt - pdV \quad (1.31)$$

Последнее уравнение приведем к безразмерному виду путем деления на внутреннюю энергию рабочего тела ($mC_v T$):

$$\frac{dT}{T} + \frac{dm}{m} = \frac{C_{pk} T_k}{C_v T} \frac{dm_{en}}{m} - k \frac{dm_e}{m} + \frac{1}{C_v m T} \left[H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt \right] - \frac{P}{C_v m T} dV \quad (1.32)$$

Используя известные термодинамические преобразования последнего слагаемого, получим безразмерное уравнение энергии:

$$\frac{dT}{T} + \frac{dm}{m} = \frac{C_{pk}}{C_v} \frac{T_k}{T} \frac{dm_{en}}{m} - k \frac{dm_{\epsilon}}{m} + \frac{1}{C_v m T} \left[H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt \right] - (k-1) \frac{dV}{V} \quad (1.33)$$

Четвертым основным дифференциальным уравнением является уравнение состояния, которое также представлено в безразмерной форме:

$$\frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} = \frac{dm}{m} + \frac{dT}{T} \quad (1.34)$$

Обычно удобно вести расчеты и анализ параметров рабочего тела в зависимости от угла поворота вала двигателя. Тогда основная система уравнений будет иметь вид:

$$\frac{dV}{V} = \frac{\left[\sin \varphi + \frac{\lambda_k}{2} \cdot \sin 2\varphi \right] d\varphi}{\frac{2}{\epsilon - 1} + \left[1 - \cos \varphi + \frac{\lambda_k}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right]} \quad (1.35)$$

$$\frac{dm}{m} = \frac{RT}{pV} (dm_{en} - dm_{\epsilon} + \Delta m_u dx) \quad (1.36)$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{dm}{m} = \frac{C_{pk}}{C_v} \frac{T_k}{T} \frac{dm_{en}}{m} - k \frac{dm_{\epsilon}}{m} + \frac{1}{C_v m T} \left[H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt \right] - (k-1) \frac{dV}{V} \quad (1.37)$$

$$\frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} = \frac{dm}{m} + \frac{dT}{T} \quad (1.38)$$

где: ω – угловая скорость вращения вала.

Для описания процессов в рабочей полости ДВС систему уравнений (1.35, 1.36, 1.37, 1.38) решают численными методами. Начальные условия задают, а затем уточняют в последующих циклах методом установления.

В программу расчетов включают также алгоритмы для определения основных показателей двигателя (индикаторной работы, среднего индикаторного давления, индикаторного КПД и удельного расхода топлива), с помощью которых судят о достоинствах или недостатках рассматриваемых вариантов. Это позволяет также решать оптимизационные задачи по ряду конструкторских, регулировочных или режимных факторов.

Достоинство системы уравнений (1.35-1.38) состоит в том, что все они содержат одинаковые слагаемые dV/V , dm/m , dT/T , dp/p , а, следовательно, возможны любые комбинации из этих уравнений, что делает их удобными не только для расчетов, но и для выполнения качественного анализа процессов. Обычно при использовании дифференциальных уравнений, а тем более их систем, бывает затруднительно дать наглядное представление о влиянии одного фактора на другой. Эту функцию поручают ЭВМ, которая позволяет установить конечный результат без его детального рассмотрения. Качественный анализ конечных уравнений всегда представляется более наглядным, и убедительным. В данном случае при использовании системы безразмерных уравнений (1.35-1.38) можно избежать этих затруднений.

Одним из основных инструментов анализа процессов в ДВС является индикаторная диаграмма. Её можно получить либо опытным, либо расчетным путем. Диаграмма представляет собой зависимость $p=f_1(V)$ или $P=f_2(\varphi)$. Решив совместно последние два уравнения системы (1.35-1.38), получим безразмерное уравнение, связывающее давление и объем, то есть уравнение, описывающее индикаторную диаграмму:

$$\frac{dP}{P} = \frac{C_{pk}}{C_v} \frac{T_k}{T} \frac{dm_{en}}{m} - k \frac{dm_e}{m} + \frac{1}{C_v m T} \left[H_u \Delta m_u dx + \sum_{i=1}^i \alpha_{wi} F_{wi} (T_{wi} - T) dt \right] - k \frac{dV}{V} \quad (1.39)$$

Это уравнение указывает, что давление в рабочей полости ДВС изменяется под влиянием пяти основных явлений (в порядке слагаемых в правой части): поступления свежего заряда через органы впуска, истечения отработавших газов через органы выпуска, сгорания, теплообмена со стенками и изменения объема цилиндра. Суммарное влияние, указанных факторов определяет относительное изменение величины давления dp/p . Наличие формулы, в которой представлена связь между давлением и указанными факторами в явной форме, дает возможность выполнить детальный качественный анализ рабочих процессов в ДВС (Колчин, Демидов, 2008; Бухмиров, 2014; Егоров, 1987; Егоров, 1987; Луканин и др., 1995).

Водородный ДВС

В представленной работе было проведено сравнительное численное исследование возможности использования водорода на серийном двигателе внутреннего сгорания. За основу взят бензиновый двигатель ВАЗ 11186 (Двигатель на Лада Гранта...).

Таблица 1. Технические параметры двигателя ВАЗ 11186

Параметры	Значение
Тип двигателя по способу воспламенения рабочей смеси	Искровой
Тип двигателя по роду применяемого топлива	Бензин
Наличие или отсутствие наддува	Отсутствует
Тип охлаждения	Жидкостное

Тип топливной системы	Распределенный впрыск топлива
Число клапанов на цилиндр	2
Количество цилиндров и их расположение, порядок работы	4-Р 1-3-4-2
Тактность двигателя	4-тактный
Номинальная эффективная мощность при номинальной частоте вращения	64 кВт при 5100 об/мин
Максимальный крутящий момент	140 Нм при 3800 об/мин
Минимальная частота вращения коленчатого вала	850 об/мин
Степень сжатия	10,5
Диаметр цилиндра	82 мм
Ход поршня	75,6 мм
Рекомендуемое топливо	АИ-95
Рабочий объем цилиндров	1597

1. Тепловой расчет производился для трех видов топлив: бензин, пропан, водород, при номинальной частоте вращения коленчатого вала 5100 об/мин и коэффициенте $\alpha=1$.

Таблица 2. Эффективные показатели двигателя ВАЗ 11186 на разном топливе

Вид топлива	Бензин	Пропан	Водород (детонация)
Индикаторный КПД	0.385	0.565	0.281
Механический КПД	0.845	0.844	0.840
Эффективная мощность	66,12 кВт	65.95 кВт	63.8 кВт
Эффективный КПД	0.325	0.477	0.236
Эффективный удельный расход	251.8 г/кВт*ч	158.7 г/кВт*ч	113.1 г/кВт*ч

Из **Таблицы 2** видно, что наиболее рациональное использование пропана, но водород выигрывает с позиции экологически чистого топлива. Проведено еще одно исследование, что бы проверить, как можно повысить показатели ДВС на водороде.

2. Тепловой расчет ДВС на водороде при разных α .

Таблица 3. Эффективные показатели двигателя ВАЗ 11186 при различных α

Альфа	1	1,5	2	3
Индикаторный КПД	0.281	0.476	0.561	0.842
Механический КПД	0.840	0.840	0.840	0.840

Эффективная мощность	63.8 кВт	63.8 кВт	63.8 кВт	63.8 кВт
Эффективный КПД	0.236	0.4	0.471	0.707
Эффективный удельный расход	113 г/кВт*ч	66.7 г/кВт*ч	56.6 г/кВт*ч	37.7 г/кВт*ч

С коэффициентом $\alpha=3$ получены наиболее высокие эффективные показатели, а так же мы имеем высокое (около 110) октановое число.

Далее было проведено исследование по выявлению наилучшего угла опережения зажигания для двигателя ВАЗ 11186 работающего на водороде. Представлены данные теплового расчета при разных углах опережения зажигания.

Таблица 4. Эффективные показатели при различных углах зажигания

Угол опережения зажигания	25	30	34	35
Индикаторный КПД	0.824	0.842	0.846	0.846
Механический КПД	0.836	0.840	0.840	0.840
Эффективная мощность	62.2 кВт	63.8 кВт	64.2 кВт	64.1 кВт
Эффективный КПД	0.689	0.707	0.711	0.711
Эффективный удельный расход	38.6 г/кВт*ч	37.7 г/кВт*ч	37.4 г/кВт*ч	37.5 г/кВт*ч

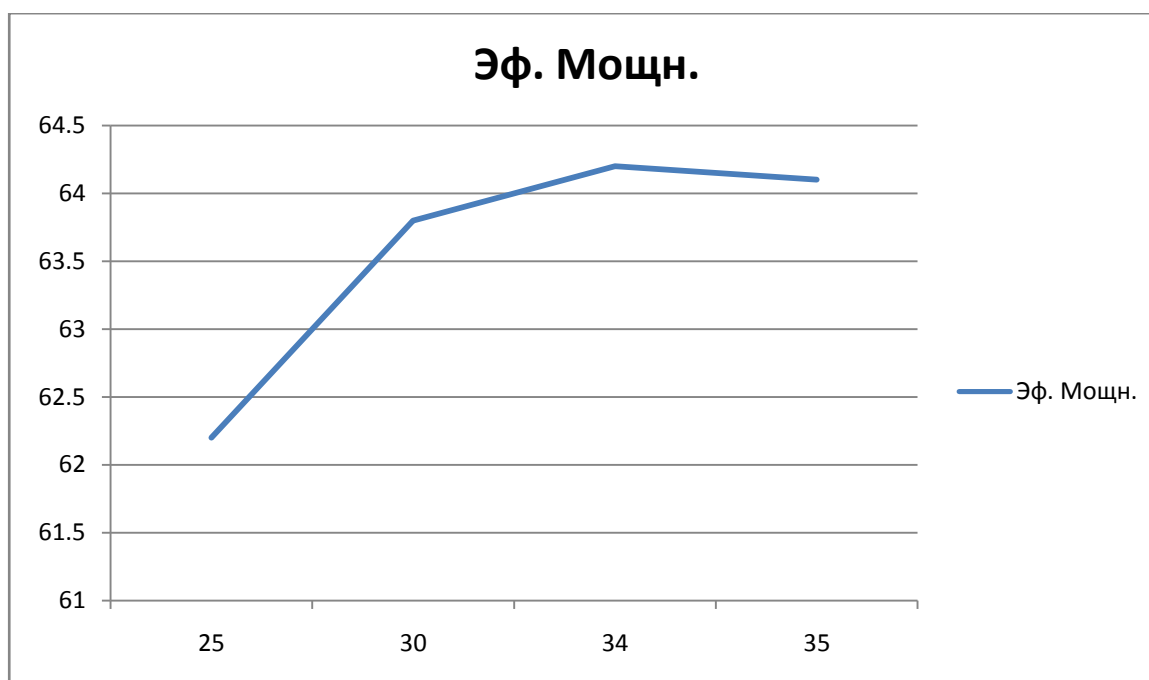


Рис. 2. График зависимости мощности от угла опережения зажигания

Максимальная мощность зафиксирована при угле опережения зажигания 34° , далее наблюдается ее спад. Максимальный Эффективный КПД достиг 0,711.

4. Заключение

Исходя из представленных теоретических расчетов двигателя ВАЗ 11186, для экспериментального водородного автомобиля Лада Гранта, можно отметить, что применение водорода представляется выгодным не только с точки зрения экологии, но и с точки зрения повышения его эффективных показателей. А с учетом, того, что имеющиеся технологические трудности производства и хранения водорода будут решены уже в ближайшем будущем, перспективы широкого применения водорода, в том числе и на автотранспорте вполне реальны.

Литература

[Бухмиров, 2014](#) – Бухмиров, В.В. Тепломассообмен: Учеб. пособие. ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2014. 360 с.

[Двигатель внутреннего сгорания...](#) – Двигатель внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dok.opredelim.com/docs/index-12892.html> (дата обращения 18.05.2017).

[Двигатель на Лада Гранта...](#) – Двигатель на Лада Гранта: характеристики, неисправности и тюнинг. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dvigatels.ru/russia/dvigatel-lada-granta.html> (дата обращения: 18.05.2017).

[Егоров, 1987](#) – Егоров, А.И. Качественный анализ рабочих процессов в ДВС с помощью дифференциальных уравнений. Запорожье 1987. 11 с.

[Егоров, 1987](#) – Егоров, А.И. Система безразмерных дифференциальных уравнений для расчета и анализа процессов в ДВС. Запорожье 1987. 9 с.

[Колчин, Демидов, 2008](#) – Колчин, А.И., Демидов, В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. 4-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2008. 496 с.

[Луканин и др., 1995](#) – Луканин, В. Н., Морозов, К. А., Хачиян, Л. С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учеб. Под ред. В.Н. Луканина. М.: Высш. шк., 1995. 368 с.

Мищенко, 1984 – Мищенко, А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Наук. Думка. 1984. 143 с.

СССР: водородное топливо... – СССР: водородное топливо в блокадном Ленинграде [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.liveinternet.ru/users/ugolieok/post308974088/> (дата обращения 18.05.2017).

Шаманов, Калмыков, 2006 – Шаманов, Н.П., Калмыков, А.Н. Электрохимические транспортные энергоустановки с водородным топливом. Монография. СПбГМТУ. СПб., 2006. 306 с.

References

Bukhmirov, 2014 – Bukhmirov, V.V. Teplomassoobmen: Ucheb. posobie. FGBOUVPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina». Ivanovo, 2014. 360 p.

Dvigatel' vnutrennego sgoraniya... – Dvigatel' vnutrennego sgoraniya [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://dok.opredelim.com/docs/index-12892.html> (data obrashcheniya 18.05.2017).

Dvigatel' na Lada Granta... – Dvigatel' na Lada Granta: kharakteristiki, neispravnosti i tyuning. [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://dvigatels.ru/russia/dvigatel-lada-granta.html> (data obrashcheniya: 18.05.2017).

Egorov, 1987 – Egorov, A.I. Kachestvennyi analiz rabochikh protsessov v DVS s pomoshch'yu differentsial'nykh uravnenii. Zaporozh'e 1987. 11 p.

Egorov, 1987 – Egorov, A.I. Sistema bezrazmernykh differentsial'nykh uravnenii dlya rascheta i analiza protsessov v DVS. Zaporozh'e 1987. 9 p.

Kolchin, Demidov, 2008 – Kolchin, A.I., Demidov, V.P. Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei: Ucheb. posobie dlya vuzov. 4-e izd., ster. M.: Vyssh. shk., 2008. 496 p.

Lukanin i dr., 1995 – Lukanin, V. N., Morozov, K. A., Khachiyani, L. S. i dr. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov: Ucheb. Pod red. V.N. Lukanina. M.: Vyssh. shk., 1995. 368 p.

Mishchenko, 1984 – Mishchenko, A.I. Primenenie vodoroda dlya avtomobil'nykh dvigatelei. Naук. Dumka. 1984. 143 p.

СССР: водородное топливо... – СССР: водородное топливо в блокадном Ленинграде [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.liveinternet.ru/users/ugolieok/post308974088/> (data obrashcheniya 18.05.2017).

Shamanov, Kalmykov, 2006 – Shamanov, N.P., Kalmykov, A.N. Elektrokhimicheskie transportnye energoustanovki s vodorodnym toplivom. Monografiya. SPBGMTU. SPb., 2006. 306 p.

Двигатель рабочим объемом 1,6 литра, работающий на водороде и бензине

Николай Владимирович Кошечев ^a

^a Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Российская Федерация

Аннотация. Проведены исследования эффективных показателей двигателя внутреннего сгорания на разных топливах. Исследованы эффективные показатели двигателя при разных составах смеси и углах опережения зажигания при работе двигателя на водороде. Представлены расчетные данные: таблицы и графики по исследованиям.

Ключевые слова: коэффициент избытка воздуха альфа, эффективный КПД, удельный расход топлива, детонационная стойкость.