

## ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ БЕНЗОВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ БЕНЗИН — ВОДОРОД

Л. Н. Бортников

Тольяттинский государственный университет, 445667 Тольятти, lnort@yandex.ru

Приведены результаты анализа экспериментальных данных, полученных при исследовании сжигания бензоводородовоздушной смеси в цилиндре поршневого двигателя. Показана зависимость полноты сгорания смеси от количества водорода в топливной композиции, ее состава и физико-химических свойств, в частности, определены условия добавок водорода в бензовоздушную смесь с активным химическим действием на процесс горения и действием водорода как дополнительного горючего компонента. Предложена безразмерная универсальная зависимость, позволяющая однозначно определять исходный состав топливной композиции (соотношение водорода и бензина) для обеспечения процесса сжигания топливной смеси на бедной границе горения.

Ключевые слова: углеводородное топливо, водород, топливная смесь, коэффициент избытка воздуха, горение, границы горения.

Анализ мировых запасов энергетических ресурсов показывает, что наиболее перспективным топливом, альтернативным органическим, следует считать водород. В настоящее время его широкому распространению препятствуют высокая стоимость производства и неразвитость инфраструктуры [1–4].

Применению водорода в тепловых установках, в частности в двигателях внутреннего сгорания (ДВС), уделялось достаточно большое внимание (см. [3–13]). Однако результаты выполненных исследований не были обобщены до уровня методик, необходимых для проведения технических расчетов при конструкторской разработке соответствующих установок. Это связано со сложностью процессов горения водорода и особенно его смесей с углеводородными топливами, которые, несмотря на большой объем исследований, остаются недостаточно изученными. Вследствие этого в каждом конкретном случае требуется предварительное проведение экспериментальных исследований, что сдерживает применение водорода.

В связи с этим исследование закономерностей горения бензоводородных композиций и получение соответствующих обобщений, позволяющих выполнять расчетный анализ показателей разрабатываемого изделия, является актуальной задачей [1, 10, 14].

Применение водорода в энергетических установках возможно как в чистом виде, так и в виде добавок к углеводородному топливу. Учитывая современный уровень технологии, второй способ применения водорода предпочтительнее. Кроме того, применение чистого водорода требует существенных доработок двигателя, связанных, например, с компенсацией снижения его мощности вследствие малой плотности водорода.

При организации горения в цилиндре поршневого ДВС в зависимости от коэффициента избытка воздуха выделяют составы, обеспечивающие максимальную мощность двигателя и максимальную его экономичность («мощностной» и «экономичный» составы). Каждому составу топливной смеси соответствуют свои значения «мощностного» и «экономичного» коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ . В связи с этим необходимо знание концентрационных границ устойчивого горения бензоводородовоздушных композиций в пределах изменения состава топлива от бензина ( $H_2 = 0$ ) до водорода ( $H_2 = 100\%$ ).

Для определения границ горения применяются расчетные и экспериментальные методы. В частности, важная для практики нижняя граница может быть определена из принципа Ле-Шателье. При этом требуются знание полного химического состава топливной смеси и оценка справедливости допущения об отсутствии химических реакций между отдельными

ми компонентами смеси (аддитивность смеси), что является сложной задачей. Поэтому расчетные результаты в каждом конкретном случае принято уточнять экспериментальным методом.

В работе [7] представлены результаты исследования нижней границы устойчивого горения бензоводородовоздушных смесей в поршневом ДВС с содержанием водорода до 100 %. На рис. 1 приведено сравнение этой зависимости с экспериментальными данными, полученными нами при испытаниях поршневого ДВС с рабочим объемом 1.5 л и степенью сжатия  $\varepsilon = 9.9$  при различных режимах работы. Эксперименты проводились в следующей последовательности: при работе ДВС на бензине устанавливался определенный скоростной и нагрузочный режим работы двигателя (при оптимальных значениях угла опережения зажигания), после чего подавался водород и путем корректировки частоты вращения вала двигателя, нагрузки и опережения зажигания восстанавливался исходный режим работы ДВС, чем обеспечивалось постоянство мощности.

Относительная массовая доля водорода в топливе бензин — водород и коэффициент избытка воздуха определялись по формулам

$$\psi = \frac{H}{H + G}, \quad (1)$$

где  $H$  — количество (массовый расход) добавляемого водорода,  $G$  — расход углеводородного топлива (бензина) при данном значении  $H$ ,

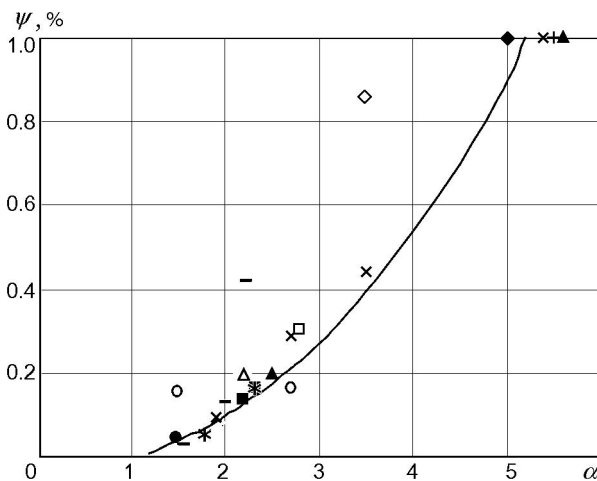


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных (точки) с нижней границей устойчивого горения по [7] (линия)

$$\alpha = \frac{G_a}{Gl_{0G} + Hl_{0H}},$$

где  $G_a$  — расход воздуха,  $l_{0G}$  и  $l_{0H}$  — стехиометрические коэффициенты для бензина и водорода соответственно.

Хорошее соответствие результатов, представленных на рис. 1, позволяет сделать вывод об идентичности полученных в разных испытаниях результатов и принять зависимость рис. 1 за основу в дальнейшем рассмотрении.

При  $\psi$  больше значения, определяемого линией рис. 1 для данного  $\alpha$ , горение будет устойчивым, а при меньших значениях, обусловленных главным образом уменьшением скорости распространения пламени и обрыва цепей химических реакций, горение будет неустойчивым, что выражается в снижении полноты сгорания и, как следствие, повышении содержания в продуктах сгорания углеводородов, начало возрастания концентрации которых, так же как и расхода бензина, принималось за границу устойчивости горения [7, 14].

Практическое значение зависимости  $\psi = f(\alpha)$  заключается в том, что она позволяет определять нижнюю границу (бедный предел) устойчивого горения различных топливных композиций (по соотношению бензин — водород).

Однако график рис. 1 получен и имеет физический смысл для значений  $\alpha$ , соответствующих нижней границе устойчивого горения бензиновой смеси, которые для поршневых ДВС равны  $\alpha \approx 1.15 \div 1.2$  [14]. Вместе с тем понятно, что добавки водорода будут действовать на процесс горения и при значениях  $\alpha$ , меньших указанного диапазона, что не находит отражения в зависимости  $\psi = f(\alpha)$ . Таким образом, данная зависимость не предоставляет возможности провести качественную или количественную оценку влияния водорода на горение бензоводородовоздушной смеси при  $\alpha < 1.15 \div 1.2$ .

Кроме того, входящие в формулу (1) величины  $H$  и  $G$ , характеризующие топливную композицию, удовлетворяющую требованиям максимальной экономичности, в каждом конкретном случае определяются опытным путем, так как зависимость текущего расхода топлива от количества добавляемого водорода в общем виде  $G = f(H)$  неизвестна. Для разработки расчетной методики определения состава оптимальной топливной композиции данную функцию находим на основе анализа резуль-

татов экспериментальных исследований. При этом использовался следующий подход.

Из опытных данных известно, что добавка водорода к бензину в поршневых ДВС при постоянных значениях  $\alpha$  и постоянной мощности приводит к снижению расхода углеводородного топлива и общего количества тепла, подведенного с топливом. Тогда количество подведенной с топливом теплоты для произвольного режима работы ДВС на углеводородном топливе и топливе с добавкой водорода можно записать в следующем виде:

$$Q_p = \beta G_0 H_{uG}, = G H_{uG} + H H_{uH},$$

где  $\beta$  — параметр, учитывающий уменьшение расхода углеводородного топлива,  $G_0$  — расход топлива (бензина) при горении без водорода,  $H_{uG}$ ,  $H_{uH}$  — низшие теплотворные способности бензина и водорода. Отсюда

$$\beta = \frac{G H_{uG} + H H_{uH}}{G_0 H_{uG}} = \frac{G + k H}{G_0}, \quad (2)$$

где  $k = H_{uH}/H_{uG} = 2.73$ .

Видно, что параметр  $\beta$  представляет собой отношение количества теплоты, выделяющейся при полном сгорании смеси бензина с водородом, к теплоте, выделяющейся при полном сгорании бензина, при совершении одинаковой работы и одинаковом значении  $\alpha$ , а все входящие в него величины могут быть определены экспериментально.

На рис. 2 представлены результаты обработки в соответствии с формулой (2) экспериментальных данных, полученных при разных

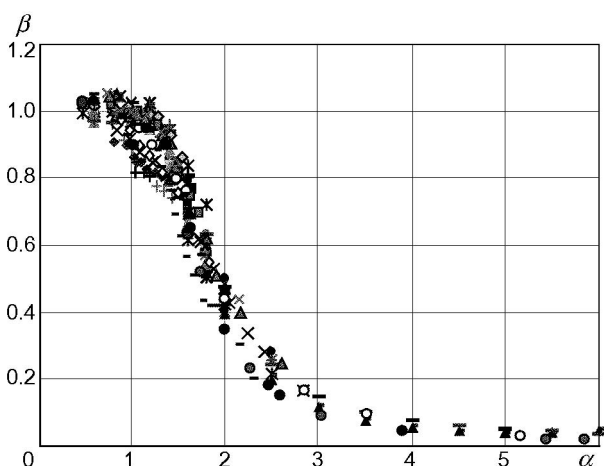


Рис. 2. Изменение параметра  $\beta$

режимах работы ДВС. Проводилась аппроксимация зависимости  $G_0(\alpha)$  полиномом второго порядка, и на основе этого выполнялась экстраполяция на значения  $\alpha$ , большие предела устойчивого горения бензина.

Расположение экспериментальных точек на рис. 2 свидетельствует о наличии взаимосвязи  $\beta$  и  $\alpha$  вне зависимости от физического расхода бензина и водорода, т. е. режима работы двигателя.

Вместе с тем на рис. 2 наблюдается значительный разброс точек в диапазоне  $\alpha = 0.9 \div 1.5$ , который не может быть объяснен только погрешностью измерений. Погрешность оценивалась методом повторных измерений при постоянном режиме работы двигателя, доверительной вероятности 0.95 и составила 4 % при  $\alpha = 1.0$  и 6 % при  $\alpha = 2.0$ .

Как показал анализ, в этой области изменения  $\alpha$  расположение точек определяется режимом работы двигателя: в частности, в опытах с низкой частотой вращения вала двигателя и малой нагрузкой (дрессельные режимы) при постоянных значениях  $\alpha$  и относительно малых расходах водорода точки группируются в нижней части границы разброса, а при нагрузочных или более скоростных режимах — в верхней ее части. При этом при работе на дрессельных режимах увеличение расхода водорода выше некоторого значения, характеризуемого величиной  $\psi = 0.03 \div 0.05$ , всегда приводит к увеличению  $\beta$ . Учитывая особенности подготовки и горения топливной смеси в поршневом ДВС на различных режимах, можно предположить, что на величину  $\beta$  оказывает влияние химический состав и качество подготовки топливной смеси (наличие и количество в смеси остаточных продуктов сгорания, равномерность смеси, турбулентность заряда).

Следует отметить, что в условиях проведенных испытаний раздельное исследование забаллоствированности смеси продуктами сгорания, влияния равномерности и турбулентности смеси не представляется возможным. Поэтому обсуждаемые результаты основаны на анализе их результирующего действия.

Для иллюстрации влияния химического состава смеси и турбулентности на рис. 3 приведены экспериментальные точки (для наглядности соединенные линиями) при фиксированных значениях  $\alpha$  и работе двигателя на дрессельных режимах. Видно, что при увеличе-

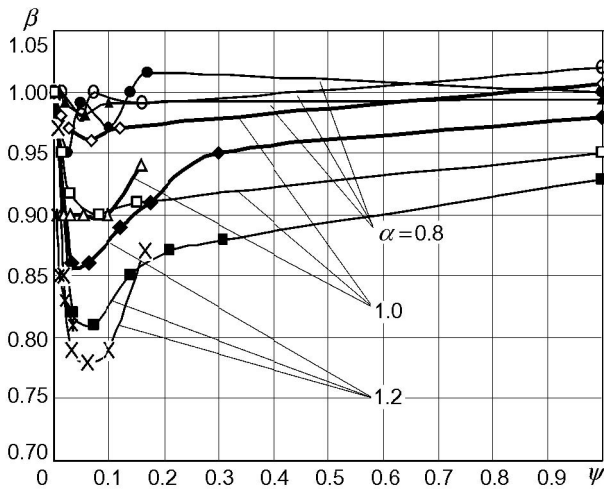


Рис. 3. Изменение параметра  $\beta$  в зависимости от количества водорода в смеси

нии  $\psi$  от 0 до  $\approx 0.03 \div 0.05$  значение  $\beta$  при добавках водорода резко уменьшается, а затем начинает возрастать. По этой причине в диапазоне  $\alpha = 0.9 \div 1.5$  (см. рис. 2) наблюдается значительный разброс экспериментальных точек, так как при одинаковых значениях  $\alpha$  увеличение количества водорода в смеси приводит сначала к уменьшению  $\beta$ , а затем к его росту. Отметим, что такой результат находится в соответствии с известными данными об аномально сильном влиянии на горение достаточно малых количеств добавляемого в топливо вещества и о последующем снижении эффекта при увеличении добавок [12, 14].

При  $\psi = 1$  и  $0.8 < \alpha < 1.2$ , как следует из данных рис. 3 и данных, полученных на других режимах работы ДВС, в том числе и при высоких частоте вращения вала и нагрузке, параметр  $\beta$  несколько меньше 1. Данный факт свидетельствует о большей степени использования теплоты сгорания водорода по сравнению с бензином, что количественно отражается значением параметра  $\beta$ . Так, из формулы (2) при  $G = 0$  получаем

$$\beta = \frac{kH}{G_0} = \frac{H_{uH}H}{H_{uG}G_0},$$

откуда следует, что значение  $\beta < 1$  реализуется при совершении одинаковой работы, когда количество подведенной с топливом теплоты при работе ДВС на водороде меньше, чем при работе на бензине. Следует отметить, что аналогичный вывод сделан и в работе [6], где показано, что эффективность ДВС, определяе-

мая его КПД при работе на водороде, несколько выше, чем при работе на бензине. Однако в связи с малостью данного эффекта (среднее значение  $\beta$  при  $\psi = 1$  в проведенных исследованиях составило  $\approx 0.95$ ) в практических приложениях им можно пренебречь.

Таким образом, снижение расхода углеводородного топлива при малых добавках водорода ( $\psi \approx 5\%$ ) в условиях повышенного содержания остаточных продуктов сгорания в топливной смеси и низкой турбулентности заряда является следствием влияния водорода как химически активной добавки и может количественно оцениваться параметром  $\beta$ .

В частности, из формулы (2) следует соотношение

$$G = \beta G_0 - kH, \quad (3)$$

откуда видно, что снижение расхода бензина определяется величиной  $\beta$  и количеством  $H$  добавляемого в смесь водорода. При этом  $\beta$  определяет в данном случае активность добавки водорода как вещества, влияющего на химические процессы, что дополнительно к простому замещению углеводородного топлива (которое учитывается параметром  $kH$ ) снижает расход бензина.

Данное обстоятельство позволяет установить, что в диапазоне  $\alpha = 0.9 \div 1.5$  введение малых добавок водорода в определенных условиях может значительно снижать расход бензина. Так, проведенные по формуле (3) расчеты показывают, что при  $\psi = 2 \div 5\%$  на дроссельных режимах работы ДВС при малых нагрузках, например при  $\alpha = 1.0$ , за счет изменения  $\beta$  можно получить такое же снижение расхода бензина, как и при  $\psi = 10 \div 15\%$ . Данный факт целесообразно учитывать на практике для минимизации добавок водорода и анализа причин увеличения расхода углеводородного топлива с ростом в некотором диапазоне добавок водорода (см. рис. 3).

Анализ экспериментальных данных, соответствующих работе ДВС на повышенных оборотах и при высокой нагрузке, показывает, что в данном случае величина  $\beta$  остается постоянной до значения  $\alpha = 1.2$  (верхняя часть полосы разброса точек на рис. 2), после чего начинает резко снижаться.

Таким образом, данные рис. 2 позволяют предположить наличие двух возможных предельных кривых, характеризующих эффект действия добавок водорода, зависящих от хи-

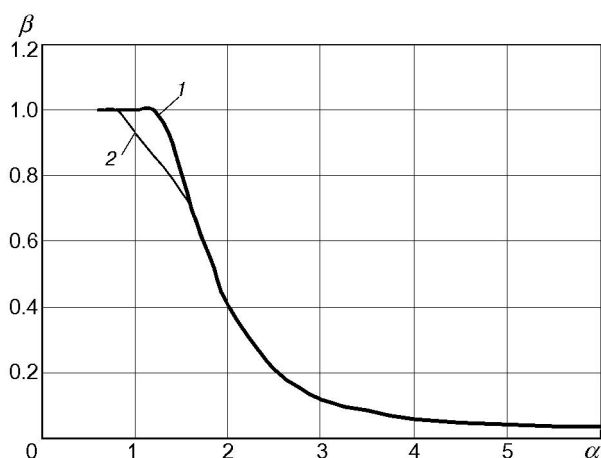


Рис. 4. Предельные графики изменения параметра  $\beta$

мического состава и физических свойств смеси, которые при аппроксимации экспериментальных данных, например, полиномом Чебышева могут быть представлены в виде кривых, приведенных на рис. 4.

Линия 1 на рис. 4, представляющая аппроксимацию экспериментальных данных, полученных на режимах с относительно высокой частотой вращения вала двигателя при повышенной нагрузке, характеризует действие добавок водорода при малом количестве продуктов неполного сгорания в исходном составе бензоводородовоздушной смеси и высокой степени турбулентности заряда. Линия 2, соответствующая аппроксимации данных, полученных на режимах с низкой частотой вращения вала и при малых нагрузках, представляет границу максимально возможного снижения расхода бензина при использовании водорода в качестве активной добавки и соответствует случаям с относительно большим содержанием остаточных продуктов сгорания в смеси и более низким уровнем качества смешения и турбулентности [14].

Понятно, что между линиями 1 и 2 (см. рис. 4) может находиться множество кривых, соответствующих определенному составу топливной композиции и режиму работы двигателя, что и обуславливает увеличение разброса экспериментальных точек в диапазоне  $0.8 < \alpha < 1.5$  (см. рис. 2). Следует отметить, что интерес для практики представляют условия наиболее эффективного использования химической энергии топлива, т. е. условия, соответствующие кривой 2. Поэтому дальнейшее рассмот-

рение проводилось для топливных композиций, удовлетворяющих этой кривой.

Линия 2 на рис. 4 в области  $0.8 < \alpha < 1.5$  соответствует меньшим значениям  $\beta$  и, следовательно, согласно формуле (3) большему снижению расхода углеводородного топлива, чем в случае смеси, удовлетворяющей условиям кривой 1.

Из рис. 2–4 видно, что с обогащением смеси эффективность добавок водорода как активирующего компонента всегда уменьшается. При  $\alpha = 0.8$  дополнительная подача водорода, в пределах погрешностей измерений, практически не влияет на величину  $\beta$ , что можно объяснить избытком горючих компонентов в смеси и неучастием водорода в химических реакциях. Данный вывод соответствует известному факту увеличения концентрации водорода в продуктах сгорания по мере обогащения топливной смеси.

При добавках водорода в качественно подготовленную бензовоздушную смесь с малым количеством остаточных газов расход углеводородного топлива изменяется в соответствии с линией 1 на рис. 4. Поэтому снижение расхода бензина в диапазоне  $\alpha = 0.8 \div 1.2$  и  $\beta = 1$  определяется только увеличением количества водорода (см. формулу (3)).

В области  $\alpha > 1.2$  снижение расхода бензина происходит при изменении  $\beta$  и одновременном замещении углеводородного горючего компонента водородом (формула (3) и рис. 2–4). При этом в диапазоне  $\alpha = 1.2 \div 2.5$  наблюдается наибольшее уменьшение расхода и параметра  $\beta$ , что определяется главным образом расширением границ устойчивого горения бензоводородосодержащих смесей (см. рис. 1). Малые добавки водорода в этом диапазоне  $\alpha$  приводят к значительному расширению пределов горения, а при  $\psi \geq 0.2 \div 0.3$  интенсивность увеличения  $\alpha$  снижается.

Изменение  $\beta$  имеет аналогичный характер. В частности, снижение  $\beta$  наиболее существенно (см. рис. 2, 4) в диапазоне  $\alpha = 1.2 \div 2.5$  ( $\beta = 1.0 \div 0.2$ ). Дальнейшее увеличение  $\alpha$  до значений  $\alpha = 5.5 \div 6.5$  соответствует меньшему градиенту снижения  $\beta$ .

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет заключить, что параметр  $\beta$  может использоваться для определения оптимального соотношения бензин — водород в топливной композиции, отвечающей условию устойчивого горения на бедной границе. В

частности, из системы уравнений (1), (2) можно получить следующие выражения:

$$G = \frac{\beta G_0(1 - \psi)}{1 + 1.73\psi}, \quad (4)$$

$$H = \frac{\psi\beta G_0}{1 + 1.73\psi}, \quad (5)$$

которые позволяют по известному значению  $G_0$  определять количество бензина и водорода в бензоводородовоздушной композиции на нижней границе устойчивого горения в зависимости от количества добавляемого водорода  $\psi$  и параметра  $\beta$ , определяемых величиной  $\alpha$ .

Анализ формулы (4) показывает, что при  $\beta = 1$  в диапазоне  $\alpha = 0.8 \div 1.2$  (линия 1 на рис. 4) изменение расхода бензина обусловлено его исходным значением  $G_0$  и добавками водорода  $\psi$ , а при  $\alpha > 1.2$  — еще и законом изменения  $\beta$ , который, как показано выше, описывается обобщенной зависимостью. На рис. 5 в качестве примера приведены результаты расчетов и экспериментов при  $\alpha = \text{const}$  и  $\beta = 1$ . Видно удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных. Из рисунка также следует, что расход углеводородного топлива монотонно уменьшается с ростом  $\psi$ , что определяется, как указывалось выше, простым замещением углеводородного компонента водородом.

При наличии в смеси остаточных газов и низкой турбулентности заряда параметр  $\beta$  во всем диапазоне  $\alpha$ , как показано выше (линия 2

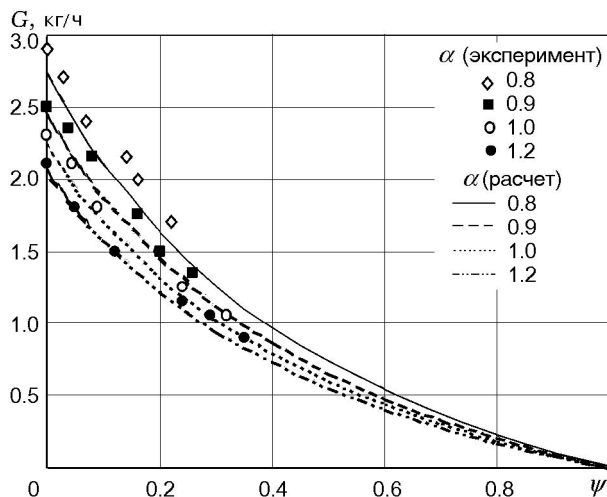


Рис. 5. Изменение расхода бензина при добавке водорода и  $\beta = 1$

на рис. 4), является переменной величиной. Результаты расчета изменения расхода бензина для этого случая при разных значениях  $\alpha$  приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что расчетные данные удовлетворительно соответствуют опытным. С увеличением  $\alpha$  при малых добавках водорода расход бензина резко снижается до тех пор, пока коэффициент избытка воздуха не достигает значений  $\alpha = 1.1 \div 1.3$ . Затем с ростом  $\alpha$  темп снижения заметно уменьшается и далее с некоторого значения, определяемого границей устойчивого горения, начинает возрастать. При этом существенно расширяются границы устойчивого горения при относительно малом изменении расхода бензина.

Данные результаты (см. рис. 5, 6) позволяют сделать вывод о том, что при горении любой бензоводородовоздушной смеси (вплоть до чистого водорода) в цилиндре поршневого ДВС минимальный расход бензина отмечается при  $\alpha = 1.2$ . При дальнейшем увеличении  $\alpha$  расход топлива остается практически постоянным (в пределах погрешности выполненных измерений) вплоть до предела обеднения, а затем резко увеличивается. Отметим, что при  $\alpha > 1.2$ , практически постоянном расходе бензина, определяемом формулой (4), и постоянной мощности горение бензоводородовоздушной смеси вплоть до границы устойчивого горения сопровождается, как известно, значительным изменением состава отработанных газов [7].

Основные результаты настоящей работы можно сформулировать следующим образом:

— действие добавок водорода на процесс

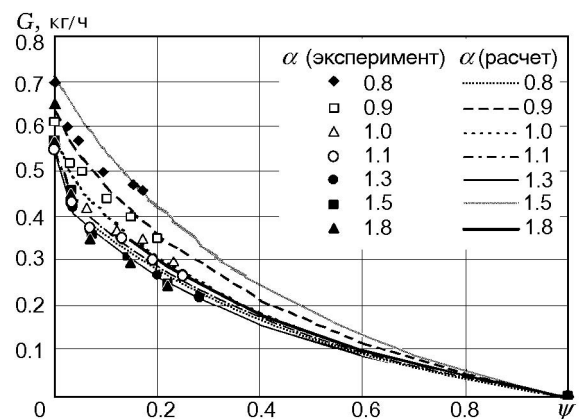


Рис. 6. Изменение расхода бензина при добавке водорода и меняющемся значении параметра  $\beta$

горения бензовоздушных смесей в цилиндре ДВС существенно зависит от качества подготовки смеси и наличия в ней остаточных продуктов сгорания. В частности, на дроссельных режимах работы ДВС добавка водорода в количестве 3 ÷ 5 % от расхода бензина может снижать расход бензина так же, как и добавка 10 ÷ 15 % водорода;

— в результате обобщения экспериментальных данных предложен безразмерный параметр, отражающий особенности горения бензоводородовоздушных смесей, в частности, при малых добавках водорода и расширение нижней границы устойчивого горения при изменении количества водорода в исходной топливной композиции до 100 %;

— на основе экспериментально полученной обобщенной зависимости предложена методика расчета количества горючих компонентов в смеси (бензина и водорода), позволяющая определять состав топливной композиции для сжигания на нижней границе устойчивого горения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кнорре В. Г., Махов В. З.** Развитие научных исследований горения в ДВС // Концепция развития горения и взрыва как области научно-технического прогресса. Черногловка, 2001. С. 116–122.
2. **Водород.** Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. / Д. Ю. Гамбург, Н. Ф. Дубовкин и др. М.: Химия, 1986.
3. **Перспективные автомобильные топлива:** Виды, характеристики, перспективы: Пер. с англ. А. П. Чочия / Под ред. Я. Б. Чертова. М.: Транспорт, 1982.
4. **Труды** Международного симпозиума по водородной энергетике. Москва, 1–2 ноября 2005 г. М.: МЭИ, 2005.
5. **Аннушкин Ю. М., Маслов Г. Ф.** Эффективность горения водородокеросинового топлива в прямооточном канале // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 30–32.
6. **Хмыров В. И., Лавров Б. Е.** Водородный двигатель. Алма-Ата: Наука, 1981.
7. **Мищенко А. И.** Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наук. думка, 1984.
8. **Бортников Л. Н., Русаков М. М., Шайкин А. П. и др.** Экспериментальные и расчетные исследования горения бензовоздушной смеси с добавками водорода в современных двигателях // Химическая физика процессов горения и взрыва: XII Симпозиум по горению и взрыву, 11–15 сентября 2000. Черногловка, 2000. Ч. III. С. 170–172.
9. **Apostolescu N., Chiriac R.** A study of combustion of hydrogen-enriched gasoline in spark initiation engine // SAE SP-1157. 1996.
10. **Двигатели** внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей / С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др.; Под общ. ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985.
11. **Hacohen J., Pinhasi G., Puterman Y., Sher E.** Driving cycle simulation of a vehicle motored by a SI engine fueled with H<sub>2</sub> — enriched gasoline // Intern. J. Hydrogen Energy. 1991. V. 16, N 10. P. 695–702.
12. **Ричардс Ж. А., Сойка Р. Е., Лефевр А. Н.** Скорость распространения пламени в факеле топлива при добавлении водорода // Современное машиностроение. Сер. А. 1989. Т. 8. С. 63–69.
13. **Пушкарев А. И., Ремнев Г. Е.** Иницирование окисления водорода импульсным электронным пучком // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 46–52.
14. **Щелкин Л. Н.** Теория горения и взрыва. М.: МГУ, 1957.

*Поступила в редакцию 8/II 2006 г.,  
в окончательном варианте — 26/XII 2006 г.*