

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau



(43) International Publication Date
18 May 2007 (18.05.2007)

PCT

(10) International Publication Number
WO 2007/054774 A2

(51) International Patent Classification: **Not classified**

(21) International Application Number:
PCT/IB2006/003106

(22) International Filing Date:
3 November 2006 (03.11.2006)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
2005 133 953 3 November 2005 (03.11.2005) RU

(71) Applicant (for all designated States except US): **NEQ LAB HOLDING INC.**; Commonwealth Trust Ltd., P.O. Box 3321, Road Town, Tortola (VG).

(71) Applicant and

(72) Inventor: **STARIKOVSKY, Andrey, Yurievich** [RU/RU]; d.9, kv.21, Likhachevsky pr-d, Dolgoprudny, 141700 (RU).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM,

AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

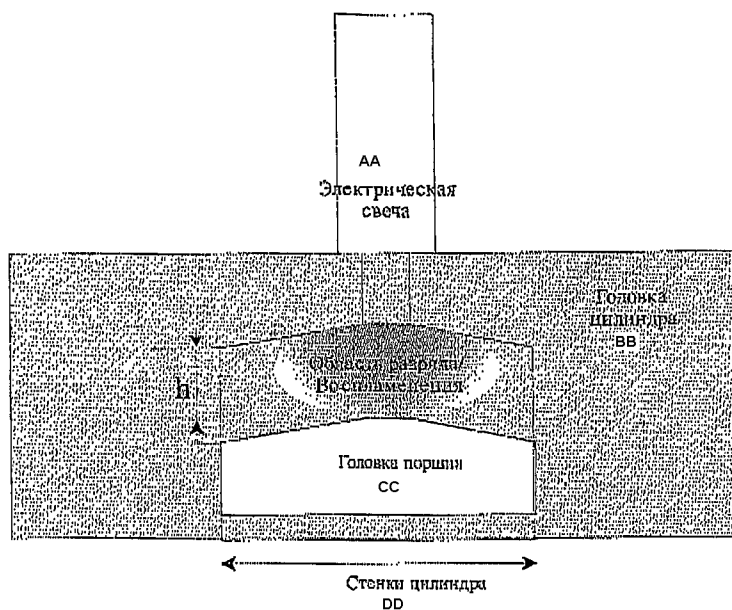
(84) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:

— without international search report and to be republished upon receipt of that report

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: METHOD FOR IGNITING, INTENSIFYING THE COMBUSTION OR REFORMING OF AIR-FUEL AND OXYGEN-FUEL MIXTURES



AA ... SPARK PLUG
BB ... CYLINDER HEAD
CC ... PISTON HEAD
DD ... CYLINDER WALLS

(57) Abstract: The invention relates to power engineering and engine manufacture and can be used for intensifying chemical processes in a combustion mixture by means of a pulsed high-voltage discharge of nanosecond duration in any type of internal combustion engine. In order to reduce the ignition temperature of combustion mixtures, increase intensity of chemical reactions in combustion and reforming processes and to substantially decrease the release of pollutants to the atmosphere, the inventive method consists in stimulating the combustion mixture in a combustion chamber by means of a pulsed high-voltage discharge of nanosecond duration, wherein the discharge amplitude is set up according to a condition of maximising a heat input in electronic degrees of freedom and in a gas dissociation and preventing the passage of plasma electrons to an escape mode at a main discharge stage, the high-voltage pulse leading edge build-up time is limited by the condition of obtaining a homogeneous filling of a discharge gap by plasma and a pulsed energy efficient transmission to the plasma, a high-voltage pulse time is limited by the

condition, wherein a highly-unstable plasma state is attained, the discharge gap resistance is reduced, the discharge gap is better matched to a generator, and an efficient electric power input into the plasma is obtained.

WO 2007/054774 A2

5 **Способ инициирования воспламенения, интенсификации горения или
реформинга топливовоздушных и топливокислородных смесей**

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к машиностроению, а именно к энергетическому
10 машиностроению и двигателестроению, и предназначено для интенсификации
химических процессов в рабочей смеси с использованием импульсно-периодического
наносекундного высоковольтного разряда в двигателях внутреннего сгорания любого
типа, включая, в том числе (но не ограничиваясь), форсажные камеры, камеры сгорания
детонационных двигателей, реактивных двигателей и газотурбинных двигателей, в
15 энергетических горелках и реформерах.

Уровень техники

Известны способы, направленные на повышение эффективности сгорания
рабочей смеси в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания. Наиболее
20 распространены способы, использующие предварительную подготовку рабочей смеси,
в том числе, электроразрядную обработку воздуха, обработку впрыскиваемого топлива
электромагнитным полем, способы, основанные на модернизации электроискрового
зажигания рабочей смеси, причем в последнем случае результат достигается путем
изменения конструкции электросвечей зажигания (SU № 1728521, SU № 1838665, RU
25 2099550).

Известен способ активации процессов горения в двигателе внутреннего
сгорания, позволяющий повысить эффективность и однородность горения рабочей
смеси в двигателях внутреннего сгорания, снизить время индукции горения,
температуру воспламенения и обеспечить регулируемое увеличение скорости
30 распространения фронта горения (RU № 94028477, F02M25/10, 1996). Данный способ
заключается в обработке воздуха, поступающего в двигатель внутреннего сгорания,
системой объемных самостоятельных электрических разрядов с заданными
параметрами.

Недостатками известных способов является требование изменений в конструкции двигателя и в несовершенстве способа воспламенения рабочей смеси обычным электроискровым способом, который не обеспечивает полного сгорания смеси в камерах.

5 Ближайшим аналогом изобретения является способ воспламенения рабочей смеси, реализуемый конструкцией стримерной свечи (RU №2176122, Н01Т13/20, 2001). В этом изобретении используется явление стримера для увеличения интенсивности ионизации в зоне возникновения основного электрического разряда путем создания благоприятных условий устойчивого искрообразования. Для решения этой задачи
10 прикладывают напряжение между центральным электродом и боковыми электродами свечи, что обеспечивает ионизацию пространства между ними. При этом вблизи изолятора центрального электрода формируется стример, усиливается ионизационное поле в зоне, ограничиваемой ветвями пускового электрода массы, и создается электрический разряд между центральным электродом и искроприемной поверхностью
15 главной части электрода массы. Изобретение обеспечивает устойчивость работы двигателя внутреннего сгорания на всех возможных режимах в эксплуатации, включая мотоциклетные энергосистемы.

Описанный выше аналог имеет ограниченное применение, так как предназначен для использования только в бензиновых двигателях (автомобильных и мотоциклетных).

20

Раскрытие изобретения

Реакция окисления топлива протекает по разветвленному цепному механизму.

Из теории разветвленных радикально-цепных реакций известно следующее.

1. Элементарные стадии. Характерным признаком цепных реакций является то
25 обстоятельство, что расходование реагентов и образование конечных продуктов происходит путем чередования периодически повторяющихся элементарных стадий, в которых взаимодействие частицы исходного вещества с активной частицей приводит к образованию молекулы продукта реакции и новой активной частицы [6]. Под активной частицей следует понимать частицу со свободной валентной связью (свободные атомы
30 и радикалы; в этом случае принято говорить о радикальных, или химических, цепях) либо валентно-насыщенную частицу в возбужденном энергетическом состоянии (в таком случае речь пойдет об энергетических цепях).

Классифицируя элементарные стадии цепных реакций, можно выделить четыре момента: зарождение цепи (иницирование), продолжение цепи, разветвление цепи, стадия обрыва цепи. Реакция продолжения цепи (реакция между молекулами и радикалами), в результате которой одновременно происходит образование продукта и
5 появление новой активной частицы, протекает достаточно быстро. Наиболее энергоемкой стадией цепного процесса является реакция инициирования (первичного образования активных частиц) [7].

Цепные разветвленные реакции кроме стадий зарождения, продолжения и обрыва цепей в обязательном порядке включают стадию разветвления цепей. При
10 разработке заявленного изобретения рассматривались CH_4 - C_5H_{12} и H_2 - содержащие смеси, воспламенение которых, согласно теории Н.Н.Семенова, происходит по разветвленному радикально-цепному механизму [5]. Цепная разветвленная реакция отличается от неразветвленной тем, что при ее протекании происходит передача энергии на эндотермические стадии за счет экзотермических. Данная энергия может
15 запасаться в ходе реакции либо в виде химической энергии атомов и свободных радикалов, либо в виде энергии возбужденных молекул [8].

2. Период индукции. Разветвленная цепная реакция может протекать в двух режимах. Если скорость обрыва цепей превышает скорость их разветвления, концентрация активных центров квазистационарна. В противном случае, когда
20 скорость разветвления становится больше скорости гибели атомов и радикалов, происходит лавинообразное нарастание активных частиц, и через некоторое время практически полное отсутствие реакции сменяется взрывным ее протеканием [6]. Период, в течение которого происходит наработка радикалов, и практически не изменяется температура и давление, называется временем индукции (временем задержки) воспламенения.
25

3. Создание начальной концентрации активных центров. Реакцией, лимитирующей развитие горения, является образование активных центров. В случае окисления, протекающего по разветвленному радикально-цепному механизму, стадия инициирования оказывает значительное влияние на скорость горения на начальных
30 этапах воспламенения смеси. Высокая энергия активации при диссоциации молекул исходных веществ приводит либо к увеличению времени индукции воспламенения, либо к полному отсутствию горения. Повышение температуры газовой горючей смеси,

влечет за собой увеличение скорости термической диссоциации и рост количества активных частиц (в таком случае зарождение химических цепей практически неизбежно). Таким образом, ввод небольшого количества атомов и радикалов искусственным образом, т.е. минуя реакцию инициирования, должен вести к увеличению скорости реакции, а также обеспечить ее протекание при более низких начальных температурах [5].

4. Образование активных частиц в газе при воздействии разряда. При использовании газового разряда для инициирования воспламенения рассматривают две возможности воздействия на газ. В случае разряда, ведущего к образованию равновесной или почти равновесной плазмы (искровой разряд, дуга) основным фактором, провоцирующим развитие цепной реакции горения, является локальный нагрев газа и повышение скорости термической диссоциации [9], [10]. При использовании барьерного разряда, а также ВЧ и СВЧ разрядов могут протекать неравновесные плазмохимические процессы. В неравновесной газоразрядной плазме [11] степень ионизации достигает 10^{-4} - 10^{-1} , средняя энергия электронов (1-10 эВ) значительно превышает среднюю поступательную энергию тяжелых частиц, концентрация возбужденных частиц значительно превышает равновесные концентрации. Вопрос об эффективности использования неравновесной плазмы, используемой в заявленном изобретении, до сих пор оставался открытым.

20 В настоящее время рассматривается относительная роль возбуждения колебательных, электронных степеней свободы газа, а также ионизация и диссоциация молекул прямым электронным ударом. В таком случае, в неравновесной плазме могут реализовываться значительные концентрации радикалов. Основные процессы возбуждения молекул водорода и кислорода проанализированы в работе [23] и отражены в таблице [BEDF].

25 Элементарные процессы возбуждения молекул H_2 и O_2 электронным ударом [23]

	Процесс	ΔE , эВ
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(v=1)$	0.516
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(v=2)$	1.000
5	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(v=3)$	1.500
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(rot)$	0.044
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(d^3\Pi_u)$	14.00
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(a^3\Sigma_g^+)$	11.80
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(b^3\Sigma_g^-)$	8.900
10	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(c^3\Pi_u)$	11.75
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(B^1\Sigma_u^+)$	12.62
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(B^1\Sigma_u^+)$	11.30
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(E^1\Sigma_g^+)$	11.99
	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(C^1\Pi_u)$	12.40
15	$e + H_2 \rightarrow e + H_2(e^3\Sigma_u^+)$	12.83
	$e + H_2 \rightarrow e + e + H_2^+$	15.40
	$e + O_2(j_1) \rightarrow e + O_2(j_2)$	0.005
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(v=1)$	0.193
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(v=2)$	0.382
20	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(v=3)$	0.569
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(v=4)$	0.752
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(a^1\Delta_g)$	0.983
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(b^1\Sigma_g^+)$	1.64
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(B^3\Sigma_u^-)$	8.40
25	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(A^3\Sigma_u^+)$	4.50
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(C^3\Delta_u)$	6.87
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(9.9 \text{ эВ})$	9.90
	$e + O_2 \rightarrow e + O_2(\text{ригдберг. сост.})$	13.5
	$e + O_2 \rightarrow O_2(X^2\Pi_g) \rightarrow O^-(^2P^0) + O(^3P)$	4.25
30	$e + O_2 \rightarrow e + O^+ + O^-$	15.0
	$e + O_2 \rightarrow e + e + O(^3P) + O^+(^4S)$	18.0

С одной стороны, даже относительно малое количество атомов и радикалов (порядка 10^5 - 10^3 от общего числа частиц) способно сдвинуть равновесие в системе и спровоцировать развитие цепной реакции. Более того, в случае, когда удастся создать подобную концентрацию активных частиц однородно по объему, горение заведомо будет бездетонационным. С другой стороны, создание пространственно однородного разряда в большом объеме при относительно высокой исходной плотности нейтральных частиц является технически сложной задачей. На решение этой задачи направлено предлагаемое изобретение.

5 10 5. Высокоскоростная волна ионизации (ВВИ). Эффективным средством создания пространственно однородной высоковозбужденной неравновесной плазмы является высоковольтный импульсный наносекундный разряд, развивающийся в виде высокоскоростной волны ионизации [12], [13].

6. Образование активных частиц в газе. К настоящему времени известен ряд работ в области применения высокоскоростных волн ионизации для плазмохимических исследований. В их числе изучение воздействия наносекундных разрядов на возбуждение внутренних степеней свободы газа [14], а также исследования, связанные с изучением кинетики медленного окисления углеводородов при комнатной температуре под действием высокоскоростной волны ионизации при частоте повторения импульсов в несколько десятков Герц.

В работах [23], [24], [29], [31] впервые начал изучаться высоковольтный наносекундный разряд как способ однородного поджига горючих газовых смесей при высоких (около 1100 - 2200° К) начальных поступательных температурах. Рассматривалось воспламенение метано-воздушных и водородо-воздушных смесей, разбавленных аргоном либо гелием. На основе проведенных расчетов и экспериментов была показана высокая эффективность наносекундного высоковольтного разряда, позволяющего существенно (до 600° К в метано-воздушно-аргоновой смеси) снизить температурный порог воспламенения. Было показано, что при увеличении плотности газа эффективность плазмохимического воздействия разряда заметно снижается. Была исследована пространственная однородность высоковольтного наносекундного разряда и её зависимость от давления воспламеняющейся горючей смеси.

Задачей изобретения является повышение эффективности инициирования

воспламенения, интенсификации горения в двигателях внутреннего сгорания, а также повышение эффективности процесса реформинга рабочих смесей с использованием импульсного периодического высоковольтного газового разряда.

Указанная задача связана с тем, что в последнее время в связи с развитием высоких технологий остро возникла проблема эффективности использования углеводородов как топлива в конкретных случаях. Например, при выборе режимов для заданных топливных смесей при использовании в двигателях внутреннего сгорания, ракетных и самолетных реактивных двигателях, газотурбинных агрегатах, импульсных плазмохимических лазерах, плазмохимических реакторах.

Также задачей изобретения является необходимость обеспечения экологической безопасности продуктов сгорания топлива с учетом того, что низкотемпературное горение углеводородо-воздушной смеси ведёт к неполному окислению углерода, его кластеризации и образованию сажи, с другой стороны высокотемпературное горение даёт NO_x .

В задаче воспламенения горючих смесей весьма актуальной являются проблема их быстрого поджига с заданным пространственным распределением. Отсутствие детонации и очаговой структуры горения топливно-воздушной смеси является критичным во многих приложениях. В то же время для детонационных двигателей существенным является распределение скорости воспламенения по пространству. В настоящее время хорошо известны различные способы инициирования воспламенения и поддержания горения в газовой фазе. Среди них можно выделить следующие методы: прямое инжектирование плазмы дугового разряда постоянного тока [1]; лазерно-индуцированное воспламенение [2], [3]; искровое воспламенение [4].

Реакция окисления топлива протекает по разветвленному цепному механизму [5], и образование активных центров при этом является самой медленной стадией. Задачей, решаемой изобретением, является, воздействуя на газ на начальных этапах воспламенения, существенным образом уменьшить время воспламенения, а также инициировать горение смеси с заданным распределением по объему – в частности, однородное для воздушно-реактивных и поршневых, и градиентное для детонационных.

Задачами предлагаемого изобретения являются также (1) создание условий для возрастания скорости воспламенения (сокращения времени индукции) смеси; (2)

обеспечения поджига газа при более низкой начальной температуре за счет создания в объеме начальной концентрации активных частиц.

Поставленная задача решается за счет того, что при осуществлении способа рабочую смесь в камере сгорания возбуждают посредством импульсно-периодического наносекундного высоковольтного разряда, при этом амплитуда U [кВ] разряда ограничена условием:

$$3 \cdot 10^{-17} > U / (L \times n) > 3 \cdot 10^{-18}$$

время нарастания переднего фронта импульса высокого напряжения τ_{ϕ} [нс] ограничено условием:

$$RC < \tau_{\phi} < 3 \cdot 10^{-18} \times L^2 \times n / U$$

а длительность импульса высокого напряжения $\tau_{\text{имп}}$ [нс] ограничена условием:

$$10^{17} / n < \tau_{\text{имп}} < 3 \cdot 10^{20} \times (L \times R) / n$$

где U — амплитуда высоковольтного импульса, [кВ];

L — размер разрядного промежутка, [см],

n — концентрация молекул в единице объема разрядной секции, [см⁻³],

R — сопротивление подводящей линии [Ом],

C — емкость разрядного промежутка [Ф].

Объем разрядной секции — это объем, в котором инициируется горение с помощью высоковольтного наносекундного разряда.

Для обеспечения устойчивого режима химических реакций в рабочей смеси в проточном режиме импульсный периодический высоковольтный газовый разряд должен иметь период повторения импульсов $f_{\text{имп}}$ [с⁻¹], ограниченный условием:

$$10^{26} U / (n \times L^2) > f_{\text{имп}} > V / L$$

где U — амплитуда высоковольтного импульса, [кВ];

n — концентрация молекул в единице объема разрядной секции, [см⁻³],

V — скорость движения газа в разрядной секции, [см/с].

Техническим результатом, получаемым при осуществлении изобретения, является снижение температуры воспламенения рабочих смесей, повышение интенсивности химических реакций в процессах горения и реформинга, и, как следствие, повышение эффективности двигателей, энергетических горелок и реформеров и существенное уменьшение выброса вредных веществ, в частности,

оксидов азота, в атмосферу.

Предложенные электродинамические характеристики разряда в рабочей смеси позволяют существенно снизить температурный порог воспламенения рабочей смеси по следующим причинам:

- 5 1) Амплитуда высоковольтного импульса, ограниченная условием $U[\text{kВ}] > 3 \cdot 10^{-18} \times L \times n$, задает величину приведенного электрического поля E/n в разрядном промежутке после перекрытия его волной пробоя на уровне выше 300 Td, что обеспечивает максимизацию энерговклада разряда в электронные степени свободы и диссоциацию газа.
- 10 2) Амплитуда высоковольтного импульса, ограниченная условием $U[\text{kВ}] < 3 \cdot 10^{-17} \times L \times n$, задает величину приведенного электрического поля E/n в разрядном промежутке после перекрытия его волной пробоя на уровне ниже 3000 Td, что предотвращает переход электронов плазмы в режим убегания на основной стадии разряда и минимизирует потери на увеличение энергии электронов, формирование электронного пучка и рентгеновское излучение.
- 15 3) Время нарастания переднего фронта импульса высокого напряжения, ограниченное условием $\tau_f[\text{нс}] < 3 \cdot 10^{-18} \times L^2 \times n/U$, позволяет увеличить напряжение на высоковольтном электроде и достичь напряженности поля, достаточной для перехода электронов в режим убегания на фронте волны ионизации за время, меньшее времени перекрытия промежутка, что обуславливает достижение
- 20 однородности заполнения плазмой разрядного промежутка.
- 4) Время нарастания переднего фронта импульса высокого напряжения, ограниченное условием $\tau_f[\text{нс}] > RC$, позволяет согласовать генератор импульсных напряжений и подводящую линию с разрядной ячейкой, что обуславливает
- 25 эффективность передачи энергии импульса плазме.
- 5) При длительности импульса высокого напряжения, ограниченной условием $\tau_{\text{имп}}[\text{нс}] < 3 \cdot 10^{-20} \times (L \times R)/n$, ограничивается суммарная энергия, вкладываемая в плазму газового разряда, предотвращается развитие неустойчивости разряда, его шнурование и перегрев канала, чем достигается сильнонеравновесный характер
- 30 плазмы импульсного разряда.
- 6) Длительность импульса высокого напряжения, ограниченная условием

$10^{17}/n < \tau_{\text{имп}}[\text{нс}]$, учитывает конечное время размножения электронов в разрядном промежутке в диапазоне полей, ограниченных условием 1) и 2). Выполнение данного условия необходимо для развития ионизации газа в промежутке после его перекрытия волной пробоя, что вызывает снижение сопротивления разрядного промежутка, его лучшее согласование с генератором и эффективный энергозатрат электрической энергии в плазму.

7) Для обеспечения устойчивого протекания химических реакций в проточном режиме период повторения импульсов ограничивается условием $10^{26} U/(n \times L^2) > f_{\text{имп}} > V/L$,

10 где U - амплитуда высоковольтного импульса, [кВ];

n — концентрация молекул в единице объема разрядной секции, [см^{-3}],

V - скорость движения рабочей смеси в разрядной секции, [см/с].

Указанные значения периода повторения импульсов ($f_{\text{имп}}$) обеспечивают однородность (отсутствие «проскока» газа) возбуждения газа в проточном режиме работы ($f_{\text{имп}} > V/L$) и высокую эффективность сильнонеравновесного режима возбуждения наносекундным разрядом с высокой скважностью ($10^{26} U/(n \times L^2) > f_{\text{имп}}$), когда время между импульсами превышает время импульса и обеспечивает достаточное время для рекомбинации плазмы, восстановления электрической прочности промежутка и гарантирует работу в выбранном диапазоне приведенных электрических полей (условие 1).

В процессе экспериментального исследования заявленного способа установлено влияние неравновесных разрядов на характеристики химических процессов горения и реформинга (скорость распространения, температуру, количество примесей NO_x в продуктах сгорания и др.). Для горелок было изучено влияние возбуждения газа импульсным наносекундным разрядом на скорость срыва пламени. Было экспериментально получено увеличение скорости срыва пламени более чем в два раза при энергозатрате разряда менее 1% от мощности горелки. На основании данных, полученных методами эмиссионной спектроскопии, было установлено, что увеличение скорости распространения пламени связано с образованием атомарного кислорода в разряде в результате тушения электронно-возбужденных молекул азота на кислороде, а также диссоциацией кислорода электронным ударом. Построенная численная модель качественно описывала влияние разряда на скорость распространения пламени. Было

изучено влияние частоты повторения наносекундных импульсов на скорость срыва и мощность пламени. Установлено, что с увеличением частоты эффект увеличения скорости усиливается. Такое поведение связано с дополнительной генерацией активных частиц в разряде. Мощность разряда в этом случае по-прежнему не
5 превышала 1% от мощности горелки.

Краткое описание графических материалов

На графических материалах, поясняющих сущность изобретения, изображено следующее.

10 На фиг.1 — общая схема экспериментальной установки.

На фиг.2 — разрядная камера ударной трубы. Диагностика электродинамических характеристик ВВИ.

На фиг.3 — осциллограммы микросекундного диапазона от двух штирен-
датчиков и ФЭУ.

15 На фиг. 4 — кривые автовоспламенения 20%-ных смесей углеводородов.

На фиг. 5 — кривые автовоспламенения 2%, 10% и 20% стехиометрических смесей пропана с кислородом, разбавленных аргоном.

На фиг. 6 — кривые автовоспламенения и кривые воспламенения разрядом 10%-
ных стехиометрических смесей C1-C5 с кислородом, разбавленных аргоном.

20 На фиг. 7 — кривые воспламенения разрядом и кривые автовоспламенения 10%-
ных стехиометрических смесей C4-C5 с кислородом, разбавленных аргоном. Пунктиром обозначены сдвиги гипотетические температуры воспламенения, рассчитанные по данным каждого эксперимента при равновесном вложении энергии разряда в газ.

25 На фиг. 8 — сокращение времени энерговыведения в системе при фиксированном энерговкладе разряда в зависимости от величины приложенного электрического поля ($E/n[\text{Td}] \sim U/(L \cdot n)$).

На фиг. 9 — сокращение времени энерговыведения в системе при фиксированном значении величины приложенного электрического поля 500 Td в
30 зависимости от энерговклада разряда.

На фиг. 10 — пример применения импульсных разрядов для инициирования воспламенения и интенсификации горения рабочей смеси в реактивных двигателях и

горелках с перемешанным потоком.

На фиг. 11 — пример применения импульсных разрядов для инициирования воспламенения и интенсификации горения рабочей смеси в автомобильном двигателе внутреннего сгорания.

5 На фиг. 12 — пример применения импульсных разрядов для инициирования реформинга горения рабочей смеси в плазменном реформере.

На фиг. 13 — пример применения импульсных разрядов для инициирования детонационной волны в детонационной камере сгорания. Схема детонационной камеры сгорания: 1 — ввод высокого напряжения; 2 — пакет разрядных трубок; 3 — корпус
10 камеры; 4 — область формирования детонационной волны.

На фиг. 14 — схема разрядной трубки: 1 — диэлектрический слой; 2 — высоковольтный электрод; 3 — низковольтный электрод; 4 — область формирования газового разряда и воспламенения.

15

Осуществление изобретения

Осуществление заявленного способа с обоснованием режимов экспериментально подтверждено исследованием воспламенения топливно-воздушных смесей при различных режимах и сравнением эффективности разных методов
20 инициирования воспламенения и интенсификации горения рабочей смеси.

Входящая в состав экспериментальной установки ударная труба широко используется для контролируемого получения высоких температур при исследовании физико-химических процессов в газе. При разработке заявленного способа ударная труба использовалась для нагрева газа. За фронтом отраженной ударной волны
25 реализовывался наносекундный разряд.

КНД ударной трубы, использовавшаяся в экспериментах, имела прямоугольное внутреннее сечение 25 × 25 мм и состояла из стальной и диэлектрической частей, соединенных между собой (фиг. 1). Диэлектрическая секция являлась завершающей частью КНД. Торец ударной трубы, размещавшийся в диэлектрической секции, являлся
30 высоковольтным электродом, от которого развивался разряд.

В экспериментах по воспламенению смесей с помощью высокоскоростной волны ионизации наносекундный разряд создавался непосредственно в нагретом за

отраженной ударной волной газе. Импульсная техника, предназначенная для генерации высоких мощностей в плазменном эксперименте, основана на применении электромагнитных накопителей энергии и работает обычно по схеме: первичный накопитель энергии → коммутирующее устройство → формирователь импульсов → коммутирующее устройство → передающая линия → нагрузка.

Для создания разряда использовался десятикаскадный генератор ГИН-9. Корпус ГИН был наполнен азотом до давления 3.6 атм., что позволило получить импульсы напряжения до 250 кВ. Детальное строение разрядной камеры изображено на фиг. 2. Высоковольтный латунный электрод помещался в торцевой части камеры так, что его эффективная поверхность (контактирующая со смесью) располагалась заподлицо с торцом КНД, как представлено на фиг. 2. Разряд развивался от высоковольтного электрода и замыкался на стальную заземленную часть камеры низкого давления.

В каждом эксперименте детектировалось излучение СН ($\lambda=431$ мм, $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$) либо ОН ($\lambda = 306$ мм, $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$) радикалов.

Время воспламенения определялось по излучению СН или ОН радикалов на соответствующих длинах волн. Характерные осциллограммы получаемые в экспериментах, представлены на фиг. 3. Погрешность измерения времени задержки воспламенения оценивалась не более чем в 10 мкс.

Для проверки совпадения времен индукции воспламенения, проведенных с детектированием излучения СН и ОН радикалов, был проведен эксперимент по определению времен индукции в бутано-кислородной стехиометрической смеси, разбавленной аргоном на 20% (Разбавление смесей аргоном – типовая методика, используемая для обеспечения изотермических условий протекания реакций). Как видно из фиг. 4, кривые зависимости времен задержки воспламенения от температуры за отраженной ударной волной совпадают для измерений проведенных при детектировании излучения радикала ОН и СН, соответственно ($\lambda=306$ мм) и ($\lambda=431$ мм).

Измерения параметров высокоскоростной волны ионизации (ВВИ) включали в себя измерение тока и падения напряжения в разрядном промежутке в зависимости от времени для определения энерговыклада импульса в газ за отраженной ударной волной и напряженности поля ВВИ с наносекундным разрешением. Также в наносекундные

измерения входило детектирование излучения СН радикала при распространении ВВИ по разрядному промежутку.

Падение потенциала в разрядной камере определялось по двум осциллограммам, полученным с емкостных датчиков. Емкостные датчики при измерениях располагали
 5 между заземленным экраном и разрядной секцией (С1 и С2 на фиг. 4). Прходная емкость составляла 460 пФ. Для регистрации сигнала использовался осциллограф Tektronix TDS-3054 (ширина полосы пропускания 400 МГц) с входным сопротивлением 50 Ом. Ток в разрядном устройстве измерялся с помощью магнито-
 токового датчика. По разности сигналов с емкостных датчиков определялось падение
 10 потенциала $\Delta U(t) = U_2(t) - U_1(t)$ на участке, включающем сечение наблюдения. Напряженность электрического поля оценивалась как $E \sim \Delta U/L$, где L - расстояние между датчиками. Плотность электронов оценивалось из измерений тока в предположении, что ток течет равномерно по сечению разрядного устройства: $J(t) = n_e(t)V_{dr}E(t)S$, где J - измеренная величина электрического тока, n_e - искомая плотность
 15 электронов, V_{dr} - дрейфовая скорость движения электронов в текущем приведенном электрическом поле $E/n(t)$, S - площадь поперечного сечения разрядного устройства.

С учетом измерений тока, синхронизованных с измерением потенциала, находилась вложенная в разряд мощность в каждый момент времени:

$$P(t) = \Delta U(t)I(t)$$

20 Удельный энерговклад в газ определялся путем интегрирования этого выражения в предположении пространственной однородности разряда в объеме $V = LS$, где L - расстояние между емкостными датчиками, S - площадь поперечного сечения разрядного устройства.

Одновременно с током и напряжением контролировалось излучение СН
 25 радикала (переход $\lambda = 431$ нм, $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$) с наносекундным временным разрешением. Излучение, выходящее из нижнего диагностического окна рабочего сечения разрядной камеры, монохроматизировалось с помощью монохроматора МУМ и регистрировалось сильноточным фотоэлектрическим умножителем 14ЭЛУ-ФТ (см. фиг. 2).

Таблица 2. Исследованные горючие смеси.

Alkane	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
	6.7%	4.4%	3.3%	2.7%	3.3%	2.2%	1.7%	1.3%	1.1%
O ₂	13.3%	15.6%	16.7%	17.3%	6.7%	7.8%	8.3%	8.7%	8.9%
Ar	80%	80%	80%	80%	90%	90%	90%	90%	90%

В процессе исследований проводились эксперименты по воспламенению стехиометрических смесей метана, этана, пропана и бутана с кислородом, разбавленных аргоном на 80% (см. таблицу 2), водородо-воздушных и метано-воздушных смесей. Основные результаты этих экспериментов представлены на графике зависимости времени индукции от температуры реакционного газа за отраженной ударной волной в виде кривых автовоспламенения, которые приведены для сравнения с изобретением (фиг. 4, 5).

Основной массив рабочих данных, отражающих кинетику процесса автовоспламенения, был получен с использованием стехиометрических смесей метана, этана, пропана, бутана и пентана с кислородом (см. таблицу 2), разбавленных аргоном на 90%.

Эксперименты по инициированию воспламенения наносекундным разрядом производились в стехиометрических смесях, разбавленных аргоном на 10% (см. фиг. 6, 7).

10% -е смеси

CH₄: O₂: Ar = 1:2:27

C₂H₆: O₂: Ar = 2:7:81

C₃H₈: O₂: Ar = 1:5:54

C₄H₁₀: O₂: Ar = 2:13:135

C₅H₁₂: O₂: Ar = 1:8:81

разбавленные на 20%:

CH₄: O₂: Ar = 1:2:13

C₂H₆: O₂: Ar = 2:7:36

C₃H₈: O₂: Ar = 1:5:24

C₄H₁₀: O₂: Ar = 2:13:60

Сдвиги порогов воспламенения для каждой из смесей наблюдались в диапазоне от 200 до 500°K. Прослеживалось увеличение сдвигов температур воспламенения для менее разбавленных 20%-ных смесей, по сравнению с сильно разбавленными. Следует отметить, что эксперименты по поджигу с помощью ВВИ 10%-ной смеси $\text{CH}_4: \text{O}_2: \text{Ar} = 1:2:27$ близки к таким же экспериментам в 20%-ной смеси $\text{CH}_4: \text{O}_2: \text{Ar} = 1:2:13$, но в отличие от 20%-ной, 10%-ную смесь не удалось зажечь автовоспламенением, в то время как осуществлен поджиг с использованием режимов предложенного способа.

Во всех экспериментах по иницированию горения высоковольтным импульсным разрядом производились измерения тока и напряжения в разрядном промежутке и вычисляли плотность энергии, вкладываемой в смесь высоковольтным разрядом. Для сравнения эффективности поджига неравновесным вложением энергии (ВВИ) с равновесным нагревом плотность энерговклада разряда пересчитывалась в термический нагрев смеси. На фиг. 7 рассчитанные равновесные сдвиги воспламенения обозначены пунктирными линиями. Видно, что неравновесный способ вложения одинакового количества энергии позволяет уменьшить температурный порог воспламенения на величину, в 2-4 раза превышающую сдвиг, получаемый при равновесном нагреве.

Амплитуда высоковольтного импульса, ограниченная условием $U[\text{kV}] > 3 \cdot 10^{18} \times L \times n$, задает величину приведенного электрического поля E/p в разрядном промежутке после перекрытия его волной пробоя на уровне выше 300 Td, что обеспечивает максимизацию энерговклада разряда в электронные степени свободы и диссоциацию газа. На фиг.8 показана зависимость рассчитанного времени энерговыведения в смеси водород-воздух в зависимости от величины приложенного электрического поля при фиксированном энерговкладе в разряд. Видно, что максимальный эффект достигается в диапазоне приведенных полей от 300 до 3000 Td.

При длительности импульса высокого напряжения, ограниченной условием $\tau_{\text{имп}}[\text{нс}] < 3 \cdot 10^{20} \times (L \times R)/n$, ограничивается суммарная энергия, вкладываемая в плазму газового разряда, предотвращается развитие неустойчивости разряда, его ионирование и перегрев канала, чем достигается сильнонеравновесный характер плазмы импульсного разряда и повышается его эффективность по сравнению с

термическим нагревом газа (фиг. 9). На фиг.9 показано сокращение времени энерговыделения в системе при фиксированном значении величины приложенного электрического поля 500 Td в зависимости от энерговыклада разряда. Хорошо видно, что при повышении суммарной энергии разряда (величина, пропорциональная длительности высоковольтного импульса при фиксированной амплитуде напряжения) эффективность неравновесного возбуждения снижается. Эффективность различных способов возбуждения сравнивается при величинах энерговыклада около 1 Дж/см³ при нормальных условиях, что ограничивает длительность импульса величиной

$$\tau_{\text{имп}}[\text{нс}] < 3 \cdot 10^{20} \times (L \times R) / n,$$

где L – размер разрядного промежутка, [см],

R – сопротивление подводящей линии, [Ом],

n – концентрация молекул в единице объема разрядной секции, [см⁻³].

Как следует из изложенного (см. фиг. 7), во всех углеводород-кислородных смесях наблюдалось ускорение воспламенения под воздействием одиночного высоковольтного наносекундного разряда по сравнению с автовоспламенением при тех же условиях за отраженной ударной волной. В выше указанных диапазонах температур и давлений сокращалось время индукции и снижался температурный порог воспламенения.

Оценки энерговыклада высоковольтного разряда показали, что эффективность неравновесной наработки радикалов при воспламенении выше в два - четыре раза, чем у равновесного нагрева. С уменьшением относительной концентрации разбавителя в горючей смеси, эффект ускорения воспламенения высоковольтным наносекундным разрядом усиливается.

Примеры применения импульсных наносекундных разрядов для инициирования воспламенения, интенсификации горения и реформинга рабочих смесей

Практическое применение заявленный способ может найти, например, в реактивных двигателях и горелках с перемешанным потоком для инициирования воспламенения и интенсификации горения рабочей смеси (фиг. 10).

В этом случае поток окислителя (воздух) входит в камеру сгорания после предварительного сжатия компрессором (газотурбинные двигатели), системой волн сжатия (прямоточные реактивные двигатели), без предварительной подготовки (горелки). В камере сгорания поток воздуха перемешивается с топливом и в некоторых

областях зоны смешения достигаются условия по соотношению топливо/окислитель, при которых возможно воспламенение (как правило, стехиометрическое отношение топливо/окислитель лежит в диапазоне 0.25-4, хотя и не ограничивается им). Разряд организуется в области смешения, вызывая интенсификацию воспламенения и перемешивания из-за локального воспламенения и интенсификации турбулентного движения газа.

Пример использования изобретения в автомобильных двигателях внутреннего сгорания показан на фиг. 11. Разряд организуется в зазоре между головкой блока цилиндров и поршнем, инициируя воспламенение во всем объеме при низкой концентрации топлива в смеси, что приводит к уменьшению времени сгорания, снижению расхода топлива и уменьшению количества вредных выбросов.

Пример применения импульсных разрядов для инициирования реформинга горения рабочей смеси в плазменном реформере показан на фиг. 12. Разряд организуется в коаксиальном зазоре между внутренним высоковольтным электродом и внешней стенкой реформера, инициируя плазменный катализ во всем объеме при высокой концентрации топлива в смеси, что приводит к низкотемпературной конверсии углеводородного топлива в водород, снижению расхода энергии на единицу производимого водорода и уменьшению количества углеводородов на выходе реформера.

Пример применения заявленного способа для инициирования детонации в детонационных двигателях и камерах сгорания показан на фиг.13. На фиг. 13 показан общий вид детонационной камеры сгорания большого сечения, в которой смонтированы отдельные разрядные секции (фиг.14). Разряд организуется в геометрии с барьером (диэлектрик, частично покрывающий низковольтный электрод, фиг.14). Такая геометрия позволяет сохранять высокое значение электрического поля в области разряда и позволяет использовать относительно низкие напряжения для достижения однородности плазменного образования

$$3 \cdot 10^{-17} > U / ([d_1 - d_2] / 2 \times n) > 3 \cdot 10^{-18}$$

и относительно низкие величины скорости роста напряжения на промежутке

$$\tau_{\psi} < 3 \cdot 10^{-18} \times L^2 \times n / U$$

даже при высоких начальных давлениях газа, характерных для детонационных камер сгорания. Особенностью данной реализации разряда является то, что величина

приведенного поля в разрядном промежутке определяется наименьшим расстоянием между электродами $[d_1-d_2]/2$, а время перекрытия разрядом промежутка и выхода разряда на режим короткого замыкания определяется расстоянием между высоковольтным электродом и той частью низковольтного, которая не покрыта диэлектрическим слоем (фиг.14).

Список литературы

1. T.Tachibana // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combust. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 385.
2. M.Lavid, D.Zhou, Y.-C.Li // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combust. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 410.
3. H.Furutani, F.Liu, J.Hama, S.Takahashi // Proc. 26th (Int.) Sympos. on Combustion. Napoli, 1996. WIP Abstracts. P. 394.
4. G.Pilch, A.Britan, Bon-Dor Gabi, E.Sher // Proc. 27th (Int.) Symp. on Combust. Boulder, 1998. WIP-Abstracts. P. 95.
5. N.N.Semenov, Nobel Lecture, December 11, 1956.
6. И.А.Семиохин, Б.В.Страхов, А.И.Осипов. Кинетика химических реакций. М., Издательство МГУ, 1995.
7. А.П.Пурмаль. Простая кинетика сложных реакций. М.: Издательство МФТИ, 1998.
8. Е.Т.Денисов. Кинетика гомогенных химических реакций. М.: Высшая школа, 1988.
9. E. C. Samano, W. E. Carr, M. Seidl, and Brian S. Lee. An arc discharge hydrogen atom source, //Review of Scientific Instruments 64 (10) (1993) 2746-2752.
10. D.A. Eichenberger and W.L. Roberts, Combust. Flame 118 (1999) 469.
11. Л.С.Полак, А.А.Овсянников, Д.И.Соловецкий, Ф.Б.Вурзель. Теоретическая и прикладная плазмехимия. М.: Наука, 1975.
12. Л.М.Васильяк, С.В.Костюченко, Н.Н.Кудрявцев, И.В.Филлюгин. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое. //УФН, Т. 164 (№ 3), 1994, с. 161-285.
13. Зацепин, Стариковская, Стариковский. Развитие пространственно однородной высокоскоростной волны ионизации в большом разрядном объеме. //Физика плазмы, 1998, Т. 24, № 7, с. 1-7.
14. С.М.Стариковская. Импульсный разряд при высоких перенапряжениях: особенности развития и возбуждение внутренних степеней свободы газа. Докторская диссертация, 2000, с. 1221.
15. А.А.Раддиг, Б.М.Смирнов. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980.

16. А.П.Зуев, А.Ю.Стариковский. Сечения поглощения молекул O₂, NO, CO₂, H₂O, NO₂ в УФ диапазоне спектра. //Журнал прикладной спектроскопии, 1990, март(3), Т. 52, с. 455-466.
17. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Издание второе, дополненное. М.: Наука, 1966.
18. Статистическая физика, часть I, Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Москва 1976.
19. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, под редакцией Глушко В.П., изд-во "Наука", Москва 1978.
20. J.Craggs, R.Meek. High Voltage Laboratory Technique. Butterworth Scientific Publishers, London, 1954.
21. С.А.Боженков. Исследование влияния высокоскоростной волны ионизации на воспламенение водородо-воздушных и метано-воздушных смесей. Диплом бакалавра, 2002.
22. S.A.Bozhenkov, S.M.Starikovskaia and A.Yu.Starikovskii. Nanosecond gas discharge ignition of H₂ and CH₄ containing mixtures. //Combustion and Flame 133 (2003) 133-146.
23. G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach et al.,
http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/
24. C.D., Carter, S., Williams, L.C., Lee, S., Sidhu, J., Graham. AIAA Paper 2003-0703. 41st Aerospace meeting and Exhibit. 6-9 Jan, Reno, Nevada, USA.
25. Е.И., Mintoussov, S.V., Pancheshnyi, A.Yu., Starikovskii. AIAA paper 2004-1013. 42nd Aerospace meeting and Exhibit. 5-8 Jan 2004, Reno, Nevada, USA
26. J.W., Parish, B.N., Ganguly. AIAA paper. 42nd Aerospace meeting and Exhibit. 5-8 Jan 2004, Reno, Nevada, USA.
27. Е.Н. Кукаев. Исследование воспламенения горючих смесей наносекундным разрядом и импульсным флэш-фотолизом. Диплом магистра, 2004.
28. Х. Окабе. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981.
29. S.M., Starikovskaia, E.N., Kukaev, A.Yu., Kuksin, M.M., Nudnova, A.Yu., Starikovskii. Analysis of the spatial uniformity of the combustion of a gaseous mixture initiated by a nanosecond discharge. //Combustion and Flame. 193 (2004) 177-187
30. N., Lamoureux, C.-E., Paillard, V., Vaslier. Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigation behind reflected shock waves. //Shock waves, (2002) 11: 309-322

31. Е.В. Ступоченко, С.А. Лосев, А.И. Осипов. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ инициирования воспламенения, интенсификации горения или реформинга рабочей смеси - топливовоздушной или топливокислородной, заключающийся в том, что рабочую смесь в камере сгорания возбуждают посредством импульсно-периодического наносекундного высоковольтного разряда, при этом амплитуда U [кВ] разряда ограничена условием:

$$3 \cdot 10^{-17} > U / (L \times n) > 3 \cdot 10^{-18},$$

10 время нарастания переднего фронта импульса высокого напряжения τ_{ϕ} [нс] ограничено условием:

$$RC < \tau_{\phi} < 3 \cdot 10^{-18} \times L^2 \times n / U,$$

а длительность импульса высокого напряжения $\tau_{имп}$ [нс] ограничена условием:

$$10^{17} / n < \tau_{имп} < 3 \cdot 10^{31} \times (L \times R) / (n \times n),$$

15 где U - амплитуда высоковольтного импульса, [кВ];

L - типичный размер разрядной секции, [см],

n — концентрация молекул в единице объема разрядной секции, [см⁻³],

R - сопротивление подводящей линии [Ом],

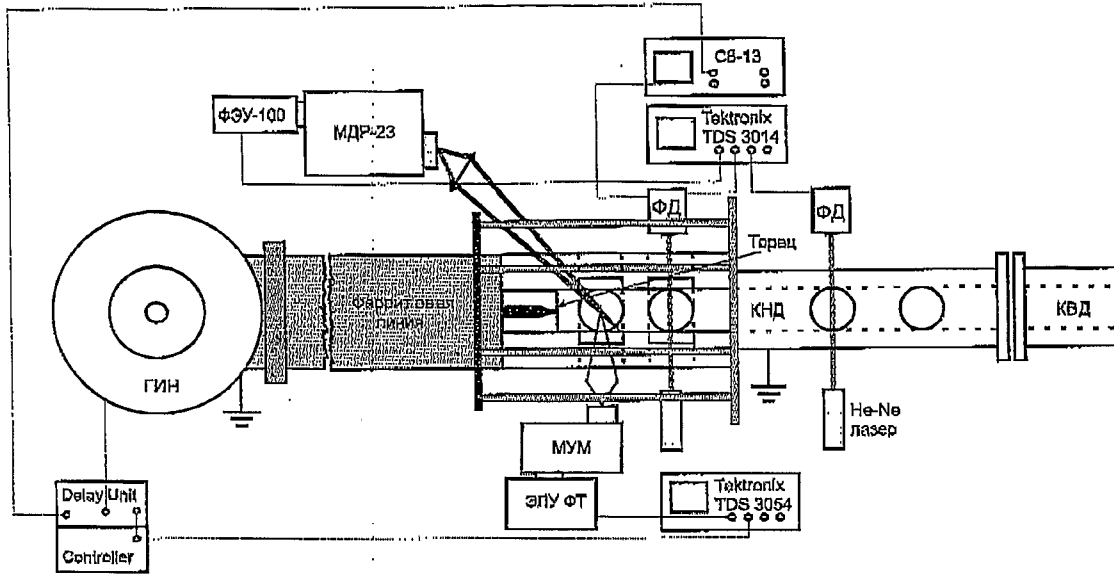
C - емкость разрядного промежутка [Ф].

20

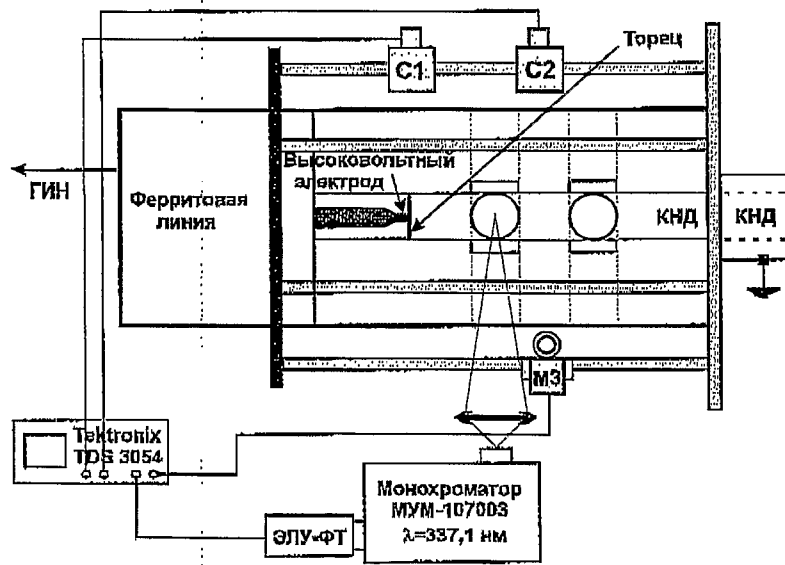
2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что для обеспечения устойчивого поджига рабочей смеси, поступающей в разрядную секцию в проточном режиме, создают импульсный периодический высоковольтный газовый разряд с периодом повторения импульсов $f_{имп}$ [с⁻¹], ограниченным условием:

$$10^{26} U / (n \times L^2) > f_{имп} > V / L,$$

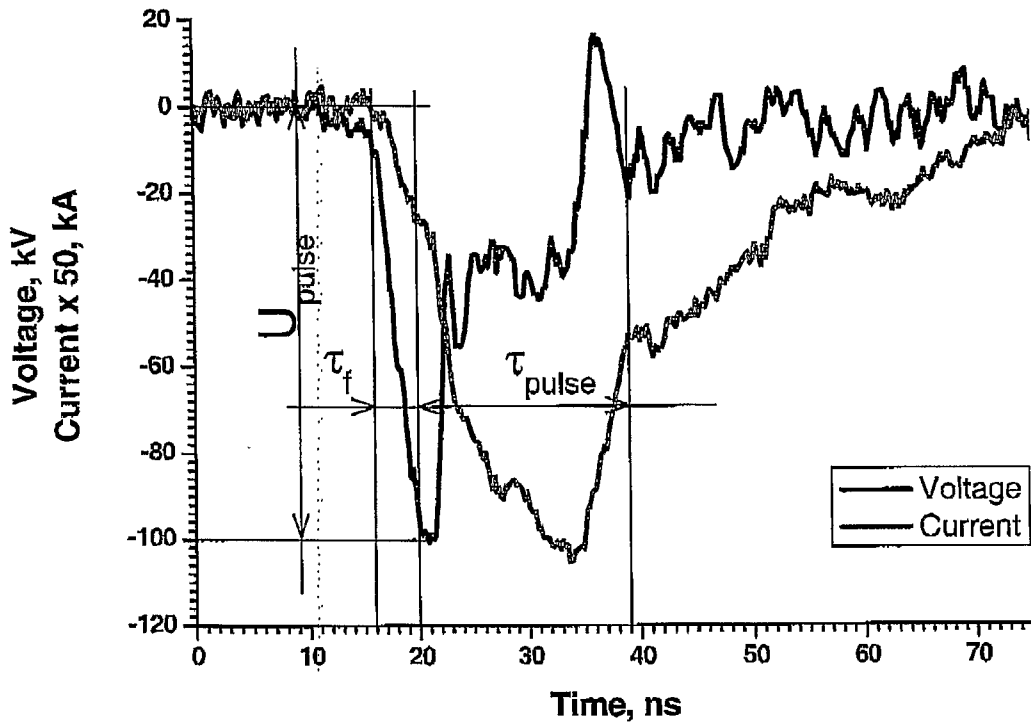
где V - скорость движения газа (рабочей смеси) в разрядной секции, [см/с].



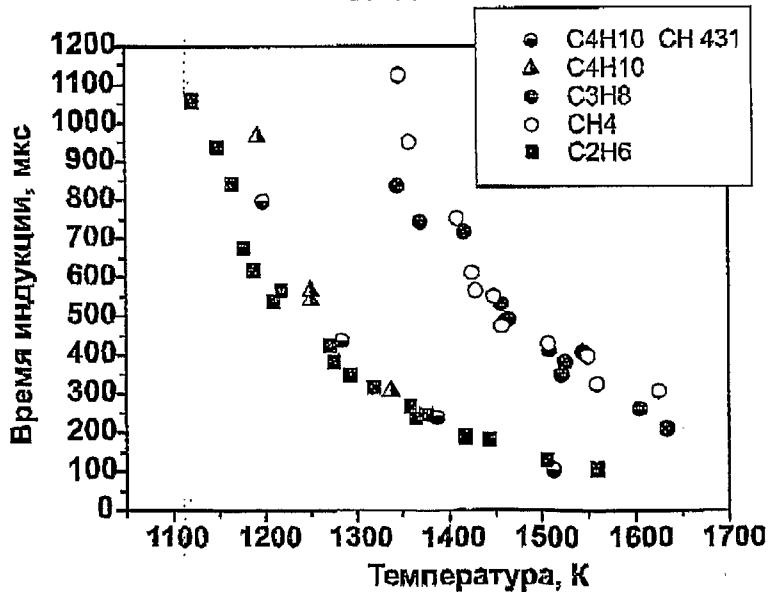
Фиг. 1



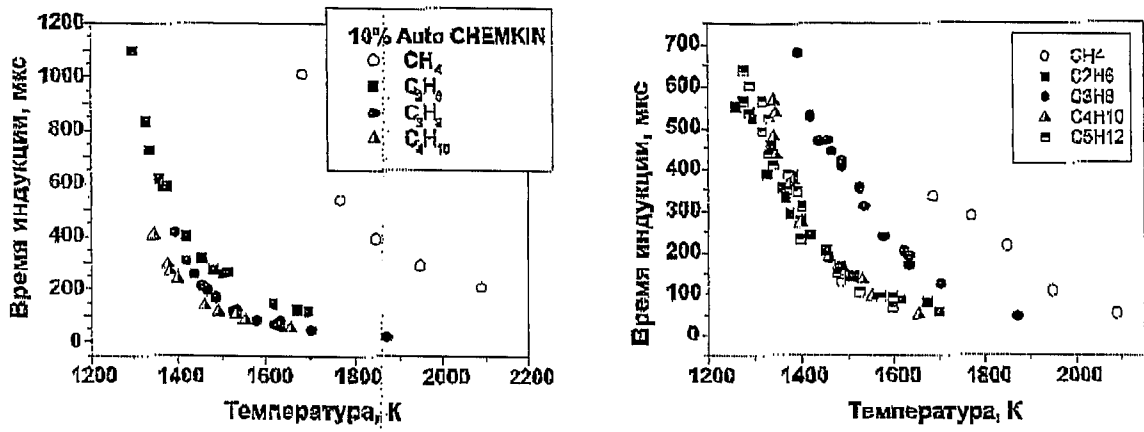
Фиг. 2



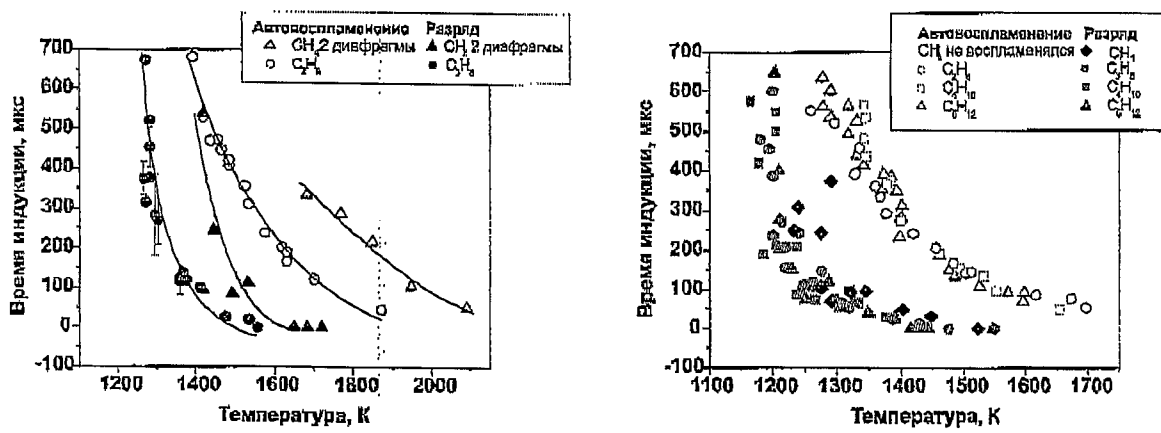
Фиг. 3



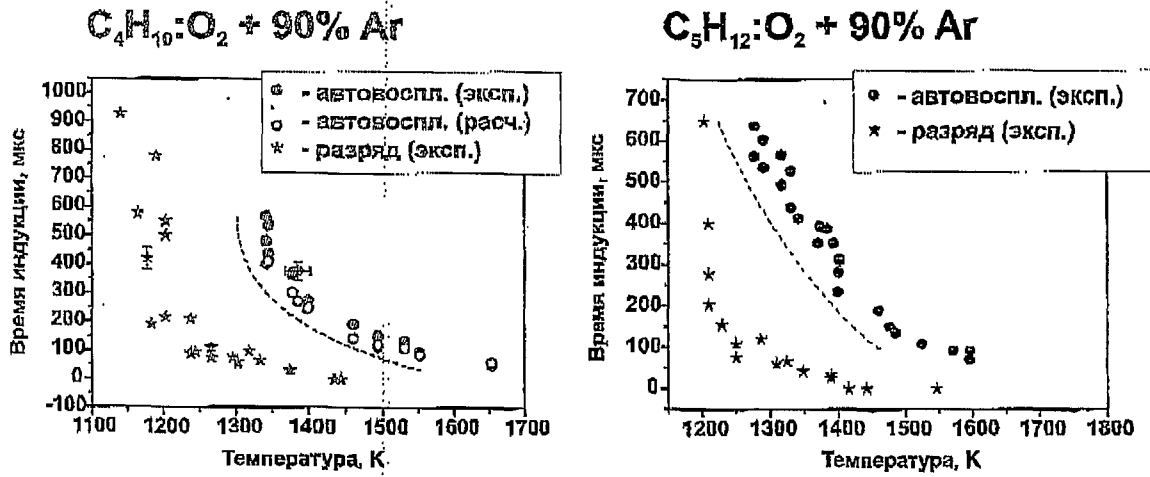
Фиг. 4



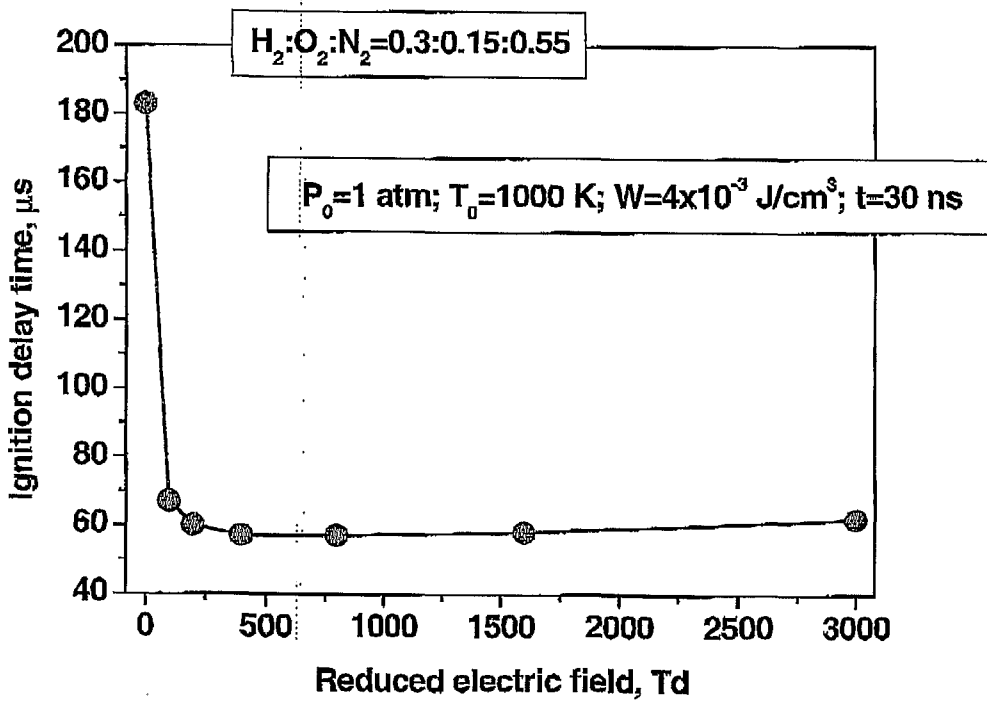
Фиг. 5



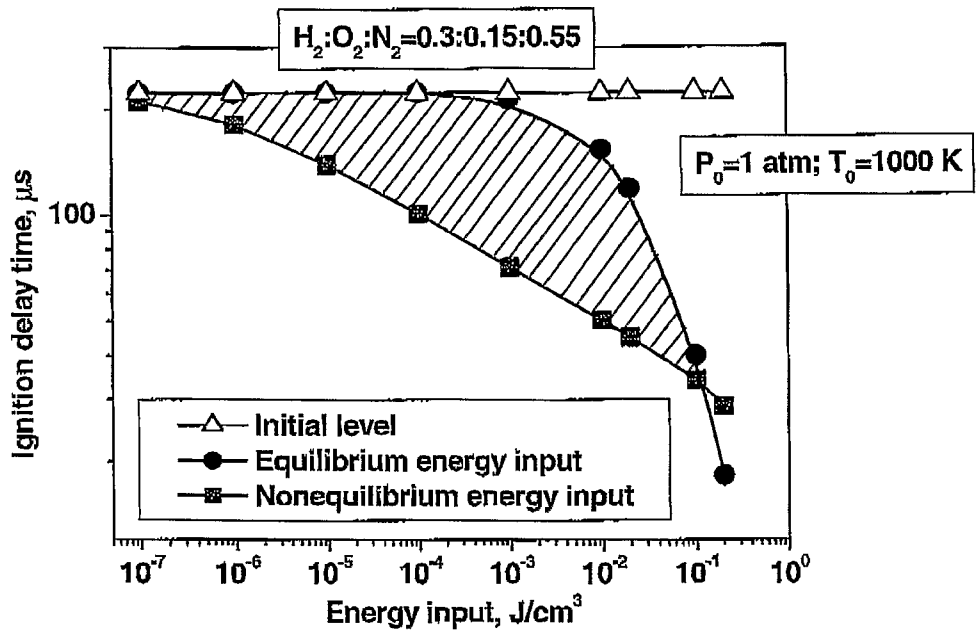
Фиг. 6



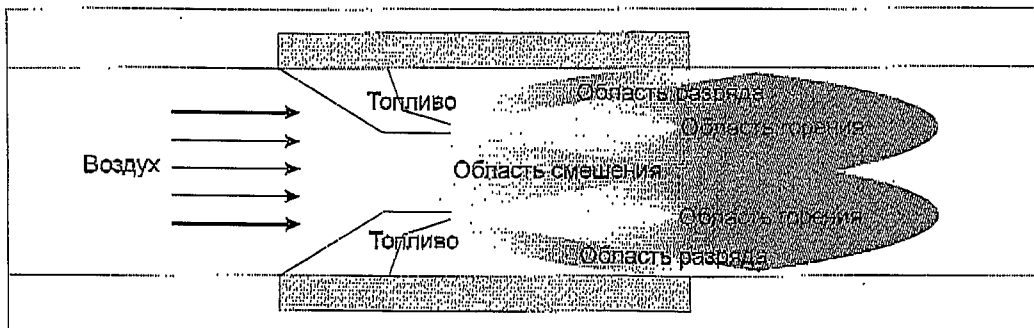
Фиг. 7



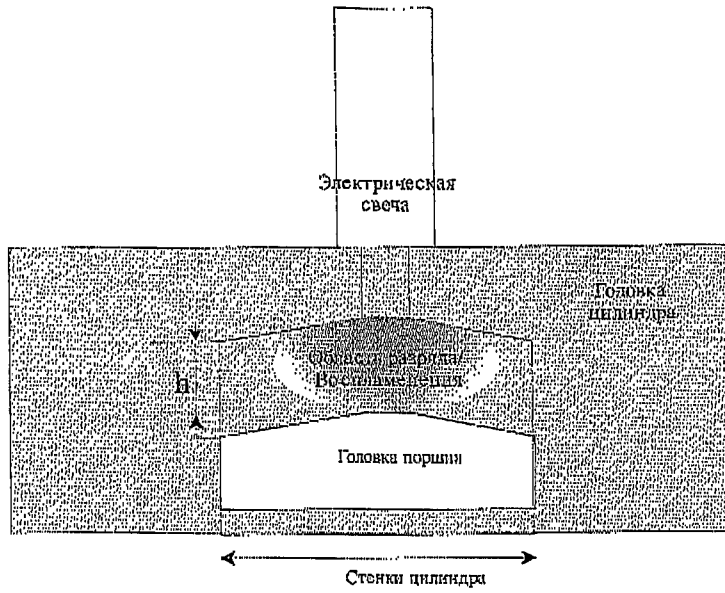
Фиг. 8



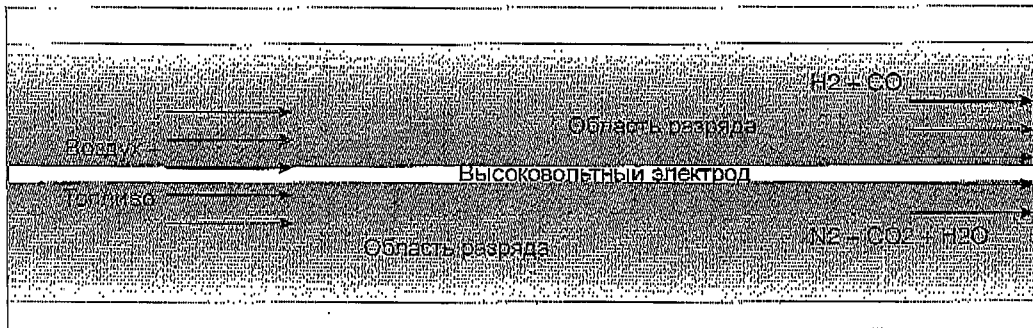
Фиг.9



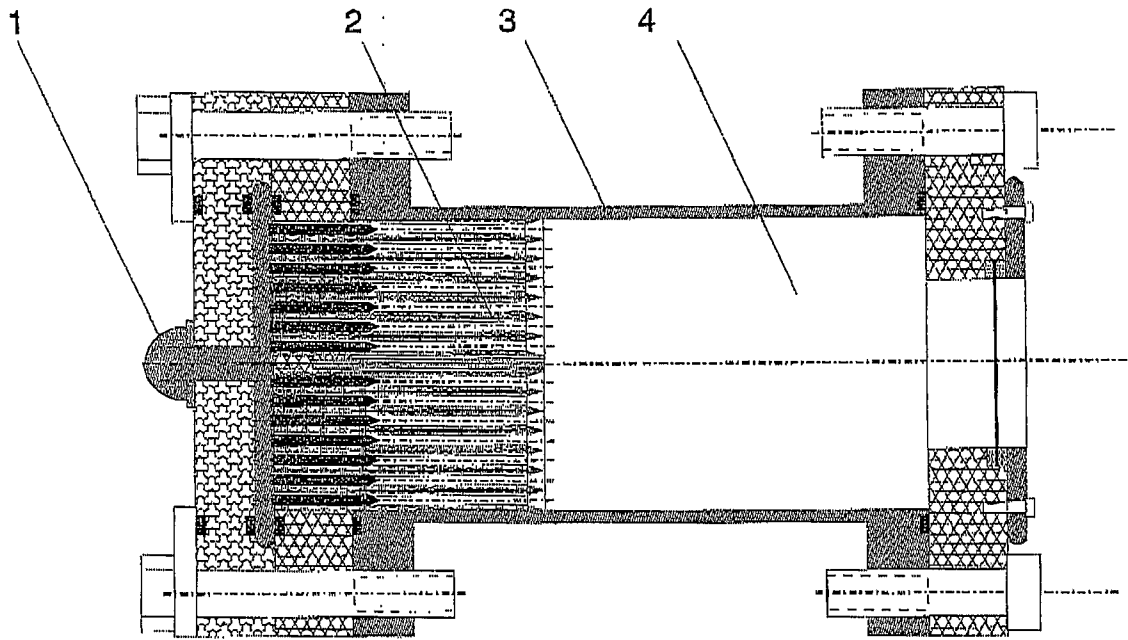
Фиг. 10



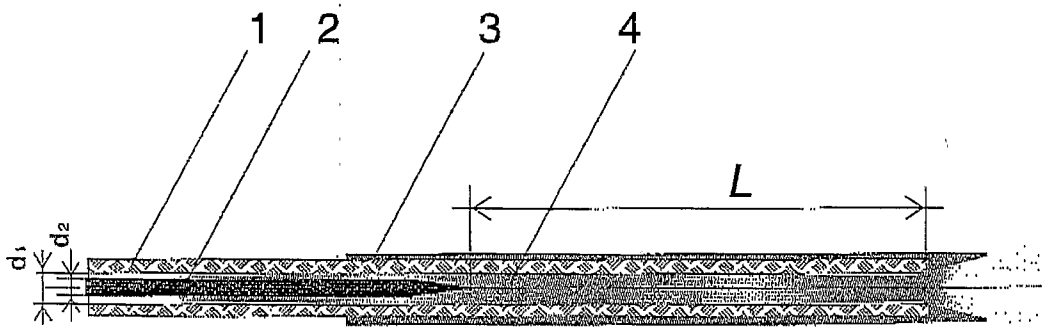
Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг.14