



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
 ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2004114891/06, 17.05.2004

(24) Дата начала действия патента: 17.05.2004

(45) Опубликовано: 27.11.2005 Бюл. № 33

(56) Список документов, цитированных в отчете о
 поиске: WO 01/18370 A1, 15.03.2001.
 RU 2161728 C2, 10.01.2001.
 SU 775519 A, 30.10.1980.
 SU 1288448 A2, 07.02.1987.
 SU 819506 A, 07.04.1981.
 US 5293857 A, 15.03.1994.
 US 5992397 A, 30.11.1999.

Адрес для переписки:

142190, Московская обл., г. Троицк, ул.
 Школьная, 11, кв.5, А.Е. Моницу

(72) Автор(ы):

Монич А.Е. (RU),
 Монич Е.А. (RU)

(73) Патентообладатель(ли):

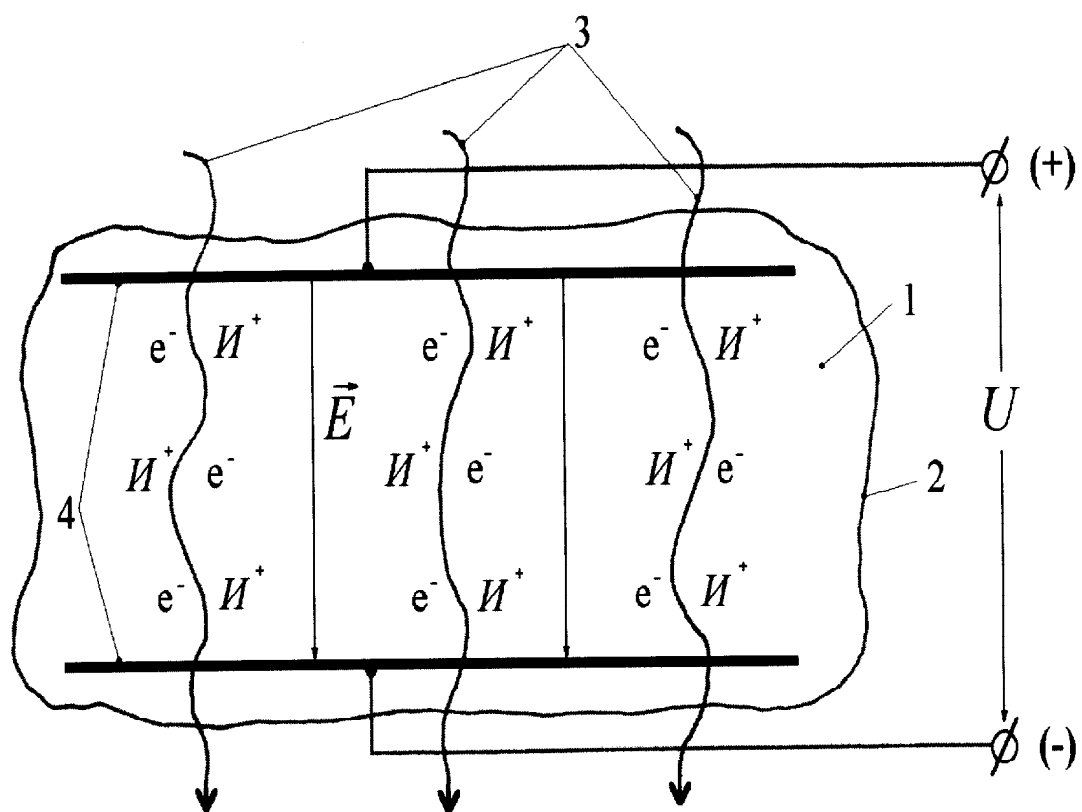
Монич Антон Евгеньевич (RU),
 Монич Евгений Анатольевич (RU)

(54) СПОСОБ СЖИГАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СПОСОБА

(57) Реферат:

Способ сжигания углеводородного топлива и устройство для его реализации относится к двигателям и энергетическим установкам с рабочими процессами, включающими предварительную обработку топлива. Изобретение применимо для сжигания топлива как в периодическом режиме, характерном для поршневых двигателей внутреннего сгорания, так и для осуществления непрерывных режимов сжигания топлива, например, в реактивных, турбореактивных, газотурбинных двигателях и энергетических установках. Способ реализует стимулированное разрушение молекул метастабильных промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, накопленных в газовом объеме топливно-воздушной смеси, путем энергетического воздействия, приводящего к взрывному объемному самовоспламенению горючей смеси. Особенность способа заключается в том, что топливно-воздушную смесь обогащают свободными электронами, а энергетическое воздействие на молекулы смеси для возбуждения колебательных степеней свободы молекул осуществляют посредством их неупругих соударений со свободными электронами,

ускоренными электрическим полем, напряженность Е которого меньше напряженности перехода к самостоятельному газовому разряду. Обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами осуществляют путем ее ионизации или путем инжекции электронов. Устройство для реализации способа содержит камеру сгорания с источником энергетического воздействия. Источник энергетического воздействия состоит из устройства обогащения топливно-воздушной смеси свободными электронами и источника ускоряющего электрического поля, включающего систему электродов с управляемыми коммутаторами, подключенными к источникам высоковольтного напряжения. Изобретение позволяет осуществить в нужный момент времени практически мгновенное развитие объемного радикально-цепного взрыва в топливно-воздушной смеси за счет одновременного разрушения большинства накопленных метастабильных молекул промежуточных продуктов. Разрушение молекул промежуточных продуктов порождает большое число активных радикалов и частиц, разветвляющих и создающих новые цепи реакции окисления углеводородного топлива, что и приводит к развитию радикально-цепного взрыва. 2 н. и 19 з.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2004114891/06, 17.05.2004**

(24) Effective date for property rights: **17.05.2004**

(45) Date of publication: **27.11.2005 Bull. 33**

Mail address:

142190, Moskovskaja obl., g. Troitsk, ul. Shkol'naja, 11, kv.5, A.E. Monichu

(72) Inventor(s):

**Monich A.E. (RU),
Monich E.A. (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Monich Anton Evgen'evich (RU),
Monich Evgenij Anatol'evich (RU)**

(54) MODE OF INCINERATION OF HYDROCARBON FUEL AND AN ARRANGEMENT FOR REALIZATION OF THIS MODE

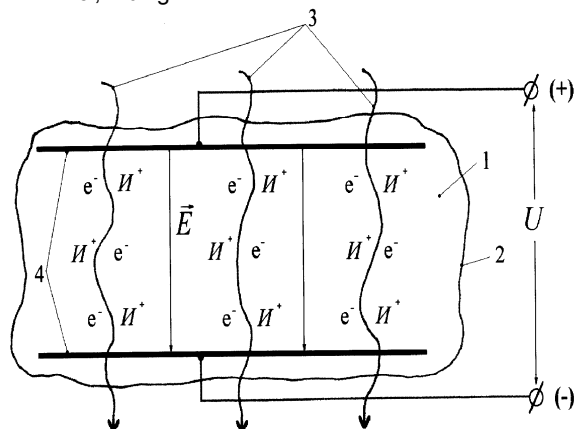
(57) Abstract:

FIELD: mode of incineration of hydrocarbon fuel and an arrangement for its realization refers to engines and power engineering with working processes including preliminary processing of fuel.

SUBSTANCE: the invention may be applied for incineration of fuel as in a periodic regime which is characteristic for reciprocating motors of internal combustion so as for fulfillment of streaming regimes of incineration of fuel, for example, in jet, turbojet, gas turbine engines and power installations. The mode realizes induced destruction of molecules of metastable intermediate products of incomplete oxidation of hydrocarbons, accumulated in gas volume of fuel-air mixture, by way of power impact leading to explosive three-dimensional spontaneous combustion of gas mixture. Peculiarity of the mode consists in that fuel-air mixture is enriched with free electrons and power impact on molecules of the mixture for excitation of oscillatory degrees of freedom of molecules is fulfilled by means of their inelastic concussion with free electrons, speeded up by electric field, which tension E is less than tension of switching to independent gas discharge. Enrichment of fuel-air mixture with free electrons is fulfilled by way of its ionization or by way of injection of electrons. The installation for realization of this mode has a combustion chamber with a source of power impact. The source of power impact consists of a unit of

enrichment of fuel-air mixture with free electrons and a source of a speeded up electric power which includes a system of electrons with controlled multiplexer switch connected to the sources of high-voltage tension. The invention allows to realize in a necessary moment of time momentary development of three-dimensional radical explosion in fuel-air mixture due to simultaneous destruction of the majority of accumulated metastable molecules of intermediate products. Destruction of molecules of intermediate products generates a great number of active radicals and particles dividing and creating new circuits of reaction of oxidation of hydrocarbon and leads to development of chain-radical explosion.

EFFECT: high effectiveness of incineration mode.
21 cl, 7 dwg



Фиг. 1

Изобретение относится к энергетике, в частности к сжиганию углеводородного топлива, и может быть использовано при производстве электроэнергии, при организации рабочего процесса в автомобильных двигателях, реактивных, турбореактивных и турбовентиляторных авиационных и ракетных двигателях, газотурбинных и других энергетических установках.

Известны различные методы сжигания углеводородного топлива, основанные на распространении фронта пламени. В качестве основных, можно указать периодическое сжигание топливно-воздушной смеси в бензиновых и дизельных двигателях внутреннего сгорания [1], непрерывное сжигание топливно-воздушной (-окислительной) смеси в ракетных и авиационных двигателях, пульсирующие режимы сжигания топливно-воздушной (-окислительной) смеси в ракетных и авиационных двигателях, непрерывное сжигание топливно-воздушной смеси в различных вариантах авиационных турбореактивных, турбовинтовых и турбовентиляторных двигателей, непрерывное сжигание топливно-воздушной смеси в газотурбинных двигателях и энергетических установках, а также в других вариантах сжигания струи топлива в окислительной среде, или струи предварительно перемешанной топливно-воздушной (-окислительной) смеси.

Известны способы образования фронта пламени путем поджигания топливно-воздушной смеси с помощью специальных устройств. В качестве таких устройств для периодического зажигания топлива, например, в двигателях внутреннего сгорания чаще всего используют различные виды электрических разрядов в газе, включая импульсный разряд между электродами в газе [1], комбинированный импульсный разряд через газовый промежуток и по поверхности диэлектрика [2], скользящий разряд по поверхности диэлектрика [3]. Для непрерывного сжигания топлива используют различные нагретые элементы, горелки и факелы с открытым пламенем и др.

Известно, что в углеводородных пламенах на всех стадиях горения происходит ионизация газа, например, в реакции $\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + \text{e}^-$ [4].

Известно и использование электрического поля для интенсификации горения топливно-воздушной смеси в автомобильных двигателях внутреннего сгорания [5].

Известны также методы возбуждения газовой среды высокого (десятки атмосфер) давления с помощью несамостоятельного разряда с целью создания инверсной заселенности уровней в мощных лазерах на CO_2 и некоторых других газах. Это, так называемый, электроионизационный метод накачки лазеров на сжатых газах [6]. Суть метода накачки заключается в непосредственном возбуждении молекулярных газов электронным ударом при движении сквозь газ свободных электронов в электрическом поле. Свободные электроны образуются в процессе предионизации газовой среды, которая осуществляется различными методами. Электрическое поле, ускоряющее свободные электроны, создается в газовом объеме с помощью системы электродов, размещенных в газовой среде. Подбор параметров газовой среды и электрического поля позволяет с высокой эффективностью осуществлять разные виды возбуждения газа, включая возбуждение колебательных степеней свободы, электронных степеней свободы, ионизацию газа.

Известно также использование несамостоятельного СВЧ-разряда в газе в качестве средства создания сильно неравновесных колебательно-возбужденных состояний молекулярной газовой лазерной среды [7].

Известно использование электронных пучков для предионизации газа высокого давления в электроионизационных лазерах [8].

Известно также применение скользящего разряда по поверхности диэлектрика в системах предионизации электроионизационных лазеров для получения самостоятельного и несамостоятельного объемных разрядов в межэлектродных промежутках [9]. При этом ионизация газовой среды осуществляется потоком жесткого электромагнитного излучения, источником которого является плазма скользящего разряда. Известно, что увеличение скорости нарастания разности потенциалов U при возбуждении скользящего разряда dU/dt до значений $\sim 10^{13}$ В/с отодвигает коротковолновую границу спектра излучения

скользящего разряда в область мягкого рентгена [10]. Известны и различные виды электродных систем для использования скользящего разряда по поверхности диэлектрика в качестве источника предварительной ионизации газовой среды CO_2 лазера, в том числе и устройства с так называемыми плазменными электродами [11]. В этих электродных системах ток основного разряда замыкается через плазму скользящего разряда, что и обусловило применение термина "плазменные электроды".

Известно также возникновение "убегающих" электронов, которые появляются при электрическом пробое сильно перенапряженных газовых промежутков [12]. Эти электроны образуются в результате предускорения в области краевого поля на фронте лавины развивающегося газового разряда и характеризуются тем, что ускоряются электрическим полем во всем межэлектродном промежутке, приобретая энергию в десятки килоэлектронвольт. Критерием убегания электронов является условие:

$$e \cdot E_f(x, \phi) / P > L_1(w) / \cos \theta \quad (1)$$

где $E_f(x, \phi)$ - результирующая напряженность электрического поля в точке "x" с учетом основного поля E_0 и поля поляризации плазменного облака E_p , если между векторами E_0 и E_p угол ϕ ; $L_1(w)$ - энергетические потери электрона с энергией w на единице длины пути, P - давление газа.

Анализ выражения для критерия убегания электронов (1) показывает, что удовлетворить критерию убегания можно, если электрон каким-либо способом приобретет энергию w_e выше, чем w_2 (фиг.5). Это может произойти как на стадии одиночных лавин, если параметр E_0/P достаточно велик, так и позже, после лавинно-стримерного перехода или в процессе эволюции стримеров, если $E_0/P \ll (E/P)_{кр}$. В сильно перенапряженных промежутках лавинно-стримерный переход осуществляется на пути $z \sim 100$ мкм. В результате такого перехода формируется плазменное облако с проводимостью, достаточной для создания фронтов ионизации и генерации убегающих электронов. Находясь в сильном электрическом поле, облако поляризуется. Далее процесс ионизации развивается за счет электронов, вырывающихся из облака и ускоряющихся в зоне действия пространственного заряда. Часть этих электронов приобретает энергию, большую, чем w_2 , и получает возможность непрерывно ускоряться вплоть до анода. Для реализации подобной ситуации при давлении газа $\sim$ нескольких десятков атмосфер требуются поля с напряженностью более 10^6 В/см.

Известны и методы получения свободных электронов, заключающиеся в использовании явления внешнего фотоэффекта из металлов и других материалов под действием потока электромагнитного излучения [13]. Квантовый выход фотоэмиссии, то есть число фотоэлектронов, эмитированных при поглощении одного фотона, из чистых металлических поверхностей в видимой области спектра имеет порядок 10^{-4} электрон/фотон, а при $h\nu \leq 10$ эВ, где $h\nu$ - энергия кванта электромагнитного излучения, не превышает 10^{-2} электрон/фотон. Металлы имеют высокий квантовый выход фотоэмиссии $\sim 10^{-1}$ электрон/фотон только в области $h\nu > 12$ эВ и обычно при наличии на их поверхности оксидных пленок.

Известны также способы сжигания топливно-воздушной смеси без распространения фронта пламени [14, 15]. При таких способах сжигания топлива создают условия для самовоспламенения топливно-воздушной смеси и сгорания ее до стадии образования конечных продуктов окисления синхронно во всем объеме камеры сгорания.

Известно, что, несмотря на разнообразие способов сжигания углеводородного топлива с фронтом пламени и без распространения фронта пламени, все они имеют общую характерную особенность, обусловленную кинетикой окисления углеводородного топлива. Эта особенность связана с тем, что химическая реакция окисления углеводородов является "цепной реакцией с вырожденным разветвлением" [16]. Причем стадии разветвления цепи наиболее важны в процессах горения, и особенно, в процессах воспламенения топлива. Последовательность элементарных реакций "цепной реакции с вырожденным разветвлением" содержит начальные реакции зарождения цепи и основную

цепь - реакции продолжения цепи, на каждом этапе которых происходит образование активного радикала взамен "потраченного". В процессе цепной реакции окисления происходит последовательная деградация исходных молекул углеводорода с образованием все более "коротких" молекул. На определенном этапе развития процесса деструктивного окисления исходных углеводородов происходит образование метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления. Эти продукты, в силу относительной стабильности своих молекул, накапливаются в реакционной среде. Однако они все же не являются по настоящему стабильными, и под воздействием внешних условий с некоторой вероятностью распадаются, порождая два активных радикала, которые осуществляют разветвление и зарождение новых цепей реакции окисления молекул углеводородов. Таким образом, отличительной особенностью кинетики окисления молекул углеводородов является генерация и накопление метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления, а образование новых цепей и ускорение реакции окисления происходит только после некоторого "подготовительного" периода при распаде накопленных метастабильных молекул. При достижении определенной скорости распада накопленных метастабильных продуктов реакция переходит во взрыв, что соответствует воспламенению топливно-воздушной смеси.

Во всех, кроме [15], представленных выше примерах использования горения углеводородов с целью получения тепловой энергии, разрушение метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов происходит вследствие повышения температуры T газовой среды за счет увеличения энергии поступательных степеней свободы у молекул газовой среды. В ходе повышения температуры все большая доля молекул обладает энергией теплового движения, превышающей энергию активации распада метастабильных молекул промежуточных продуктов. При столкновениях метастабильных молекул с другими молекулами, происходящих вследствие теплового движения, они могут получить дополнительную энергию, достаточную для активации процесса распада молекулы. Когда средняя энергия (температура) газовой среды достигает определенного значения, скорость распада метастабильных молекул и образования новых цепей реакции окисления углеводородов становится достаточной для необратимого развития "теплового взрыва".

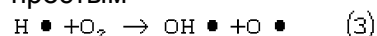
В работах [17÷21] и других, связанных с детальными исследованиями кинетики химической реакции окисления углеводородов, выполненных в последние 15÷20 лет, показано, что ключевой реакцией, приводящей к разветвлению цепей и необратимому переходу к воспламенению, является реакция распада пероксида водорода:



где M - другая молекула газовой среды или стенка реактора.

Так, анализ чувствительности и анализ путей реакции, выполненные в [21], показывают, что после реакции инициации $\text{RH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{R} \cdot + \text{HO}_2 \cdot$ ($\text{R} \cdot$ - углеводородный радикал) следуют реакции $\text{HO}_2 \cdot + \text{RH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{R} \cdot$ и реакция (2), осуществляющие разветвление цепи. Далее, радикалы $\text{OH} \cdot$, образованные в реакции (2), могут образовывать радикалы $\text{HO}_2 \cdot$, например в реакциях: $\text{OH} \cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H} \cdot$, $\text{H} \cdot + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 \cdot + \text{M}$, генерируя в большом количестве "предвестников"

последующих разветвлений цепи и обеспечивая развитие теплового "взрыва". Такое разветвление цепи возможно в интервале температур $T: 900 \text{ K} < T < 1100 \text{ K}$. Для более высоких температур $T > 1100 \text{ K}$, механизм разветвления цепи становится достаточно простым



и относительно независимым от природы топлива.

Реакция (2) описывается кинетическим уравнением первого порядка. Для того чтобы происходил мономолекулярный распад, молекула должна обладать запасом энергии, который может появиться в результате активирующих и дезактивирующих столкновений

между молекулами. Скорость реакции зависит от температуры и давления газовой среды.

На начальных стадиях развития процесса самовоспламенения, в так называемой низкотемпературной области, возможно накопление и других метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, таких как алкилпероксиды и алкилгидропероксиды, которые через цепочку химических реакций, распадов радикалов и процессов изомеризации превращаются в относительно стабильную кетогидропероксидную группу. Температура распада кетогидропероксидов составляет около 800 К, что несколько ниже, чем у молекул H_2O_2 [18]. Распад кетогидропероксидов приводит к образованию двух активных частиц и разветвлению реакции окисления углеводородов. Однако этот механизм разветвления цепей имеет вырожденный характер, в соответствии с которым сразу после его начала из-за небольшого роста температуры сдвигается равновесие реакций, генерирующих сложные соединения - "предвестники" разветвления, и прекращается подпитка реакции разветвления. После этого наступает задержка развития самовоспламенения (многостадийное самовоспламенение) до тех пор, пока не будут достигнуты условия (повышение температуры, накопление высокой концентрации пероксидов) протекания доминирующего процесса разветвления цепей, характерного для реальных систем, вследствие реакции распада молекул H_2O_2 [20]. Это справедливо и является основной особенностью кинетики процессов воспламенения углеводородов для лабораторных RCM экспериментов, явления стука в двигателях с искровым зажиганием, воспламенения в дизельных двигателях и при управлении процессом воспламенения в HCCI-engines. В каждой из этих систем H_2O_2 образуется при низких температурах и остается относительно инертным, пока температура, возрастая от сжатия и экзотермических реакций, не достигнет уровня, когда молекулы H_2O_2 быстро развалятся через реакцию (2) и не "запустят" разветвление цепей реакции окисления [18].

Скорость изменения числа молекул пероксида водорода H_2O_2 вследствие распада может быть представлена как:

$$d[\text{H}_2\text{O}_2]/dt = -[\text{H}_2\text{O}_2] \cdot [M] \cdot k_1, \quad (4)$$

где $[M]$ - молярная концентрация пероксида;

$k_1 = 1.2 \cdot 10^{17} \cdot \exp(-45500/RT)$ - константа скорости реакции (2).

Из формулы (4) можно получить выражение для "постоянной времени распада" τ молекул пероксида:

$$\tau = [\text{H}_2\text{O}_2] / (d[\text{H}_2\text{O}_2]/dt) = 1 / (k_1[M]) \quad (5)$$

В качестве примера оценим время распада для концентрации молекул пероксида $[M] \sim 10^{-4}$ моль/см³, полученной в [20] после сжатия топливно-воздушной смеси в RCM эксперименте. Вычисления τ (по формуле (5)) дают значения: $\tau_{900} = 7.8 \cdot 10^{-3}$ сек для $T = 900$ К; $\tau_{1000} = 6.4 \cdot 10^{-4}$ сек для $T = 1000$ К; $\tau_{1100} = 8 \cdot 10^{-5}$ сек для $T = 1100$ К.

Развитие процесса воспламенения углеводородов по приведенной выше схеме с тепловой стимуляцией распада метастабильных молекул промежуточных продуктов характеризуется слабой управляемостью ввиду статистической природы процесса термической деструкции и отсутствия естественного "механизма" быстрого воздействия на температуру всего газового объема. При сгорании топливно-воздушной смеси путем распространения фронта пламени воспламенение новых порций топлива происходит по такому же "механизму", как и рассмотренный выше "механизм" радикально - теплового взрыва, но с некоторыми особенностями, обусловленными диффузией активных радикалов из зоны пламени и процессами теплопередачи.

Из формулы (5) также видно, что процесс воспламенения чувствителен к значению концентрации $[M]$ молекул пероксида водорода, накопленных к этому моменту. В свою очередь, значение $[M]$ определяется многими параметрами, такими, например, как предыдущая "тепловая история", то есть динамика изменения тепловых характеристик воздействия на топливно-воздушную смесь; состав топливно-воздушной смеси; молекулярный состав топлива и др., непосредственно влияющими на скорость образования молекул пероксида водорода. Отсюда понятно, что при этом из-за большого числа

критичных параметров трудно обеспечить достаточную управляемость, точность и повторяемость момента перехода во взрыв. Указанная особенность имеет определяющее значение для применений, связанных с периодическим сжиганием топливно-воздушной смеси в изменяющихся условиях, например, в двигателях внутреннего сгорания и является

5 основной технической проблемой, сдерживающей практическую реализацию некоторых перспективных технологий, таких как "Homogeneous Charge Compression Ignition" and "Controlled Auto Ignition" (CAI (HCCI Engine)) [14].

Кроме того, основным последствием представленного механизма воспламенения топливно-воздушной смеси и ее сгорания путем распространения фронта пламени в

10 двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием является ограничение на неоправданно низком уровне допустимой степени сжатия γ ($\gamma \leq 11 \div 12$) из-за возникновения стука (детонации), неполное сгорание топлива, повышенная токсичность продуктов горения и, как следствие, низкий кпд.

Другой неприятной особенностью реакции с тепловым "механизмом" стимулирования разветвления цепей является относительно низкая скорость развития необратимого

15 процесса самовоспламенения. Причем скорость развития процесса занижена не по причине "принципиальных природных ограничений", а лишь из-за того, что на начальном этапе необратимого перехода к тепловому взрыву относительно медленно растет температура и, следовательно, медленно нарастает число распадающихся

20 метастабильных молекул из числа накопленных в топливно-воздушной смеси. Именно это обстоятельство лимитирует также скорость распространения пламени, или, что эквивалентно для большинства применений при непрерывном режиме сжигания топлива, скорость подачи топливно-воздушной смеси в зону горения.

При осуществлении сжигания топлива в непрерывном режиме, например в авиационных

25 прямоточных воздушно реактивных или газотурбинных двигателях, для организации горения в высокоскоростном потоке используют различные методы газодинамической стабилизации пламени. Один из них - размещение плохобтекаемого тела (стабилизатора), создающего перераспределение давления в потоке и, как следствие, зону обратных токов. В таком методе стабилизации продукты горения, циркулирующие в зоне обратных токов,

30 служат постоянным источником зажигания для вновь поступающей топливно-воздушной смеси. Устойчивость турбулентного диффузионного пламени на стабилизаторе по отношению к скорости набегающего потока и расходу топлива - очень критичный параметр, во многом определяющий характеристики энергетической установки. Пламя устойчиво в тех случаях, когда скорость подачи топливно-воздушной смеси не превышает значения,

35 при котором существуют обратные токи, нагревающие новые порции свежей горючей смеси.

Способ периодического сжигания топливно-воздушной смеси без распространения фронта пламени [15] основан на принудительном разрушении метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов в объеме горючей смеси

40 путем энергетического воздействия. В этом способе при разрушении метастабильных молекул происходит разветвление реакции, быстро развивается цепной взрыв во всем объеме топливно-воздушной смеси, где были разрушены молекулы. Таким образом, разрушение метастабильных молекул функционально заменяет зажигание топливно-воздушной смеси. Указанный способ сжигания топливно-воздушной смеси при

45 использовании в качестве энергетического воздействия слабой ударной волны или потока электромагнитного излучения наиболее близок к настоящему изобретению и выбран в качестве прототипа.

Предложенный в [15] вид энергетического воздействия, связанный с использованием слабой ударной волны, может быть использован только в периодическом режиме сжигания

50 топливно-воздушной смеси в условиях двигателя внутреннего сгорания и не может быть распространен на случаи непрерывного горения, характерные для сжигания топливно-воздушной смеси, например, в непрерывном проточном режиме. Другой предложенный в [15] вид энергетического воздействия путем облучения горючей смеси потоком

электромагнитного излучения с энергией квантов, достаточной для разрушения метастабильных молекул, в принципе, может быть использован и в непрерывном режиме горения. Однако при практическом применении указанного вида энергетического воздействия существуют принципиальные трудности, связанные с созданием источника электромагнитного излучения, обладающего необходимой плотностью потока излучения (так как каждый квант электромагнитного излучения разрушает только одну молекулу, поглотившую этот квант, для разрушения требуемого количества метастабильных молекул, удельная плотность которых в газовой среде менее $3\div 5\%$, необходимо создавать потоки излучения плотности $\sim 10^{15}\div 10^{19}$ фотонов/см²) и трудности обеспечения его работоспособности в условиях камеры сгорания. При этом существуют также принципиальные трудности обеспечения равномерности засветки всего объема камеры сгорания из-за высокого коэффициента поглощения излучения в газовой среде. По этим причинам проблематично осуществить на практике такую засветку зоны горения, которая требуется для достаточно полного и однородного по объему разрушения метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов в зоне горения топлива, и обеспечить условия для быстрого развития радикально-цепного взрыва.

Техническим результатом настоящего изобретения является осуществление мгновенной реакции радикально-цепного взрыва во всем объеме топливно-воздушной смеси за счет реализации практически одновременного разрушения большинства накопленных метастабильных молекул промежуточных продуктов, приводящего к образованию большого числа активных радикалов, разветвляющих и порождающих новые цепи реакции окисления углеводородного топлива. Изобретение обеспечивает повышение эффективности сжигания углеводородного топлива, увеличение скорости распространения пламени и повышение устойчивости горения при непрерывном режиме сжигания топлива, а также ускорение процесса развития воспламенения и окисления топлива до конечных продуктов по сравнению с известными способами осуществления сжигания углеводородного топлива за счет реализации массового разветвления цепной реакции окисления молекул углеводородов.

Для достижения поставленного технического результата в известном способе сжигания углеводородного топлива, при котором реализуют стимулированное разрушение молекул метастабильных промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, накопленных в газовом объеме топливно-воздушной смеси, путем энергетического воздействия, предложено топливно-воздушную смесь обогатить свободными электронами, а энергетическое воздействие на молекулы горючей смеси осуществить посредством их неупругих соударений со свободными электронами, ускоряемыми электрическим полем, напряженность E которого, меньше напряженности перехода к самостоятельному газовому разряду.

Предусмотрены также следующие конкретные усовершенствования способа сжигания углеводородного топлива:

- обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами осуществляют путем ее ионизации;
- обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами осуществляют путем инъекции электронов;
- напряженность E ускоряющего электрического поля составляет $0.1\div 0.2$ части напряженности электрического поля пробоя газового промежутка;
- обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами и ускорение их электрическим полем осуществляют импульсно, причем импульсы обогащения горючей смеси свободными электронами совпадают по времени с импульсами ускоряющего электрического поля;
- топливно-воздушную смесь пропускают через зону, в которой производят ее непрерывное обогащение свободными электронами, и зону, в которой производят ускорение свободных электронов в электрическом поле, при этом скорость протекания топливно-воздушной смеси и геометрия зон воздействия подобраны так, что время жизни

свободных электронов превышает время между моментом их образования и моментом попадания в зону воздействия ускоряющего электрического поля;

- ускорение свободных электронов осуществляют переменным электрическим полем;
- ускорение свободных электронов осуществляют переменным электрическим полем

5 СВЧ диапазона с $E_{эфф} \sim (1 \div 5) \cdot 10^{-16} \text{ Н В/см}$;

- в качестве ионизирующего излучения используют жесткое электромагнитное излучение, содержащее кванты с энергией выше потенциала ионизации, по крайней мере, одного из компонентов газа, составляющего топливно-воздушную смесь;

10 - жесткое электромагнитное излучение получают посредством скользящего электрического разряда по поверхности диэлектрика с $\epsilon \geq 2$;

- в качестве жесткого электромагнитного излучения используют тормозное излучение электронов в области "мягкого рентгена";

15 - жесткое электромагнитное излучение в области "мягкого рентгена" получают посредством скользящего электрического разряда по поверхности диэлектрика с $\epsilon \geq 2$ при скорости нарастания разности потенциалов на электродах $dU/dt > 10^{12} \text{ В/сек}$;

- в качестве ионизирующего излучения используют быстрые электроны;

20 - свободные электроны получают путем фотоэмиссии при облучении токопроводящего фотоэмиттера потоком электромагнитного излучения с энергией квантов не менее пороговой энергии "выхода" фотоэлектронов в топливно-воздушную смесь.

25 Для реализации способа сжигания углеводородного топлива предложено устройство, содержащее камеру сгорания с источником энергетического воздействия. Особенность устройства, в отличие от прототипа, заключается в том, что источник энергетического воздействия состоит из источника ускоряющего электрического поля, включающего систему электродов с управляемыми коммутаторами, подключаемыми к источникам
высоковольтного напряжения, и устройства обогащения свободными электронами топливно-воздушной смеси.

Предусмотрены следующие варианты исполнения устройства:

30 - в качестве устройства обогащения свободными электронами топливно-воздушной смеси применен источник ионизирующего излучения;

- устройство обогащения свободными электронами выполнено в виде фотоэмиттера, включенного в качестве катода в электрическую цепь системы электродов источника ускоряющего электрического поля;

35 - камера сгорания выполнена в виде конденсатора, обкладки которого являются электродами источника ускоряющего электрического поля, а устройство обогащения свободными электронами размещено в зазоре между электродами;

- устройство обогащения свободными электронами состоит из двух электродов и источников электромагнитного излучения, размещенных по периферии межэлектродного зазора;

40 - в качестве высоковольтных электродов источника ускоряющего электрического поля использована плазма скользящего разряда источника ионизирующего излучения;

45 - система электродов источника ускоряющего электрического поля состоит из двух электродов с потенциалами разной величины, выполненных проницаемыми для прокачиваемой топливно-воздушной смеси и образующих зону возбуждения колебательных степеней свободы молекул топливно-воздушной смеси, а источник свободных электронов реализован в виде зоны окисления углеводородов топливно-воздушной смеси, при этом в устройство введен третий электрод с потенциалом ниже меньшего потенциала двух электродов источника ускоряющего электрического поля, при этом электрод источника электрического поля с меньшим потенциалом примыкает к зоне окисления и образует
50 вместе с третьим электродом систему транспортировки свободных электронов в зону возбуждения колебательных степеней свободы молекул топливно-воздушной смеси.

Существо изобретения поясняется прилагаемыми чертежами.

На фиг.1 показана принципиальная схема устройства для реализации способа сжигания углеводородного топлива с разрушением метастабильных молекул путем возбуждения

колебательных и вращательных степеней свободы за счет неупругих соударений со свободными электронами, движущимися в электрическом поле.

На фиг.2 показана схема устройства для реализации способа при непрерывном режиме сжигания топливно-воздушной смеси.

5 На фиг.3 показана схема устройства для осуществления способа в непрерывном режиме сжигания топливно-воздушной смеси при использовании в качестве источника свободных электронов зоны окисления (горения) углеводородов топливно-воздушной смеси.

На фиг.4 показана схема устройства при использовании в качестве электрода источника ускоряющего электрического поля плазмы скользящего разряда источника ионизирующего
10 излучения.

На фиг.5 показан характерный вид зависимости энергетических потерь электронов на единице пути от энергии электронов.

На фиг.6 показана в относительных единицах эффективность различных механизмов потерь энергии электронами в зависимости от отношения электрического поля к давлению
15 для молекулярного азота [22].

На фиг.7 представлены результаты вычислений постоянной времени распада τ колебательно возбужденных молекул пероксида водорода H_2O_2 для варианта молярной концентрации $[M]_{H_2O_2} = 10^{-4}$ моль/см³, характерной для практических систем
20 [20].

Способ сжигания углеводородного топлива осуществляют следующим образом: приготовленную топливно-воздушную (окислительную) смесь 1 предварительно подвергают сжатию или непосредственно в камере сгорания, ограниченной оболочкой 2, или вводят сжатую смесь в объем камеры сгорания; затем газовую смесь обогащают
25 свободными электронами путем инъекции или образуют свободные электроны непосредственно в объеме газовой смеси, например, путем частичной ионизации с образованием свободных электронов e^- и ионов H^+ при помощи источника ионизирующего излучения 3 (фиг.1). Свободные электроны ускоряют электрическим полем, создаваемым электродами 4, имеющим напряженность E , меньшую, чем напряженность перехода к
30 самостоятельному разряду, в частности, напряженность E составляет $0.1 \div 0.2$ части от значения напряженности пробоя газа.

В случае периодического сжигания топливно-воздушной смеси момент инъекции свободных электронов в топливно-воздушную смесь или момент образования свободных электронов путем ионизации топливно-воздушной смеси должен предшествовать или
35 совпадать по времени с воздействием электрическим полем, которое создают с помощью электродов 4, размещенных в камере сгорания. То есть, во все время, или в часть времени действия ускоряющего электрического поля в объеме топливно-воздушной смеси должны иметься свободные электроны. При этом продолжительность действия ускоряющего электрического поля должна быть достаточной для необратимого развития
40 процесса самовоспламенения топливно-воздушной смеси.

Свободные электроны под действием электрического поля с напряженностью E приобретают энергию, достаточную для возбуждения колебательных состояний молекул топливно-воздушной смеси 1 путем неупругих соударений с этими молекулами, в том числе молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, включая
45 метастабильные молекулы. Возбуждение колебательных состояний метастабильных молекул, например, пероксида водорода облегчает их распад на два радикала $OH\cdot$, которые разветвляют цепную реакцию окисления углеводородов, быстро доводят горючую смесь до воспламенения и, совместно с колебательно возбужденными молекулами других промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, сокращают время
50 протекания реакции окисления вплоть до образования конечных продуктов сгорания топлива.

В случае непрерывного сжигания топливно-воздушной смеси (фиг.2) в проточном режиме с использованием несамостоятельного электрического разряда в газе для

возбуждения колебательных уровней у молекул газовой среды и стимулированного разрушения метастабильных молекул пероксида водорода, вдоль камеры сгорания (реактора) пропускают сжатую заранее приготовленную или приготовляемую в объеме реактора топливно-воздушную смесь, которая пересекает поток проникающего ионизирующего излучения 3 и/или зону инъекции свободных электронов (зону обогащения) и попадает в зазор между электродами 4, к которым приложена разность потенциалов U , создающая между электродами электрическое поле нужной напряженности E . При работе устройства происходят те же процессы, что и в предыдущем случае, но в непрерывном временном режиме. Скорость протекания топливно-воздушной смеси и геометрия зон ионизирующего и электрического воздействия на смесь подобраны так, что время жизни свободных электронов превышает время между моментом их образования и моментом попадания в зону воздействия электрического поля.

В непрерывном режиме сжигания топливно-воздушной смеси, при использовании в качестве источника свободных электронов зоны окисления 5 (фиг.3) углеводородов топливно-воздушной смеси, последнюю пропускают вдоль полости камеры через газопроницаемые электроды 6 и 7 с потенциалами разной величины, создающими в зазоре между электродами электрическое поле необходимой напряженности E для колебательного возбуждения молекул. Электрод 6 с более низким потенциалом примыкает к зоне окисления 5. Третий электрод 8 находится под потенциалом более низким, чем потенциал электрода 6. Электрические потенциалы электродов 6 и 8 подбирают такими, чтобы электрическое поле, создаваемое в зазоре между этими электродами, вытягивало свободные электроны, образующиеся в зоне горения в результате химических реакций окисления топлива, например, в результате реакции $CH + O \rightarrow CHO^+ + e^-$, в зазор между электродами 6 и 7. После того, как свободные электроны e^- попадают в этот промежуток, они под действием электрического поля E набирают энергию и производят возбуждение колебательных уровней молекул набегающей топливно-воздушной смеси 1. Далее поток горючей смеси 1 с колебательно возбужденными молекулами попадает в зону окисления 5, и в ней происходят интенсифицированные процессы горения. Поток продуктов горения 9 вытекает из камеры сгорания. В данном методе отпадает необходимость применения поджигающих горелок или стабилизатора горения, создающего обратные токи продуктов горения, которые играют роль поджигающего устройства. В самом деле, поскольку разрушение метастабильных молекул функционально заменяет зажигание, потребность в поджигающих обратных токах горячей топливно-воздушной смеси отпадает. Это, а также то, что по сравнению с обычными методами сжигания скорость сгорания колебательно возбужденной топливно-воздушной смеси увеличивается, позволяет существенно поднять скорость протекания горючей смеси через реактор.

В одном из вариантов реализации способа предложено использовать только электроды 6 и 8. В этом случае электрические потенциалы электродов подобраны так, что свободные электроны вытягиваются из зоны окисления 5 электрическим полем, образованным в зазоре между электродами 6 и 8, а его напряженность E достаточна для возбуждения колебательных степеней свободы молекул топливно-воздушной смеси при их соударениях со свободными электронами, движущимися в этом поле.

Возможно также использование для возбуждения колебательных степеней свободы молекул газовой топливно-воздушной смеси несамостоятельного СВЧ разряда, амплитуда электрического поля $E_{свч}$ которого должна составлять $E_{свч} \leq 5 \text{ кВ/см} \cdot \text{атм}$. При этом параметры излучения подбираются так, что $E_{эфф} \sim (1 \div 5) \cdot 10^{-16} \cdot N \text{ В/см}$, где $E_{эфф} = (E_{свч} / 2^{1/2}) \cdot (1 + \omega^2 / \nu_{эфф}^2)^{-1/2}$, где ω - угловая частота СВЧ излучения, $\nu_{эфф}$ - эффективная частота столкновений электрон - нейтральная молекула, N - концентрация молекул газовой среды.

Для обогащения свободными электронами топливно-воздушной смеси в достаточной концентрации предусмотрено несколько модификаций источника ионизирующего излучения.

В одном из вариантов реализации изобретения в качестве источника ионизирующего излучения предложено использовать источник жесткого электромагнитного излучения, содержащего кванты с энергией выше потенциала ионизации минимум одного из компонентов газа, составляющего топливно-воздушную смесь. Такими источниками излучения могут быть: газовые разряды различных типов, развивающиеся непосредственно в ионизируемой газовой среде; газовые разряды в изолированной от основного объема газовой среде; эксимерные или другие виды лазеров, имеющих нужную длину волны излучения; другие известные источники жесткого электромагнитного излучения. Плотность потока электромагнитного излучения, используемого для ионизации, может быть уменьшена по сравнению с прототипом в $\sim 10^6$ раз благодаря многократному использованию свободных электронов и из-за "перетекания" возбуждения от долгоживущих в возбужденном состоянии молекул азота N_2 , составляющих $\sim 75\%$ молекул газовой среды, к молекулам промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов в процессе релаксации при многократных взаимных соударениях молекул газовой среды.

В другом варианте реализации изобретения предложено использовать для ионизации газового объема топливно-воздушной смеси мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов излучения от единиц до нескольких десятков килоэлектронвольт (кэВ). Такое излучение обладает достаточной проникающей способностью для сравнительно однородной ионизации газового объема, характерного для обычно используемых камер сгорания. На практике возможна реализация импульсных источников мягкого рентгеновского излучения. Поэтому рассматриваемый вариант реализации относится к использованию для периодического сжигания топливно-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания.

В частности, можно использовать импульсный газоразрядный источник мягкого рентгеновского излучения на основе "убегающих" электронов. Удовлетворить критерию "убегания" электронов можно в сильно перенапряженных разрядных промежутках. В предложенном варианте реализации изобретения используется устройство, изображенное на фиг.4. Это устройство состоит из двух или нескольких электродов, размещенных на поверхности диэлектрика 10 с величиной диэлектрической постоянной $\epsilon > 2$. В качестве примера реализации опишем работу устройства, содержащего два электрода. Один из электродов 11 размещен на тыльной поверхности диэлектрика 10 под другим электродом 12 и выходит на лицевую поверхность, образуя разрядный промежуток 13 на поверхности диэлектрика. При приложении импульса напряжения U к электродам 11 и 12 диэлектрик поляризуется в электрическом поле, образуя связанные электрические заряды с плотностью σ на поверхности диэлектрика, которые ослабляют электрическое поле внутри диэлектрика в ϵ раз. Вблизи электрода 12, где величина электрического поля максимальна, связанный заряд на поверхности диэлектрика достигает максимальной величины. Вследствие этого между электродом 12 и поверхностными поляризационными зарядами диэлектрика возникают гигантские локальные перенапряжения. В результате поляризации диэлектрик как бы "транслирует" потенциал (величина поверхностного потенциала составляет $[(\epsilon-1)/\epsilon]U_{11}$) с нижнего электрода 11 на лицевую поверхность диэлектрика в непосредственной близости от электрода 12. При достаточно быстром, $dU/dt > 10^{12}$ В/сек, нарастании разности потенциалов U , приложенных к электродам 11 и 12, ионы газовой среды не успевают нейтрализовать связанные заряды на поверхности диэлектрика и напряженность электрического поля $E_{\text{лок}}$ вблизи электрода 12 достигает значений порядка 10^8 В/см. При такой напряженности электрического поля возникает взрывная эмиссия электронов [23] с поверхности электрода 12. При этом эмитированные электроны на начальном этапе приобретают энергию $w_e > w_2$ (фиг.5) и этим соблюдается условие для выполнения "критерия убегания электронов", а также реализуется условие непрерывного ускорения электронов вплоть до энергии в несколько десятков килоэлектронвольт. В процессе их взаимодействия с газом возникает тормозное излучение в области мягкого рентгена, которое осуществляет предионизацию газовой среды, генерируя свободные электроны в объеме газа и подготавливая условия для возбуждения

колебательных степеней свободы молекул газовой смеси. После возбуждения в объеме газа электрического поля напряженности E_y свободные электроны набирают энергию и при неупругих соударениях с молекулами газовой среды возбуждают колебательные степени свободы молекул. Электрическое поле с напряженностью E_y создается в объеме топливно-воздушной смеси системой электродов, которые подключены через управляемые коммутаторы R и R_1 (фиг.4) к высоковольтным источникам электропитания. В качестве одного из электродов источника электрического поля могут быть использованы конструктивные элементы и стенки камеры сгорания, а другой электрод размещен на сопротивной стороне камеры сгорания на диэлектрической подложке, закрепленной на одном из конструктивных элементов или стенке камеры сгорания. В одном из вариантов (фиг.4) реализации предложено использовать в качестве высоковольтных электродов источника электрического поля плазму скользящего разряда, которая возникает в процессе развития пробоя газового промежутка по поверхности диэлектрика.

В одном из вариантов реализации изобретения предложено использовать для ионизации газовой топливно-воздушной смеси и подготовки условий для последующего возбуждения колебательных уровней молекул газа поток быстрых электронов, который образует в газе вторичные электроны низкой энергии. В качестве источника быстрых электронов могут быть использованы β -активные изотопы или источники ускоренных электронов.

В другом варианте реализации изобретения предложено использовать совместно с ионизацией газовой топливно-воздушной смеси, в процессе которой получают в объеме газовой среды свободные электроны, дополнительный источник свободных электронов. В качестве дополнительного источника свободных электронов предложено использовать эмиттер фотоэлектронов. В качестве эмиттера фотоэлектронов предложено использовать конструктивные элементы и стенки камеры сгорания. Неизбежные "загрязнения" внутренней поверхности и конструктивных элементов камеры сгорания пленками окислов и других соединений, как правило, уменьшают работу выхода электронов с поверхности металла и поэтому не препятствуют использованию этих поверхностей в качестве фотоэмиттеров. В другом варианте реализации может быть использован специализированный фотоэмиттер с высоким квантовым выходом фотоэлектронов в спектральной области возбуждающего электромагнитного излучения $\lambda \approx 200 \div 400$ нанометров. Для образования свободных электронов фотоэмиттер должен быть "засвечен" при помощи источника электромагнитного излучения, имеющего спектр излучения с энергией квантов выше порога фотоэмиссии из данного фотоэмиттера, а сам эмиттер должен быть включен в электрическую цепь в качестве катода. В предложенном варианте реализации катод системы электродов, образующих электрическое поле, воздействующее на свободные электроны, может являться фотоэмиттером. В одном из вариантов реализации при периодическом режиме сжигания углеводородов предложено использовать в качестве источника электромагнитного излучения, засвечивающего фотоэмиттер, плазму скользящего разряда по поверхности диэлектрика. Измеренная в [24] эффективность преобразования запасенной энергии в УФ излучение в спектральном диапазоне 250÷350 нм составила 2%. При запасенной энергии ~50 миллиджоулей такой поток электромагнитного излучения ($\sim 2 \cdot 10^{15}$ фотонов) создаст $\sim 10^{12} \div 10^{14}$ фотоэлектронов (свободных электронов). При практической реализации предложенного устройства обогащения топливно-воздушной смеси свободными электронами камера сгорания может быть выполнена в виде конденсатора, "диэлектриком" которого является топливно-воздушная смесь, а "обкладками" конденсатора являются электроды системы ускорения свободных электронов. Роль одного из электродов, как уже указывалось, могут выполнять конструктивные элементы и стенки камеры сгорания. Устройство обогащения в виде источника ионизирующего излучения или источника электромагнитного излучения, засвечивающего фотоэмиттер, может быть размещено в зазоре между электродами. В другом варианте выполнения устройство обогащения свободными электронами в виде источника ионизирующего излучения или источника электромагнитного излучения может

быть рассредоточено, например иметь несколько разрядных промежутков, и размещено по периферии камеры сгорания. При этом источники излучения ориентированы так, что поток ионизирующего излучения направлен в зазор между электродами, а поток электромагнитного излучения направлен на фотоэмиттер.

5 При использовании в качестве полеобразующих электродов плазмы скользящего разряда по поверхности диэлектрика, например в соответствии с вариантом фиг.4, сама плазма скользящего разряда будет являться эффективным источником свободных электронов. При характерных для данного применения напряженностях электрического поля E электроны из "плазменного" катода будут вытягиваться в топливно-воздушную
10 смесь и осуществлять процесс возбуждения колебательных состояний молекул газовой среды.

Развитие процесса самовоспламенения топливно-воздушной смеси после возбуждения колебательных степеней свободы молекул газовой среды во всех случаях, описанных в предыдущих примерах реализации устройства (фиг.1÷фиг.4), происходит по схожему
15 сценарию, обусловленному способом сжигания углеводородного топлива, при котором осуществляют разрушение метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов.

Способ сжигания углеводородного топлива, при котором осуществляют разрушение метастабильных молекул промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов,
20 состоит в возбуждении колебательных степеней свободы молекул путем неупругих соударений свободных электронов, движущихся через молекулярный газ топливно-воздушной среды под действием электрического поля. Обычно топливно-воздушная смесь примерно на 75% состоит из молекул азота N_2 . Поэтому свободные электроны при движении через этот молекулярный газ будут, в основном, испытывать соударения с
25 молекулами азота. При неупругих соударениях электроны передают энергию, накопленную между столкновениями, различным степеням свободы молекул. На фиг.6: кривая 1 показывает долю энергии, передаваемой в единицу времени на возбуждение колебательных уровней; кривая 2 - долю на возбуждение электронных уровней; кривая 3 - на ионизацию при движении электрона через молекулярный азот с давлением P под действием электрического поля E . Аналогичный вид имеют зависимости и для других молекулярных газов. Из фиг.6 видно, что при значениях приведенной напряженности электрического поля $E/P < 15$ В/см.торр, основным механизмом потерь энергии электронами является возбуждение колебаний молекул. При возбуждении молекулярных газов, таких как
30 CO_2 , CO , N_2 , у которых максимум сечения возбуждения колебаний молекул $\sigma_v \approx 10^{-15}$ см² расположен в области 1÷2 эВ и величина сечения резко спадает при увеличении и уменьшении энергии электронов, до 98% энергии расходуется на возбуждение колебаний. Под действием неупругих соударений с электронами молекулы азота переходят с нижнего уровня v_0 на возбужденные колебательные уровни $v_{1÷8}$.
40 Колебательно-возбужденные молекулы азота, имеющие нулевой дипольный момент, живут очень долго, и, по существу, единственным механизмом отвода их колебательной энергии служат столкновения с невозбужденными молекулами, в том числе, и с молекулами промежуточных продуктов. Во время этих столкновений колебательно возбужденные молекулы азота обмениваются колебательными квантами, которые имеют величину 0.29
45 эВ, с другими молекулами. В конечном итоге, это приводит к возбуждению колебательных уровней метастабильных молекул и других молекул промежуточных продуктов, участвующих в цепной реакции окисления углеводородов.

Акцентируя внимание на главном, необходимо отметить, что указанный механизм обладает наибольшей эффективностью для возбуждения колебательных уровней молекул,
50 находящихся в основном электронном состоянии. Причиной этого является использование относительно слабого электрического поля $\sim 3\div 4$ кВ/см.атм (киловольт на сантиметр на атмосферу). В таких полях энергия электрического тока расходуется почти полностью на возбуждение колебаний, а доля энергии, идущая на возбуждение электронных уровней и на

ионизацию, практически равна нулю. Ключевой для данного применения особенностью
 несамостоятельного газового разряда, поддерживаемого в таких электрических полях,
 является объемный характер разряда, захватывающего весь объем, где имеются
 свободные электроны и куда проникает электрическое поле, отсутствие контракции
 5 разряда. Именно это и позволяет достаточно равномерно возбудить молекулы газовой
 среды и создать условия для объемного самовоспламенения топливно-воздушной смеси.

Другой, важной для практических применений, особенностью предложенного способа
 является высокая эффективность использования свободных электронов. Несмотря на то,
 что газообразная топливно-воздушная смесь, в которой движутся электроны, является
 10 электроотрицательной средой и время жизни свободных электронов при движении в такой
 среде ограничено не только процессом рекомбинации с положительно заряженными
 ионами, но и процессами прилипания к молекулам электроотрицательных компонентов
 газовой среды, число неупругих соударений за время жизни свободного электрона
 достигает $\sim 10^3 \div 10^4$. За время между неупругими соударениями электрон успевает набрать
 15 энергию $\sim 0.5 \div 1.5$ эВ. При неупругих соударениях эта энергия полностью идет на
 возбуждение колебательных уровней молекул. Колебательная энергия молекул после
 таких соударений соответствует тысячам градусов, а поступательная энергия находится в
 тепловом равновесии со средой. Высокая плотность колебательно возбужденных молекул
 и большое время жизни возбужденных состояний молекул азота N_2 приводит к быстрому
 20 возбуждению (в основном, путем передачи "колебательных квантов" от возбужденных
 молекул азота N_2) метастабильных и других молекул промежуточных продуктов неполного
 окисления углеводородов, непосредственно участвующих в реакциях окисления.

С учетом колебательного возбуждения до соответствующей колебательной энергии E_v ,
 константа скорости $k_{1,v}(T; E_v)$ реакции (2) для колебательно возбужденных молекул может
 25 быть представлена в виде:

$$k_{1,v}(T; E_v) = m_1 \exp\left\{\left(E - \alpha \cdot E_v\right) / RT\right\} \quad (6),$$

где $m_1 = 1.2 \cdot 10^{17}$ - предэкспоненциальный множитель константы скорости реакции
 (2), α - коэффициент использования колебательной энергии. Видно, что для колебательно
 30 возбужденных молекул с энергией E_v активационный барьер как бы снижается на
 величину $\alpha \cdot E_v$.

Для рассматриваемого случая мономолекулярной реакции спонтанной диссоциации
 пероксида водорода (2) значение $\alpha \cong 1$. Результаты вычислений постоянной времени
 распада колебательно возбужденных метастабильных молекул H_2O_2 , выполненные с
 35 использованием выражения (6), показывают, что возбуждение колебательных уровней
 существенно расширяет область рабочих температур, при которых возможен быстрый
 (например, $\tau < 0.5 \cdot 10^{-3}$ сек) процесс самовоспламенения подготовленной топливно-
 воздушной смеси. И, самое главное, до возбуждения колебательных уровней развития
 самовоспламенения топливно-воздушной смеси не происходит из-за недостаточно высокой
 40 температуры, а после быстрого процесса возбуждения колебательных уровней (менее 1
 мкс) происходит практически мгновенное развитие самовоспламенения. Таким образом,
 появляется эффективный дистанционный "механизм" (фактически спусковой механизм)
 управления процессом самовоспламенения. Представленное семейство кривых,
 соответствующих уровням возбуждения колебательных состояний до энергии $0.1 \div 1.5$ эВ,
 45 при сравнении с кривой "А", соответствующей зависимости постоянной времени
 распада τ_0 молекул H_2O_2 от температуры в Кельвинах, расположено сильно "слева", что
 означает достижение той же скорости распада при существенно более низких
 температурах. При использовании предложенного способа, например, в двигателе
 внутреннего сгорания топливно-воздушная смесь сжимается в такте сжатия, при этом
 50 растёт температура горючей смеси, повышается давление, происходят цепные реакции
 низкотемпературного многостадийного самовоспламенения, в ходе которых образуются и
 накапливаются метастабильные молекулы H_2O_2 и другие молекулы промежуточных
 продуктов неполного окисления углеводородов. В качестве примера рассмотрим случай,

когда двигатель работает в таком режиме, что после такта сжатия температура топливно-воздушной смеси составляет 850 К. Постоянная времени распада метастабильных молекул H_2O_2 , соответствующая этому состоянию топливно-воздушной смеси, находится на кривой "А" в точке A_1 (фиг.7). Видно, что $\tau_{A_1} \sim 3 \cdot 10^{-2}$ сек и ни о каком самовоспламенении топливно-воздушной смеси вблизи "верхней мертвой точки" говорить не приходится. Обычно в таких и подобных (когда τ большое) случаях горючую смесь поджигают свечой зажигания. (На практике, в двигателях внутреннего сгорания со сжатием приготовленной топливно-воздушной смеси, горючую смесь поджигают всегда с тем или иным опережением вблизи верхней мертвой точки). В отличие от этого в предложенном способе в момент времени, соответствующий "верхней мертвой точке", осуществляют энергетическое воздействие на топливно-воздушную смесь, приводящее к возбуждению колебательных уровней молекул газовой среды. После этого, в процессе релаксации, за время менее 10^{-6} сек, преимущественно возбужденные молекулы азота N_2 передают энергию возбуждения молекулам промежуточных продуктов и, в конечном итоге, возбуждают колебательные степени свободы практически у всех накопленных молекул H_2O_2 . В результате возбуждения колебательных состояний метастабильных молекул постоянная времени их распада τ резко уменьшается. Значения τ для разных температур и энергий возбуждения колебательных уровней молекул H_2O_2 могут быть найдены с помощью семейства кривых, показанных на фиг.7. В представленном случае "приемлемое" для практического использования время распада $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ сек и, соответственно, время развития самовоспламенения топливно-воздушной смеси будет соответствовать энергии возбуждения $E_{\nu} \geq 0.3$ эВ, равной энергии, получаемой при обмене одним квантом колебательной энергии возбужденной молекулы азота N_2 . Таким образом, из фиг.7 видно, что стимулированное самовоспламенение топливно-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания возможно для всех существенных режимов работы двигателя.

Возможно также развитие самовоспламенения топливно-воздушной смеси по другому пути. Реакция "высокотемпературного" разветвления (3) имеет энергию активации 70.3 кДж/моль и может играть существенную роль для развития процесса самовоспламенения только при температуре более 1100÷1200 К. Однако оценки, выполненные с использованием выражения типа (6), для реакции "высокотемпературного" разветвления (3), показывают, что после возбуждения колебательных уровней молекул газовой среды эффективная температура процесса разветвления цепи по этому пути понижается на $\sim 300 \div 500$ К. По этой причине на многих режимах работы возможен такой механизм самовоспламенения, при котором сразу после возбуждения колебательных уровней молекул газовой среды развивается кинетически простой и слабо зависимый от вида топлива процесс разветвления цепи по реакции (3).

Существенной кинетической особенностью предложенного способа сжигания углеводородного топлива является то, что при его использовании из-за сильной неравновесности реакционной системы, когда "колебательная" температура возбужденных молекул соответствует тысячам градусов, а "поступательная" температура практически не изменяется по сравнению с начальным (имеется в виду начало процесса возбуждения колебательных степеней свободы молекул) значением, как бы убирается "вырожденный" характер разветвления цепной реакции. Это означает, что не блокируется возникновение новых молекул "предвестника" образования молекул пероксида - молекул $\text{HO}_2 \bullet$, которые продолжают образовываться в топливно-воздушной смеси и обеспечивать подпитку молекулами пероксида в ходе реакции $\text{HO}_2 \bullet + \text{RH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{R} \bullet$. Таким образом, на начальных стадиях развития самовоспламенения после колебательного возбуждения молекул, возможно одновременное протекание процесса разветвления и по реакции (2), и по реакции (3). Когда в процессе окисления углеводородов с участием колебательно возбужденных молекул промежуточных продуктов энергия молекул становится достаточной, механизм разветвления цепного процесса окисления переходит к реакции (3).

Реакция разветвления (3) является также основной реакцией разветвления в процессе

горения водородно-кислородной системы [25]. Поэтому предложенный способ сжигания топлива может быть использован и для сжигания водородного топлива, например в двигателях внутреннего сгорания, ракетных двигателях или других энергетических установках, использующих водород в качестве топлива.

5 При реализации предложенного способа сжигания процесс самовоспламенения развивается синхронно во всем объеме топливно-воздушной смеси, который был подвергнут энергетическому воздействию. Это исключает возможность возникновения явления, называемого "стуком", которое возникает при самовоспламенении последних порций несгоревшей топливно-воздушной смеси (отходящих газов) в известном рабочем
10 процессе в двигателе с искровым зажиганием. В процессе развития объемного самовоспламенения горючей смеси теряет смысл само понятие отходящих газов, так как практически вся горючая смесь проходит стадии самовоспламенения синхронно во времени. При этом также увеличивается скорость и полнота сгорания топлива как за счет более быстрого нарастания числа разрушенных метастабильных молекул, так и за счет
15 снижения эффективной энергии активации эндотермических реакций на всем протяжении основной цепи реакции окисления углеводородов. Все это позволяет поднять степень сжатия топливно-воздушной смеси в бензиновых двигателях внутреннего сгорания при использовании стандартных марок бензина до значений $\gamma > 15$. Критерием оценки допустимой степени сжатия при использовании данного вида топлива является
20 ограничение на температуру топливно-воздушной смеси в процессе ее сжатия. Эта температура не должна превышать в "верхней мертвой точке" значения, при котором происходит с заметной скоростью термический распад молекул пероксида водорода. То есть температура и давление топливно-воздушной смеси в конце такта сжатия, а также топливо должны быть такими, чтобы время задержки самовоспламенения горючей смеси
25 было больше, чем продолжительность прохождения последних $20^\circ \pm 30^\circ$ перед "верхней мертвой точкой" по углу поворота коленвала. Условно за граничную температуру для стандартных марок бензина при всех практически значимых режимах работы автомобильного двигателя можно принять значение ~ 900 K [26].

Использование предложенного способа сжигания углеводородного топлива в
30 применении к двигателям внутреннего сгорания кроме отмеченных выше преимуществ, связанных с повышением степени сжатия, увеличением скорости и полноты сгорания топлива и, следовательно, уменьшением токсичности выпускных газов и повышением экономичности по топливу, обладает также дополнительными преимуществами. Одним из наиболее важных является увеличение коэффициента полезного действия (кпд.)
35 преобразования тепловой энергии в механическую по сравнению с двигателями, использующими искровое зажигание, за счет ликвидации дополнительного противодействия на поршень, возникающего при сгорании части топливного заряда до "верхней мертвой точки" в ходе завершения такта сжатия.

Существенным преимуществом предложенного способа сжигания углеводородного
40 топлива в применении к двигателям внутреннего сгорания является и уменьшение содержания вредных выбросов окислов азота NO_x , где $x < 2$, за счет "доокисления" молекул NO_x до молекул NO_2 , которые затем достаточно эффективно восстанавливаются в каталитическом нейтрализаторе до исходных продуктов N_2 и O_2 . Процесс "доокисления" происходит в камере сгорания благодаря тому, что образовавшиеся в ходе горения
45 топливно-воздушной смеси молекулы NO_x также подвергаются энергетическому воздействию со стороны ускоренных свободных электронов и находятся в колебательно возбужденном состоянии. При этом эффективная энергия молекул NO_x превышает энергию активации реакции "доокисления", в результате чего получаются молекулы NO_2 .

Преимуществами предложенного способа сжигания углеводородного топлива в
50 непрерывном режиме перед известными способами сжигания являются следующие факторы: увеличение скорости и полноты сгорания топлива, что позволяет увеличить максимальное количество пропускаемой через реактор топливно-воздушной (окислительной) смеси, а следовательно, улучшить мощностные характеристики

энергетической установки; возможность увеличения скорости протекания горючей смеси; возможность обойтись без стабилизаторов горения; возможность обойтись без поджигающих горелок; повышение стабильности горения топлива.

Использованные источники информации

- 5 1. Levis B., v. Elbe G. "Combustion, Flames and Explosions of Gases". N. Y., 1951.
2. U.S. Patent 4092558.
3. Патент РФ №2161728 RU.
4. S.Matsuda, D.Gutman., J. Chem. Phys., 1970, 53, p.539.
5. A.C. 1183699 (СССР), Б.И. №37 (1985).
- 10 6. Афанасьев Ю.В. и др. Кр. сообщ. физ. (ФИАН СССР), 1970, №11, с.23.
7. Грицинин С.И. и др. "Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по физике электрического пробоя газов", Тарту, 5-8 июня 1984 г., ч.2, с.431-433.
8. Месяц Г.А. и др. Препринт ИОА СО АН СССР №3, Томск, 1972.
9. Андреев С.И. и др. КЭ, т.3, №8, с.1721.
- 15 10. Дашук П.Н., и др. "Письма в ЖТФ", т.7, вып.14, с.853.
11. Дашук П.Н. и др. "Письма в ЖЭТФ", т.21, вып.7, с.424 (1975).
12. Аскарьян Г.А. "Письма в ЖЭТФ", т.1, с.44 (1965).
13. J.S.Escher // Semiconductors and Semimetals. V.15, p.195-300, 1981.
14. "HCCI - Engines" http://www.ca.sandia.gov/CRF/03_combeng/03_CE-CIE.html.
- 20 15. Европейский Патент EP 1192341 B1.
16. Семенов Н.Н. "Цепные реакции". Л., Госхимиздат, 1934.
17. C.K.Westbrook, W.J.Pitz, W.R.Leppard, "The Autoignition Chemistry of Paraffinic Fuels and Pro-Knock and Anti-Knock Additives: A Detailed Chemical Kinetic Study", paper no.912314, Proceeding of the SAE International Fuels and Lubricants Meeting and
- 25 Exposition, Toronto, Canada, October 7-10, 1991.
18. Charles K. Westbrook, "Chemical Kinetics of Hydrocarbon Ignition in Practical Combustion Systems", Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550 USA, 1994.
19. H.J.Curran, et al "A Comprehensive Modeling Study of iso-Octane Oxidation"
- 30 Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551.
20. Koert D. N., et al, Proc. Combust. Inst. 26, 633-640 (1996).
21. Esser C., et al, "Chemistry of the combustion of higher hydrocarbons and its relation to engine knock" / Proc. 1-st Int. Symp. on diagnostics and modeling of combustion in reciprocating Engines. / The Japanese Society of Mechanical Engineers,
- 35 Tokyo, 1985. p.335.
22. W.L.Nighan, Phys. Rev. A2, 1989 (1970).
23. С.П.Бугаев и др. УФН, т.115, вып.1, с.115 (1975).
24. K.Watanabe, et al, J. Appl. Phys., 51 (5), 2355 (1980).
25. Г.С.Яблонский. "Химическая и биологическая кинетика", ред. Н.М.Эмануэль, Моск.
- 40 Университет, с.6, 7 (1983).
26. Ю.Варнатц, У.Маас, Р.Диббл. "Горение", Москва, Физматлит, с.132-134 (2003).

Формула изобретения

1. Способ сжигания углеводородного топлива, при котором реализуют стимулированное
- 45 разрушение молекул метастабильных промежуточных продуктов неполного окисления углеводородов, накопленных в газовом объеме топливно-воздушной смеси, путем энергетического воздействия, отличающийся тем, что топливно-воздушную смесь обогащают свободными электронами, а энергетическое воздействие на молекулы смеси осуществляют посредством их неупругих соударений со свободными электронами,
- 50 ускоренными электрическим полем, напряженность E которого меньше напряженности перехода к самостоятельному газовому разряду.

2. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами осуществляют путем ее ионизации.

3. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами осуществляют путем инъекции электронов.

4. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что напряженность E электрического поля составляет 0,1-0,2 части напряженности электрического поля пробоя газового промежутка.

5. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что обогащение топливно-воздушной смеси свободными электронами и ускорение их электрическим полем осуществляют импульсно, причем импульсы обогащения горючей смеси свободными электронами совпадают по времени с импульсами ускоряющего электрического поля.

6. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что топливно-воздушную смесь пропускают через зону, в которой производят ее непрерывное обогащение свободными электронами, и зону, в которой производят ускорение свободных электронов в электрическом поле, при этом скорость протекания топливно-воздушной смеси и геометрия зон воздействия подобраны так, что время жизни свободных электронов превышает время между моментом их образования и моментом попадания в зону воздействия ускоряющего электрического поля.

7. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что ускорение свободных электронов осуществляют переменным электрическим полем.

8. Способ сжигания углеводородного топлива по п.1, отличающийся тем, что ускорение свободных электронов осуществляют переменным электрическим полем СВЧ диапазона с $E_{эфф} \sim (1 \div 5) \cdot 10^{-16} \cdot N$ В/см, где N - концентрация молекул газовой среды.

9. Способ сжигания углеводородного топлива по п.2, отличающийся тем, что в качестве ионизирующего излучения используют жесткое электромагнитное излучение, содержащее кванты с энергией выше потенциала ионизации, по крайней мере, одного из компонентов газа, составляющего топливно-воздушную смесь.

10. Способ сжигания углеводородного топлива по п.9, отличающийся тем, что жесткое электромагнитное излучение получают посредством скользящего электрического разряда по поверхности диэлектрика с $\epsilon \geq 2$.

11. Способ сжигания углеводородного топлива по п.9, отличающийся тем, что в качестве жесткого электромагнитного излучения используют тормозное излучение электронов в области «мягкого рентгена».

12. Способ сжигания углеводородного топлива по п.11, отличающийся тем, что жесткое электромагнитное излучение в области мягкого рентгена получают посредством скользящего электрического разряда по поверхности диэлектрика с $\epsilon \geq 2$ при скорости нарастания разности потенциалов на электродах $dU/dt > 10^{12}$.

13. Способ сжигания углеводородного топлива по п.2, отличающийся тем, что в качестве ионизирующего излучения используют быстрые электроны.

14. Способ сжигания углеводородного топлива по п.3, отличающийся тем, что свободные электроны получают путем фотоэмиссии при облучении токопроводящего фотоэмиттера потоком электромагнитного излучения с энергией квантов не менее пороговой энергии «выхода» фотоэлектронов в топливно-воздушную смесь.

15. Устройство для реализации способа сжигания углеводородного топлива, содержащее камеру сгорания с источником энергетического воздействия, отличающееся тем, что источник энергетического воздействия состоит из источника ускоряющего электрического поля, включающего систему электродов с управляемыми коммутаторами, подключаемыми к источникам высоковольтного напряжения, и устройства обогащения свободными электронами топливно-воздушной смеси.

16. Устройство по п.15, отличающееся тем, что в качестве устройства обогащения свободными электронами топливно-воздушной смеси применен источник ионизирующего излучения.

17. Устройство по п.15, отличающееся тем, что устройство обогащения свободными электронами выполнено в виде фотоэмиттера, включенного в качестве катода в

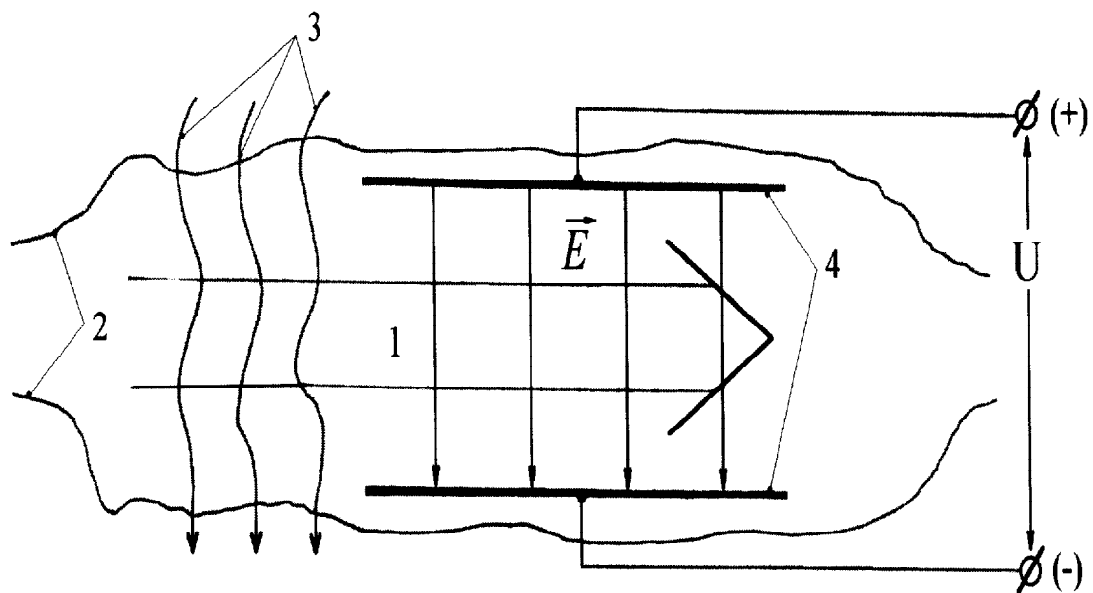
электрическую цепь системы электродов источника ускоряющего электрического поля.

18. Устройство по п.15, отличающееся тем, что камера сгорания выполнена в виде конденсатора, обкладки которого являются электродами источника ускоряющего электрического поля, а устройство обогащения свободными электронами размещено в зазоре между электродами.

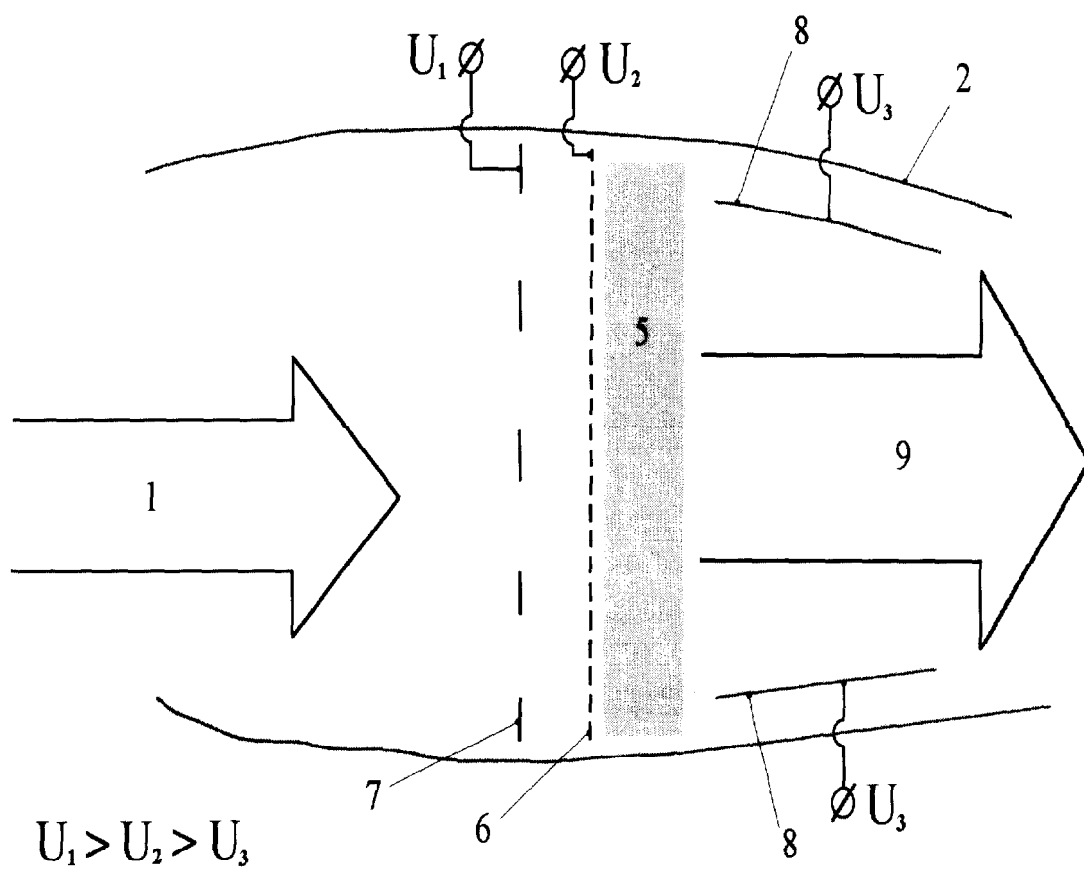
19. Устройство по п.15, отличающееся тем, что устройство обогащения свободными электронами состоит из двух электродов и источников электромагнитного излучения, размещенных по периферии межэлектродного зазора.

20. Устройство по п.15, отличающееся тем, что в качестве высоковольтных электродов источника ускоряющего электрического поля использована плазма скользящего разряда источника ионизирующего излучения.

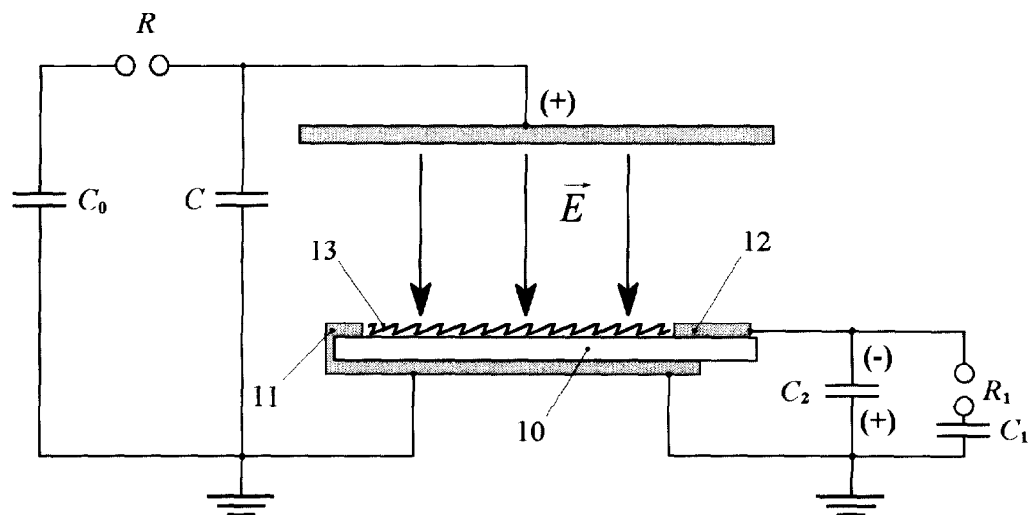
21. Устройство по п.15, отличающееся тем, что система электродов источника ускоряющего электрического поля состоит из двух электродов с потенциалами разной величины, выполненных проницаемыми для прокачиваемой топливно-воздушной смеси и образующих зону возбуждения колебательных степеней свободы молекул топливно-воздушной смеси, а источник свободных электронов реализован в виде зоны окисления углеводородов топливно-воздушной смеси, при этом в устройство введен третий электрод с потенциалом ниже меньшего потенциала двух электродов источника ускоряющего электрического поля, при этом электрод источника электрического поля с меньшим потенциалом примыкает к зоне окисления и образует вместе с третьим электродом систему транспортировки свободных электронов в зону возбуждения колебательных степеней свободы молекул топливно-воздушной смеси.



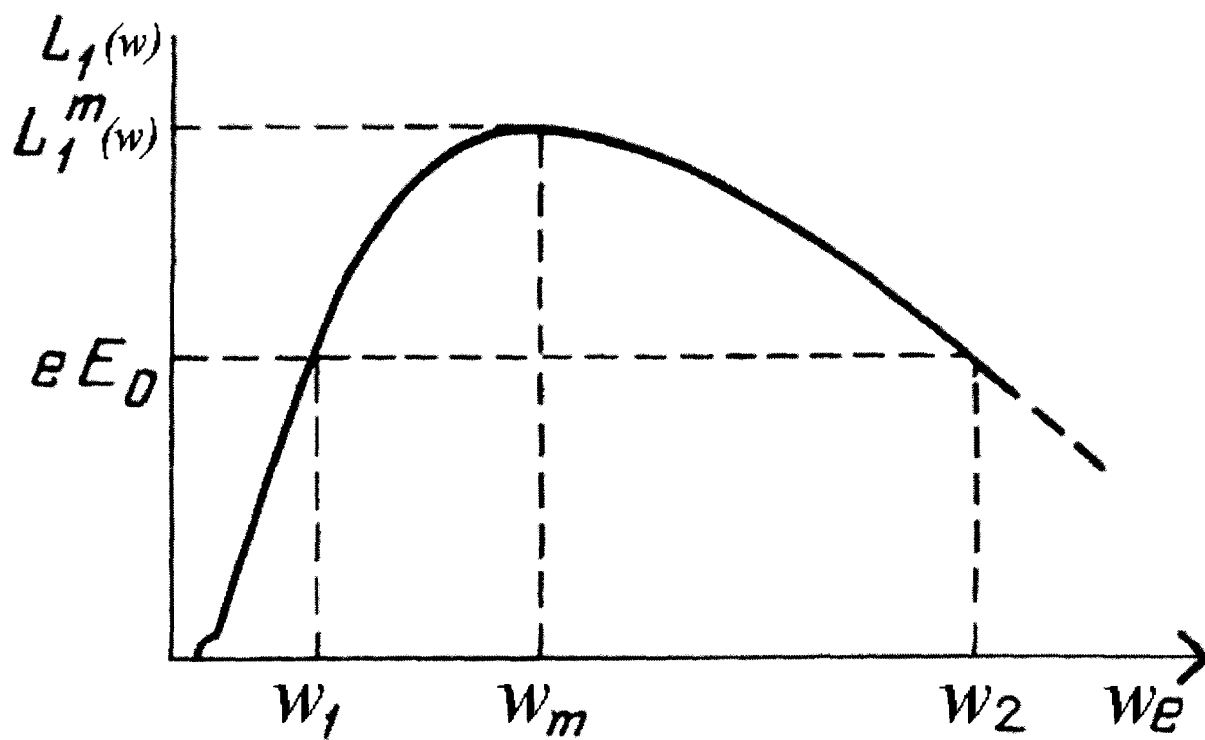
Фиг. 2



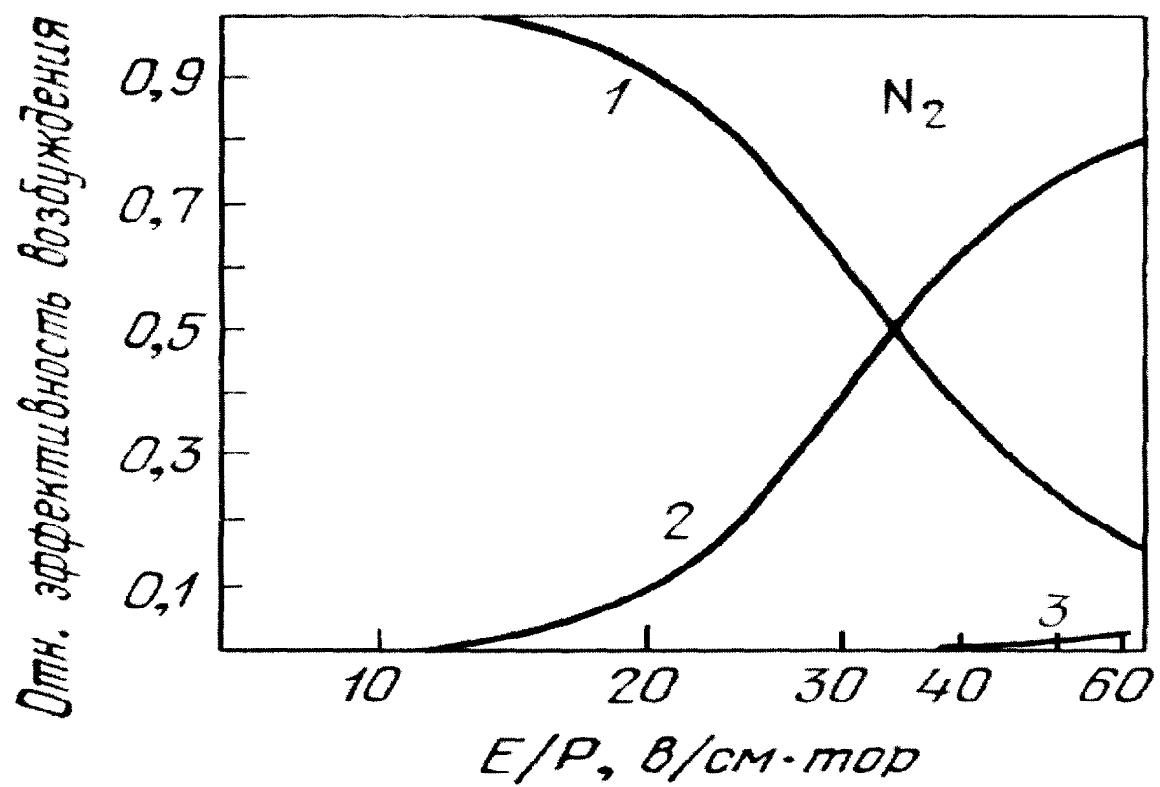
Фиг. 3



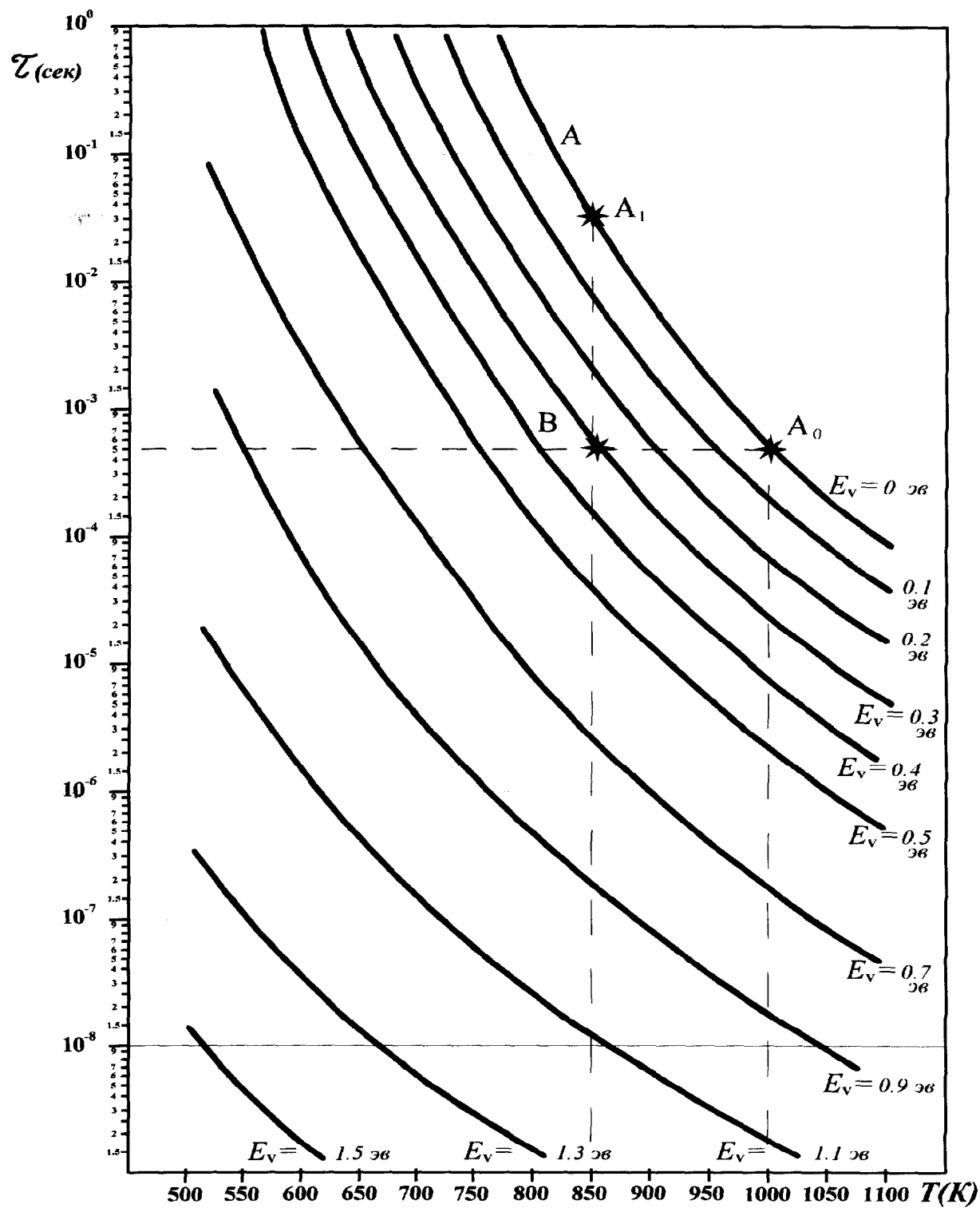
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7