

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Я. Блум, Ю. А. Михайлов, Р. Я. Озолс. Тепло- и массообмен в магнитном поле. Рига: Зинатне, 1980.
2. Г. В. Самсонов, С. В. Дроздова. Сульфиды. М.: Металлургия, 1972.
3. J. Korn und Kohlhaas. Z. Angew. Phys., 1969, 26, 2, 119.
4. А. Миснар. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968.
5. А. Ф. Чудновский. Теплофизические характеристики дисперсных систем. М.: Физматгиз, 1962.
6. А. П. Алдушни.— В кн.: Проблемы технологического горения. Т. 1. Черноголовка, 1981.
7. Ю. С. Найбороденко, В. И. Итин, ФГВ, 1975, 11, 3, 343.
8. D. Cismaru et Elisabeta Dobroghiu. Rev. Roumaine Chim., 1969, 14, 8, 985.
9. П. А. Савинцев, И. М. Темукуев. Изв. вузов. Физика, 1972, 11, 14.

Поступила в редакцию 8/VII 1985

### ВЛИЯНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРЯДА НА ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ОЧАГА И РАЗВИТИЕ ГОРЕНИЯ В ОКОЛОПРЕДЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ

*В. П. Карнов, В. В. Малов, Е. С. Северин*

*(Москва)*

Практическое применение бедных топливно-воздушных смесей требует прежде всего интенсификации их воспламенения и начальных стадий горения. При использовании в качестве иницирующего источника искрового разряда форсирование его энергетических характеристик путем увеличения тока и длительности не всегда приносит положительные результаты. Суть такого парадоксального явления заключается в существенном влиянии конкретного сочетания его токово-временных характеристик на минимальную энергию воспламенения обедненных смесей, особенно в условиях малого межэлектродного зазора разрядника, при низких давлениях и турбулизации смеси [1]. Нерациональный выбор этих параметров способен снивелировать форсирующую роль увеличения энергии разряда вследствие роста ее затрат на преодоление критического порога воспламенения. Применением сложных форм многокомпонентных искровых разрядов и оптимизацией токово-временных характеристик их составляющих можно в значительной степени влиять на минимальную энергию воспламенения бедных смесей, снижая ее и тем самым создавая условия для эффективной дополнительной подпитки и форсирования развития начального очага горения.

Перечисленные выше вопросы, а также более подробное описание техники эксперимента изложены в работе [1]. Ниже анализируются результаты скоростной киносъемки развития начального очага горения и характера изменения давления в камере при воспламенении бедных и околопредельных метановоздушных смесей трехкомпонентным комбинированным искровым разрядом с прецизионным и независимым регулированием токово-временных характеристик его составляющих. Разряд принятой формы форсировался по току лишь на начальной стадии и содержал завершающую длительную слаботочную компоненту. Первая составляющая объединяла процессы быстрого роста высокого напряжения, пробоя межэлектродного зазора разрядника и емкостной фазы разряда. За ней следовала вторая компонента длительностью  $\tau_2 = 0,2$  мс, в которой среднее значение тока  $I_2$  варьировалось от 30 до 500 мА. Завершала разряд третья компонента с  $I_3 = 30$  мА и варьируемой от 0,4 до 6,5 мс длительностью  $\tau_3$ , отсчитываемой от момента пробоя. Максимальный уровень суммарной энергии разряда достигал 295 мДж, при этом в пер-

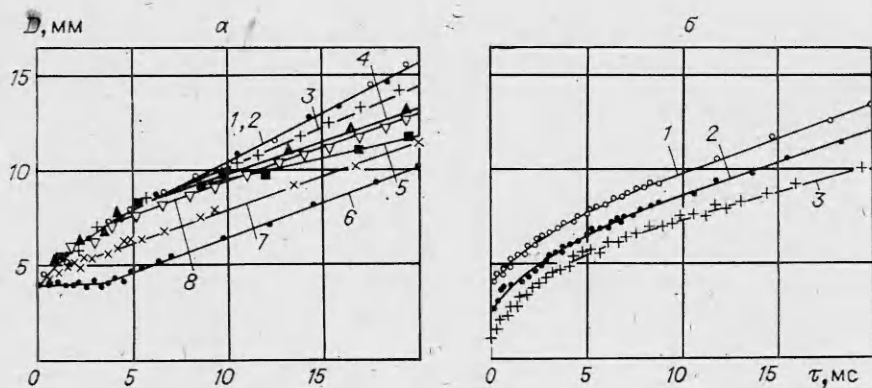


Рис. 1. Влияние характеристик комбинированного разряда на изменение диаметра очага горения при разных составах смеси ( $d = 4$  мм) (а) и межэлектродного зазора на протекание начальных фаз горения (5,1%  $\text{CH}_4$ ,  $I_2 = 130$  мА,  $\tau_3 = 6,2$  мс) (б). а) 1—5,3%  $\text{CH}_4$ ; 2—5,3%  $\text{CH}_4$ ; 3—5,1%  $\text{CH}_4$ ; 4—4,9%  $\text{CH}_4$ ; 5—4,7%  $\text{CH}_4$ ; 6—5,1%  $\text{CH}_4$ ; 7—5,1%  $\text{CH}_4$ ; 8—5,1%  $\text{CH}_4$ .  $I_2$ , мА: 1, 3—6, 8—130, 2, 7—430;  $\tau_3$ , мс: 1—4—6,2, 6, 7—0, 8—4,2. б)  $d$ , мм: 1—4, 2—2,5, 3—1.

вой компоненте выделялось 5, во второй — 100 и в третьей — 190 мДж. Во второй и третьей компонентах энергия могла независимо изменяться от нуля до указанного уровня.

Электроды игольчатого разрядника с регулируемым зазором располагались в горизонтальной плоскости, а сам зазор находился в центре камеры. Оптическая ось системы скоростной киносъемки также располагалась в горизонтальной плоскости и была перпендикулярной оси разрядника в центре межэлектродного зазора. Величина последнего в данной серии экспериментов варьировалась микрометром  $d = 1 \div 4$  мм, содержание метана в смеси изменялось от 4,6 до 5,3%.

Проведенное исследование позволяет прежде всего заключить, что даже в условиях окологределенных смесей варьированные в столь широких пределах характеристики инициирующего разряда и размер межэлектродного зазора в значительной мере определяют развитие начального очага в течение лишь первой (нестационарной) фазы горения и практически не влияют на нормальную скорость горения в последующем (стационарном) периоде. Некоторое исключение составляют предельные случаи воспламенения при критических значениях параметров разряда. В этом можно убедиться на примере рис. 1, где показано изменение диаметра очага горения, измеренного в направлении, параллельном оси электродов. На приведенных зависимостях четко различаются стационарные и нестационарные участки формирования и распространения пламени. Отображенные на рис. 1 начальные периоды горения протекают еще в изобарных условиях и при практическом отсутствии конвективного переноса. Сравнение между собой кривых 3, 6—8 рис. 1, а и 1—3 рис. 1, б показывает, что видимая скорость горения на стационарном участке определяется лишь составом смеси и не зависит от инициирующих факторов. Вместе с тем из рис. 1, а следует, что при длительном искровом разряде ( $\tau_3 = 6,2$  мс), осуществляемом при постоянном, близком к оптимальному, токе второй компоненты ( $I_2 = 130$  мА) и постоянной величине межэлектродного зазора ( $d = 4$  мм) интенсивность изменения начального очага горения на нестационарном участке не зависит от состава смеси (кривые 1—5) и во всех указанных случаях оказывается существенно более высокой, чем на стационарных участках распространения пламени. Очевидно и то обстоятельство, что по своей продолжительности нестационарный участок наиболее быстрого расширения очага точно совпадает с временем протекания инициирующего разряда, точнее — его третьей компоненты. Аналогичные зависимости отмечаются также при других значениях  $d$  и иных длительностях третьей составляющей разряда.

Напротив, при воспламенении смеси разрядом, представляющим совокупность лишь первой и второй компонент, суммарная энергия которых близка к критическому уровню, наблюдается продолжительная задержка в развитии начального очага горения, в течение которой диаметр его практически не увеличивается (см. рис. 1, а, кривую 6). В ряде случаев (при иницировании воспламенения в околопредельных смесях разрядом с критическими параметрами) после такой длительной задержки отмечался пульсационный характер распространения пламени (частота пульсаций составляла примерно 200 Гц), сходный с описанным в работе [2]. При сверхкритических энергиях разряда конвективный подъем и расширение зоны горения в исследуемых смесях происходят без видимых нарушений газодинамической устойчивости пламени. Значительный рост энергии кратковременного двухкомпонентного разряда путем увеличения  $I_2$  (кривая 7) в некоторой степени ускоряет развитие начального очага, сокращая время выхода на стационарный режим горения, но при включении третьей составляющей разряда влияние варьруемого тока второй компоненты исчезает (кривые 1, 2).

Касаясь роли межэлектродного зазора, следует отметить, что при длительном трехкомпонентном разряде изменение зазора (в данном случае от 1 до 4 мм) влияет в основном на начальный размер зарождающегося очага горения и не оказывает какого-либо дополнительного форсирующего действия на его развитие в течение разряда. Наблюдается практически эквидистантный ход кривых  $D = f(\tau)$  при разных зазорах (см. рис. 1, б). Сравнить зависимость формирования начального очага горения в околопредельных смесях при коротком двухкомпонентном разряде от величины  $d$  не представляется возможным, так как с уменьшением зазора они такими разрядами не воспламеняются.

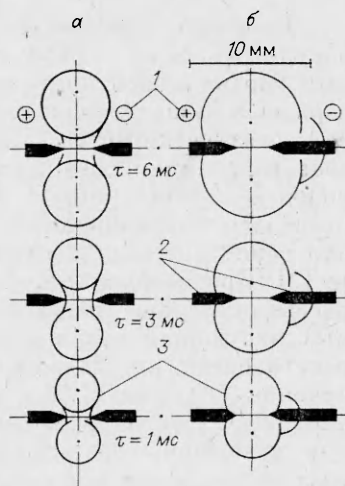
Рассмотрим подробнее приведенные на рис. 1, а примеры с точки зрения изменений энергетических параметров разряда. Переход от кривой 6 к 7 и 8 в обоих случаях обусловлен одинаковым увеличением суммарной энергии разряда с 23 до 95 мДж, однако различия в развитии начального очага горения при этом оказываются весьма существенными. В первом случае рост тока влечет за собой также практически пропорциональное повышение минимальной энергии воспламенения [1], которое препятствует образованию избытка энергии для дополнительной подпитки формирующегося очага. Во втором случае увеличение длительности третьей компоненты разряда при сохранении оптимального тока  $I_2$  не оказывает, как было показано ранее, влияния на критический порог воспламенения ( $E_{\min}$ ), который в рассматриваемых условиях остается равным 20 мДж. В результате в разряде выделяется избыточная электрическая энергия в 72 мДж, которая в определенной мере расходуется на длительную подпитку очага. Считается, что при такой форме разряда снижается его тепловой КПД и возрастают относительные потери тепла в электроды [3], но в условиях бедных смесей сам факт и продолжительность подпитки очага на стадии его формирования играют, по-видимому, более важную роль. Еще большее увеличение длительности и энергии третьей компоненты приводит к дополнительному форсированию развития очага горения (переход к кривой 3).

Обнаруженная независимость процесса расширения начального очага горения от содержания метана в смеси при длительном разряде говорит о том, что в определенном интервале околопредельных составов смеси механизм формирования очага зависит в основном от исследуемой формы иницирующего разряда и, очевидно, в меньшей степени определяется кинетическими факторами [4]. Скоростная киносъемка вскрывает весьма специфический характер воздействия отдельных компонент разряда и их параметров на развитие начального очага горения.

Анализ кинограмм показывает, что в случае горизонтального расположения электродов начальный очаг, инициированный искрой в неподвижных околопредельных смесях, в первые моменты своего формирования приобретает торообразную форму и располагается симметрично

Рис. 2. Изомасштабное сопоставление через равные промежутки времени формы и размеров начального очага горения, инициированного комбинированным разрядом с различными характеристиками (5,3% CH<sub>4</sub>).

а)  $I_2 = 130$  мА,  $\tau_3 = 0$ ; б)  $I_2 = 130$  мА,  $\tau_3 = 6,2$  мс. 1 — полярность электродов; 2 — электроды разрядника; 3 — контуры очага.



относительно центра межэлектродного зазора (рис. 2, а). При двухкомпонентном разряде увеличение тока во второй его составляющей приводит к более быстрому начальному увеличению диаметра такого тора и расширению его апертуры, т. е. к более быстрому удалению основной части очага горения от оси электродов. Этот процесс, так же как и рост поперечного размера очага при трехкомпонентном разряде, мало зависит от состава околопредельных смесей. Отмечаемое влияние тока головной фазы разряда на развитие очага закономерно способствует уменьшению тепловых потерь в электроды, что равнозначно сокращению гасящего расстояния между ними. Именно такие зависимости имеют место [1] при сопоставлении влияния  $I_2$  и  $d$  зазора на минимальную энергию воспламенения. Вместе с тем при рассматриваемом характере формирования начального очага горения резко увеличивается его поверхность, соприкасающаяся с холодной не воспламенившейся еще смесью, а также отношение площади этой поверхности к объему, в котором начались экзотермические реакции. Естественно, в этих условиях в большей мере возрастают отдача тепла и диффузия активных центров в окружающие слои газа, что требует в качестве компенсации большего подвода энергии от инициирующего разряда и является одной из причин повышения  $E_{min}$  с ростом тока. Неблагоприятность этого фактора особенно проявляется при турбулизации смеси: чрезмерное увеличение тока приводит к снижению устойчивости формирования начального очага, отрыву его от электродов еще до окончания разряда и погасанию [1].

Включение в разряд третьей компоненты качественно меняет картину развития начального очага горения в ламинарных условиях (см. рис. 2, б). Формирующийся под действием первых компонент разряда торообразный очаг начинает асимметрично растягиваться вдоль электродов, смещаясь преимущественно в сторону отрицательного. Это иллюстрирует приводимые ниже результаты, показывающие отношение к общей площади видимого сечения очага  $S_{\Sigma}$  площади двух его частей ( $S_{+}$  и  $S_{-}$ ), находящихся по обе стороны от вертикальной оси, проведенной через центр межэлектродного зазора:

$\tau$ , мс	0	1	2	4	6	8	12	20
$\frac{S_{-}}{S_{\Sigma}}$ , %	50	53	58	62	63	64	64	64
$\frac{S_{+}}{S_{\Sigma}}$ , %	50	47	42	38	37	36	36	36

(5,1% CH<sub>4</sub>,  $d = 1,0$  мм,  $I_2 = 130$  мА,  $\tau_3 = 6,2$  мс).

Увеличение относительного размера части очага  $S_{-}$ , которая смещается в сторону отрицательного электрода, и уменьшение его части  $S_{+}$ , остающейся со стороны положительного электрода разрядника, длятся точно до момента завершения третьей составляющей разряда. Как показано выше, до этого же момента интенсивно увеличивается поперечный размер очага (см. рис. 1), который, как видно из рис. 2, б, все больше при-

обретает сферическую форму, характерную для более богатых смесей. После окончания разряда соотношение рассматриваемых площадей уже не меняется и дальше фронт пламени распространяется от границ, сформировавшихся к этому периоду, размер которых значительно превосходит критический диаметр очага. Чем меньше межэлектродный зазор, тем в большей степени (при прочих равных условиях) проявляется этот эффект.

Таким образом, под действием третьей компоненты разряда происходит весьма характерное изменение конфигурации начального очага горения, в результате чего к концу разряда и началу самостоятельного распространения пламени значительно расширяется зона, охваченная горением, с одновременным уменьшением соотношения площади ее поверхности к объему. Расчёты показывают, что в случаях, показанных на рис. 2, разница в объеме начального очага горения, сформировавшегося к концу действия кратковременного и длительного разрядов, достигает двукратных размеров. При этом отношение поверхности очага к его объему с трехкомпонентным разрядом оказывается в 1,5 раза меньшим, чем с двухкомпонентным. Ввиду того, что в случае трехкомпонентного разряда очаг на стадии своего формирования приобретает сферическую форму и оказывается в течение более продолжительного времени сосредоточенным в области электродов, меняется характер его теплообмена с окружающей средой по сравнению с кратковременным разрядом: уменьшаются потери тепла в свежую смесь, но увеличивается отвод его в электроды. Об этом свидетельствуют результаты термометрирования электродов разрядника [5]. Однако термические факторы играют здесь, по-видимому, не единственную роль, тем более, что при длительном слаботочном разряде, как показывают специальные исследования [3], температурное поле хвостовой части разряда характеризуется относительно низкими температурами.

Растягивание начального очага горения и смещение его в сторону отрицательного электрода под действием третьей компоненты разряда можно объяснить электростатическим воздействием постоянного электрического поля этой компоненты на высокоионизированную область очага и преимущественным влиянием на массоперенос положительных ионов. В пользу такого положения говорит и тот факт, что с увеличением длительности третьей компоненты (при неизменном ее токе) очаг не только смещается в сторону отрицательного электрода, но и удерживается во время разряда в его зоне, что проявляется в снижении скорости распространения фронта пламени в поперечном к оси электродов направлении. В турбулентных условиях такое электростатическое притяжение должно препятствовать отрыву очага от электродов, который, как показывает киносъемка, при оптимальном токе  $I_2$  и длительности  $\tau_3$  соответствующих компонент, как правило, остается в зоне межэлектродного зазора до окончания разряда. Чрезмерное же увеличение  $\tau_3$  в конечном итоге приводит к замедленному развитию горения околопредельных смесей. Описываемые эффекты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными и выводами работы [6], полученными при воспламенении бедных пропановоздушных смесей длительным двухкомпонентным комбинированным разрядом.

Таким образом, было бы ошибочно полагать, как это часто встречается, что интенсификация характеристик инициирующего разряда должна обязательно сокращать время выхода на стационарный режим горения. К аналогичному выводу приводят и некоторые расчеты [7], показывающие, что с ростом энергии разряда время установления стационарного режима горения может увеличиваться, причем скорость нестационарного распространения пламени может превышать стационарную скорость горения.

Рассмотренные экспериментальные данные свидетельствуют, что при исследуемой форме разряда время выхода на стационарный режим может полностью определяться продолжительностью протекания третьей

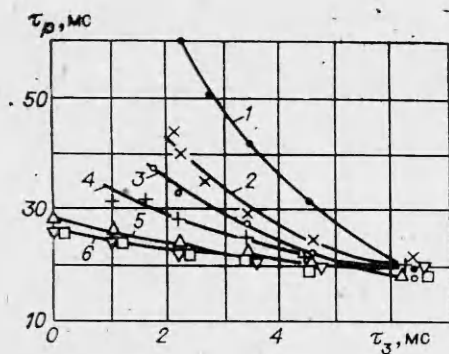


Рис. 3. Зависимость времени достижения заданного давления в камере от  $I_2$  и  $\tau_3$  (4,9%  $\text{CH}_4$ ,  $d = 2,5$  мм).  $I_2$ , мА: 1 — 30, 2 — 70, 3 — 130, 4 — 200, 5 — 270, 6 — 430 — 500.

компоненты разряда. Как видно из рис. 1, 2, увеличение до определенного предела этого времени способствует более длительному ускорению начального распространения пламени и более быстрому охвату зоной горения объема камеры, что в свою очередь должно приводить к более быстрому нарастанию давления в ней. Последнее подтверждается результатами регистрации давления, некоторые из которых показаны в качестве примера на рис. 3, 4. Приведенные на них данные характеризуют влияние иницирующих факторов на время достижения заданного уровня давления в камере объемом 85 см<sup>3</sup>. Из рис. 3 следует, что рост величин  $\tau_3$  приводит в целом к более быстрому нарастанию давления в камере, однако это влияние оказывается неравнозначным: Так, если при малых продолжительностях разряда влияние  $I_2$  проявляется в сильной степени, то с увеличением  $\tau_3$  оно нивелируется. В случае большой продолжительности разряда давление даже при малом токе нарастает быстрее, чем при большом, но малой длительности разряда. Следует подчеркнуть, что одновременное увеличение тока и длительности разряда, не обеспечивая дополнительного форсирования процесса горения, приводит к нерациональному расходованию энергии.

Более четкое представление о влиянии на рассматриваемые зависимости различных комбинаций токово-временных характеристик разряда и выделяющейся при этом суммарной энергии можно получить из рис. 4. Как видно, в показанном конкретном случае наилучшие результаты дает увеличение энергии разряда до 150 мДж, достигаемое сочетанием тока  $I_2 = 130$  мА и длительности  $\tau_3 = 5,7$  мс. Отклонение от оптимальных сочетаний  $I_2$  и  $\tau_3$  приводит к затягиванию процесса сгорания. Чем меньше  $d$ , тем в большей степени проявляются подобные тенденции. В этом можно убедиться на основе приведенных в таблице данных для смеси с 5,1%  $\text{CH}_4$ , которые характеризуют время достижения заданного давления  $\tau_p$  для постоянного общего уровня энергии искры  $E_{\Sigma} = 100$  мДж. Видно, что оптимальное значение тока во второй компоненте разряда, когда давление в камере возрастает быстрее всего, близко к 150 мА (точнее, оно изменяется от 130 мА при  $d = 4$  мм до 170 мА при  $d = 1,75$  мм). Когда  $d \leq 2,5$  мм, отклонение в сторону больших или меньших  $I_2$ , несмотря на постоянство общей энергии разряда, приводит к существенному замедлению роста давления.

Сопоставление приведенных результатов позволяет сделать некоторые важные практические выводы. Зависимости времени нарастания давления от энергии, тока и длительности разряда показывают, что в тех случаях, когда по каким-нибудь причинам (например, при лимитирован-

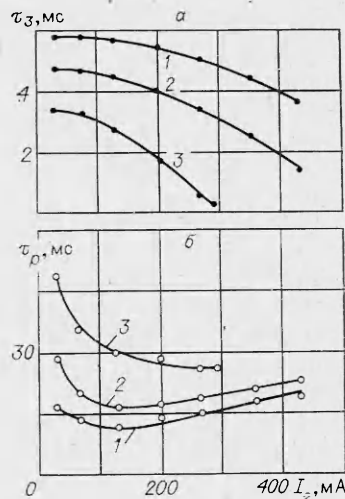


Рис. 4. Влияние суммарной энергии комбинированных разрядов, сочетаний тока и длительности компонент (а) на время достижения заданного давления в камере (б) (4,9%  $\text{CH}_4$ ,  $d = 2,5$  мм).

$E_{\Sigma}$ , мДж: 1 — 150, 2 — 100, 3 — 50.

$I_2$ , мА	$\tau_p$ , мс при $d$ , мм			$I_2$ , мА	$\tau_p$ , мс при $d$ , мм		
	1,75	2,5	4,0		1,75	2,5	4,0
30	40	23	16	250	23	18	13
50	30	21	15	350	29	20	13
150	20	17	13	500	41	24	14

ном энергетическом ресурсе источника воспламенения) не может быть обеспечен высокий уровень энергии разряда, с точки зрения интенсификации процесса горения рациональнее увеличивать разрядный ток с одновременным снижением до определенного предела продолжительности искры. При этом, как свидетельствует кривая 3 на рис. 4, б, скорость изменения давления будет увеличиваться. В случае, когда возможно форсирование общего уровня энергии разряда, лучшие результаты обеспечиваются при меньших токах головной фазы разряда и увеличенной длительности заключительной его компоненты. Учитывая, что при большой длительности разряда увеличение  $I_2$  не только не дает дополнительного позитивного эффекта, но в ряде случаев и снижает скорость выгорания топлива, можно заключить, что величина его не должна превышать оптимальный уровень, обеспечивающий наименьшие значения минимальной энергии воспламенения [1]. Сопоставление оптимальных значений токов, определенных по минимуму энергии воспламенения в критических условиях и максимуму форсирования процесса горения, показывает их практическое совпадение при продолжительном комбинированном разряде.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Как в критических условиях воспламенения, так и при форсированном развитии начального очага горения определяющую роль играет не только общий уровень энергии разряда, но и его форма, характер распределения энергии между отдельными его составляющими.

2. При воспламенении околопредельных смесей обнаруживается комплексный характер влияния параметров комбинированного разряда на процесс формирования очага горения. В этих условиях наряду с термическими факторами могут в заметной степени проявляться эффекты электростатического взаимодействия между электрическим полем компонент разряда и высоконионизированной областью очага горения, меняющие его форму и процесс первичной миграции.

3. Оптимизацией характеристик многокомпонентного разряда обеспечивается не только снижение минимальной энергии воспламенения, но и ускоренное протекание процесса горения за счет более интенсивного развития очага в течение его начальной нестационарной фазы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Карпов, В. В. Малов, Е. С. Северин. ФГВ, 1986, 22, 2, 3.
2. В. Н. Гудкович, Э. А. Грановский, Э. А. Штессель. ФГВ, 1983, 19, 5, 42.
3. V. Maly. 18-th Symp. (Intern.) Combustion, 1980.
4. E. Sher, S. Refael. 19-th Symp. (Intern.) Combustion, 1982.
5. Г. Н. Злотин, В. В. Малов, С. А. Овчаров и др.— В кн.: Рабочие процессы в поршневых ДВС. Волгоград, 1981.
6. M. Kono, S. Kumagai, T. Sakai. 16-th Symp. (Intern.) Combustion, 1976.
7. В. Н. Вилюнов, Е. А. Некрасов, В. С. Баушев и др. ФГВ, 1976, 12, 3, 361.

Поступила в редакцию 8/VII 1985,  
после доработки — 15/X 1985