

мя прохода детонационной волной зоны индукции. Этот результат согласуется с выводом из опытов по регистрации возмущений на поперечной волне. Непосредственно вблизи нижнего предела спиновой детонации в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ возмущения на поперечной волне появляются редко, и, по-видимому, за счет внешних причин (колебания в «носике»). Снижение величины Q/RT_+ за счет разбавления водородно-кислородной смеси аргоном (см. табл. 2) приводит к полному исчезновению возмущений на поперечном детонационном фронте и повышению стабильности спиновой конфигурации в целом.

Смесь $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ имеет гораздо более высокие значения обоих параметров E/RT_+ и Q/RT_+ для всех детонационных скачков спиновой конфигурации по сравнению со смесью $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, что проявляется в резко выраженной неустойчивости этих скачков и образовании тонкой структуры.

Авторы благодарят М. Е. Топчияна за предоставление данных по равновесному расчету продуктов детонации и полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
3/V 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. J. J. Egrenbeck. Phys. of Fluids, 1964, 7, 5, 6.
2. К. И. Щелкин. ЖЭТФ. 1959, 36, 2.
3. Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1964, 4.
4. Р. И. Солоухин. ФГВ, 1966, 2, 3.
5. Б. В. Войцеховский. Докл. АН СССР, 1957, 144, 4.
6. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. ПМТФ, 1962, 3.
7. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1.
8. Ju. N. Denisov, Ja. K. Troshin. Combustion & Flame, 1971, 16, 2.
9. Я. Б. Зельдович, И. Я. Шляпнотх. Докл. АН СССР, 1949, 65, 6.
10. Г. Г. Черный. Astronautica Acta, 1968, 13, 5—6.
11. В. П. Коробейников, В. А. Левин и др. Вестн. МГУ, 1970, 2.
12. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
13. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчиян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1963.
14. Я. К. Трошин, К. И. Щелкин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
15. В. В. Воеводский, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1965, 161, 5.
16. В. В. Воеводский, Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР, 1964, 154, 6.

УДК 662.215.1

ДАВЛЕНИЕ ВО ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ГАЗАХ

А. А. Васильев, Т. П. Гавриленко, М. Е. Топчиян

(Новосибирск)

В модели детонационной волны, предложенной Зельдовичем-Дёрингом-Нейманом, на переднем фронте существует скачок давления. Этот факт был экспериментально подтвержден многими исследователями. Однако эти эксперименты из-за низкой разрешающей способности используемой в них аппаратуры не смогли дать прямого ответа на основной вопрос: осуществляется ли так называемый «пик Неймана». Другими словами, соответствует ли давление на переднем фронте детона-

ционной волны давлению за ударной волной, движущейся со скоростью детонации. Измерение давлений в пике проводилось, в частности, в работах [1] — по обжатию конических столбиков, в [2] — пьезодатчиками. Результаты всех экспериментов оказались ниже ожидаемых по расчету с равновесием по всем степеням свободы. К согласованию с теоретическими величинами приводит лишь экстраполяция экспериментальных данных к пиковому значению.

При непосредственном измерении давления в пике основная трудность связана с недостаточной разрешающей способностью используемой аппаратуры. Техника, имеющая времена разрешения ~ 1 мкс, может дать лишь осредненные значения параметров передней зоны детонационной волны. В настоящее время имеются емкостные датчики конструкции Баганова с временем разрешения $\sim 0,1$ мкс [3]. Усовершенствованный датчик Баганова использовался Джонсом и Власесом для измерения пика давления за нормальной отраженной от твердой стенки детонационной волной (время разрешения датчика 0,05 мкс). Аппаратура с такими характеристиками позволяет провести непосредственные измерения давления в пике. Однако измерения, проведенные Джонсом и Власесом, о результатах которых вскользь упоминается в работе [4], показывают, что давление в пике соответствует лишь равновесному по составу значению давления за отраженной детонационной волной. К сожалению, эти авторы не опубликовали своих результатов.

Поскольку до настоящего времени вопрос о величине давления в пике оставался открытым, была проведена серия опытов по непосредственному измерению давления в пике для различных смесей, используя пьезодатчик с временем разрешения $\sim 0,05$ мкс.

Эксперименты по измерению давления проводились в детонационной трубе (рис. 1) диаметром 80 мм, длиной 5,5 м. Иницирование осуществлялось разрядом конденсатора емкостью 2 мкФ, заряженного до напряжения 8—10 кВ, на искровой промежуток. Как обычно, в трубу вставлялась спираль для ускорения процесса перехода горения в детонацию. Длина трубы была достаточной для получения установившейся детонационной волны, скорость которой, измеренная пьезодатчиками, не менялась в пределах ошибки измерения (1%).

Для измерения давления в пике датчики располагались на боковой стенке и торце трубы. Датчики для измерения давления в проходящей детонационной волне одновременно использовались для измерения скорости детонации. Сигналы от датчиков поступали на входы осциллографов (входное сопротивление 1 МОм, полоса пропускания 25 МГц, чувствительность 0,05—20 В/дел).

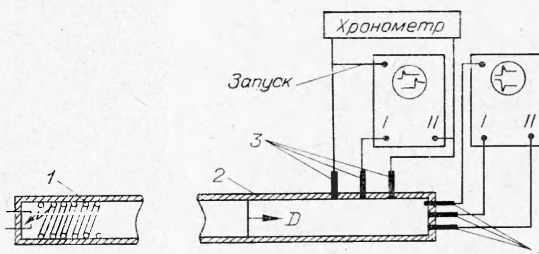


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — «спираль Шелкина»; 2 — детонационная труба; 3 — пьезодатчики для измерения давления в проходящей волне ($\varnothing$ 1 мм); 4 — пьезодатчики для измерения давления в отраженной волне ($\varnothing$ 6, 10 мм).

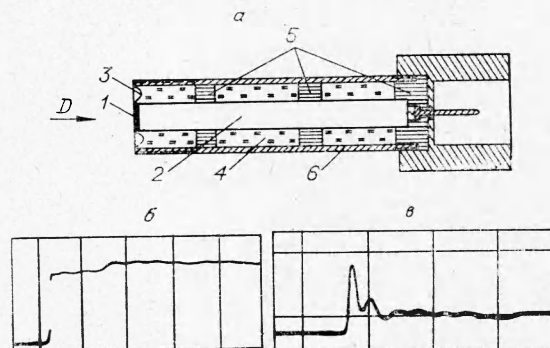


Рис. 2. Пьезодатчик для измерения давления в отраженной детонационной волне.

а) схема датчика; б) осциллограмма давления за отраженной ударной волной (развертка — 1 мкс/дел); в) осциллограмма давления за отраженной детонационной волной (развертка 0,5 мкс/дел).

Остановимся кратко на конструкции пьезодатчика (рис. 2, а). Чувствительным элементом датчика является диск 1 из пьезокерамики ЦТС толщиной 0,25 мм и диаметром 1, 6, 10 мм. Для согласования акустических импедансов диск припаивался к цинковому стержню 2, который служил одним из электродов. Стержень длиной 120—150 мм с припаянным диском вставлялся в латунную трубку 6 и центрировался с помощью тефлонных шайб 5, пространство 4 между стержнем и трубкой заливалось пчелиным воском. Вторым электродом служила трубка, которая с помощью проволоочек 3 толщиной 50 мк соединялась с внешней стороной диска. Стержень и диск предварительно шлифовались.

Основными требованиями, предъявляемыми к датчикам, являются: высокая чувствительность, время разрешения, линейность характеристики и форма сигнала. Первое требование удовлетворялось выбором высокочувствительной керамики ЦТС, второе — выбором толщины керамики. Если плоскость волны параллельна плоскости датчика, то время разрешения такого датчика при условии, что керамика находится на торце, определяется временем прохождения звуковой волны по керамике (при толщине пьезокерамики 0,25 мм время разрешения составляет ≈ 50 нс, диаметр пьезоэлемента, использованного в датчиках для измерения давления в отраженной детонационной волне, равнялся 6 и 10 мм, емкость такого датчика примерно 700 пФ, чувствительность не хуже 0,25 В/атм).

Следует заметить, что при одинаковой технологии изготовления датчики тем не менее не совпадают по таким характеристикам как форма сигнала и линейность. Из всех изготовленных датчиков использовались лишь те, в сигнале которых отсутствовали выбросы и колебания (типичная осциллограмма приведена на рис. 2, б) и линейность которых не нарушалась вплоть до давлений 70 атм в отраженной ударной волне. Тарировка датчиков проводилась на ударной трубе общепринятыми методами.

Датчики для измерения давления в проходящей детонационной волне имели диаметр 1 мм. После изготовления часть металлического покрытия с лицевой поверхности пьезокерамики удалялась, что позволяло, не доводя датчик до миниатюрных размеров, повысить его разрешающую способность. Время разрешения датчика в проходящей волне определяется суммой времени прохождения детонационной волны мимо датчика и временем, определяемым толщиной чувствительного элемента и скоростью звука в нем. Для датчика диаметром 1 мм и толщиной пьезокерамики 0,25 мм время разрешения $\approx 0,45$ мкс. Если размер оставленного металлического покрытия составляет 0,25 мм, то время разрешения в этом случае уменьшается до 0,15 мкс. Емкость такого датчика ~ 100 пФ, чувствительность $\sim 0,1$ В/атм. Типичная осциллограмма давления в проходящей волне приведена на рис. 3, б. Эксперименты проведены для смесей $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$, $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ из технических баллонов.

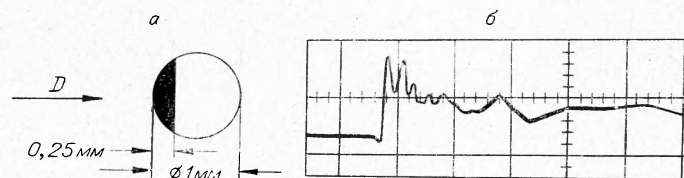


Рис. 3. Пьезодатчик для измерения давления в проходящей детонационной волне.

а) чувствительный элемент; б) осциллограмма давления в падающей детонационной волне (развертка 1 мкс/дел).

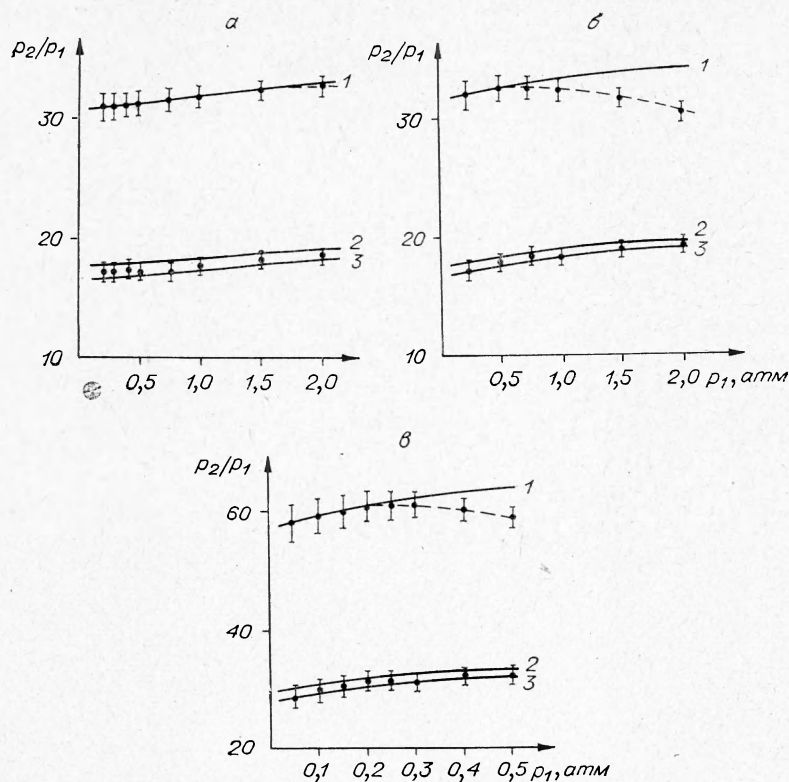


Рис. 4. Давление во фронте падающей детонационной волны.
а) $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 + 3 \text{ Ar}$; б) $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2$; в) $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{ O}_2$.

На рис. 4 приведены результаты измерения давления в проходящей детонационной волне. На всех графиках линия 1 соответствует рассчитанному отношению давлений на ударной волне в предположении равновесия по всем степеням свободы при неизменном начальном составе (p_1 — начальное давление смеси, p_2 — давление за фронтом ударной волны), линии 2 и 3 — отношение давлений в состоянии Чепмена-Жуге (2 — равновесное, 3 — замороженное) в зависимости от начального давления. Используя результаты работы [5], на осциллограммах давления устанавливалось положение поверхности Чепмена-Жуге. Среднее давление в волне с этого момента и далее до конца развертки принималось за давление Чепмена-Жуге.

Расчет состояния Чепмена-Жуге и давления за падающей детонационной волной проводился на ЭВМ, аналогично описанному в работе [6] с использованием термодинамических таблиц [7]. Из рис. 4 видно, что экспериментальные значения давления в пике хорошо согласуются с рассчитанными при небольших начальных давлениях, по мере повышения начального давления экспериментальные значения оказываются ниже расчетных. Это объясняется тем, что разрешающей способности датчика недостаточно для регистрации пика, поскольку протяженность зоны реакции становится сравнимой с размерами датчика, т. е. датчик пишет усредненное давление. Разброс результатов измерения зависит от начального давления (низкие давления 10%, высокие — 6%). Увеличение разброса при низких начальных давлениях связано с тем, что на измерение давления оказывает влияние наличие поперечных волн в структуре реальной детонационной волны (так, в спиновой детонации давление за поперечной волной примерно в 3 раза выше давления за падающей). Из-за малого различия давлений Чепмена-Жуге в рав-

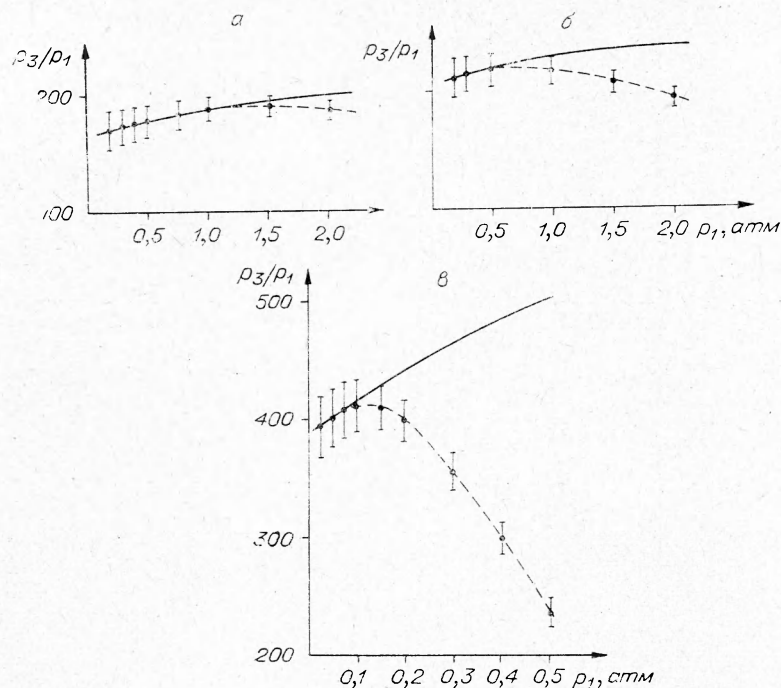


Рис. 5. Давление в отраженной детонационной волне.
а) $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$; б) $2\text{H}_2 + \text{O}_2$; в) $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$.

новесном и замороженном состоянии, проведенные эксперименты не позволяют сделать определенного вывода о том, какое из состояний — равновесное или замороженное — осуществляется за детонационной волной.

Одновременно с измерением давления в проходящей волне измерялось давление за отраженной от торца детонационной волной. Отражение детонационного фронта является сложным процессом и для него пока отсутствует точный анализ с учетом реальных особенностей детонационной волны. Для объяснения экспериментальных данных проведен расчет отражения детонационной волны от твердой стенки в предположении, что передний фронт детонационной волны представляет собой ударную волну с прямоугольным профилем давления, движущуюся со скоростью детонации Чепмена-Жуге. Считается, что равновесие по всем степеням свободы достигается мгновенно. Экспериментальные и расчетные кривые для случая отражения приведены на рис. 5.

Для смесей $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$ и $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ экспериментальные значения скоростей хорошо согласуются с рассчитанными из условия Чепмена-Жуге при данном начальном давлении. Для $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2$ в наших экспериментах скорость детонации заметно отличалась от расчетной (при низких начальных давлениях до 10%), что связано, по-видимому, с некоторым отклонением состава смеси от стехиометрического из-за использования газов из технических баллонов. Поэтому для расчета давления в этой смеси использовалась экспериментальная зависимость скорости детонации от начального давления, хотя состав при этом считался стехиометрическим. В силу этого совпадению экспериментальных и рассчитанных данных для этой смеси не следует придавать большого значения.

Из рис. 5 видно, что для смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ag}$ датчик с разрешением 50 нс позволяет обнаружить отраженный пик вплоть до начального давления в 1 атм. Для смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ пик фиксируется до давления $\approx 0,3$ атм, затем опять из-за недостаточного разрешения датчика записывается усредненное давление. Эти измерения существенно отличаются от данных Джонса и Власеса, хотя разрешение датчиков примерно оди-

наково. Напомним, что пик по их данным соответствовал равновесному по составу значению давления за отраженной детонационной волной, что в несколько раз ниже значения давления в отраженном пике с равновесием по всем степеням свободы. Более того, данные многочисленных исследований по размерам зоны индукции в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, наиболее полный обзор которых содержится в работе [8], позволяют сделать вывод, что датчик с разрешением 50 нс должен регистрировать отраженный пик хотя бы при самых низких давлениях, использованных в экспериментах Джонса и Власеса. Так как авторы до сих пор не опубликовали своих результатов, приходится лишь догадываться о возможных причинах такого расхождения.

Так же, как и для проходящей волны, разброс результатов измерения отраженного пика уменьшается с ростом начального давления (10—12% при низких давлениях, 6% при высоких). Флуктуации в измерениях давления возникают из-за трех возможных причин:

- 1) флуктуации скорости детонации при одном и том же начальном давлении в пределах ошибки измерения;
- 2) смещения средней плоскости фронта детонационной волны от перпендикуляра к оси трубы;
- 3) влияния нерегулярностей в структуре фронта детонационной волны.

Первые две причины могут сказываться на результатах измерений во всем диапазоне начальных давлений, последняя может оказывать влияние лишь при довольно низких начальных давлениях. Увеличение разброса при низких начальных давлениях связано с тем, что в момент натекания детонационной волны на датчике могут оказаться различные элементы фронта в зависимости от фазы столкновения поперечных волн. Скорость различных элементов фронта, а следовательно, и давление за ними различны. При низких начальных давлениях, когда размер ячейки сравним с размером датчика, это оказывает сильное влияние на измеряемые величины давлений. При повышении начального давления на датчик укладывается несколько ячеек, происходит усреднение давлений за различными элементами фронта до давления, определяемого средней скоростью распространения волны в целом — скоростью детонации; поэтому разброс результатов измерения уменьшается.

Если детонационный фронт в среднем считать плоским, то верхний предел влияния наклона фронта к оси трубы можно получить, если все наблюдаемые флуктуации отнести за счет второй причины. Сделанная таким образом оценка показывает, что в этом случае средняя плоскость фронта должна отклоняться от перпендикуляра к оси трубы на угол до 8° . Такое отклонение трудно себе представить, так как опыты на этой же установке с использованием метода Теплера смогли бы зафиксировать этот факт. Отсюда следует, что на самом деле влияние второй причины должно быть незначительным.

Следовательно, результаты экспериментов по измерению давления пьезодатчиками с описанными выше характеристиками как в проходящей, так и в отраженной от торца детонационной волне показывают, что на переднем фронте детонационной волны существует пик Неймана и давление в нем соответствует давлению за фронтом ударной волны, движущейся со скоростью детонации.

*Поступила в редакцию
18/1 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко, Я. Б. Зельдович. Докл. АН СССР, 1948, **63**, 553.
2. D. H. Edwards, G. T. Williams, J. C. Breeze. J. of fluid mech., 1959, **6**, 4, 497.
3. Д. Баганов. Приборы для научных исследований, 1964, **3**, 28.
4. D. H. Edwards. XII-th Symposium (International) on Combustion. Poitiers, France, 1968, 819.

5. A. A. Vasiliev, T. P. Gavrilenko, M. E. Topchian. *Astronautica Acta*, 1972, 17, 499.
6. Эйзен, Гросс, Ривлин. Вопросы ракетной техники, 1961, 1.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Под ред. В. П. Глушко. М., Изд-во АН СССР, 1962.
8. R. I. Soloukhin. XII-th Symposium (International) on Combustion. Poitiers, France, 1968, 799.

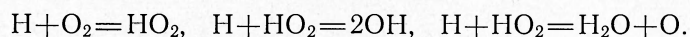
УДК 541.126

АНОМАЛЬНО ГЛУБОКИЕ ВЫГОРАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ОКСИ УГЛЕРОДА

В. В. Азатян, Е. И. Динабург, М. А. Наморадзе

(Москва)

В работах [1, 2] указывалось на возможность увеличения фактора разветвления цепей по ходу разветвленно-цепного процесса в результате уменьшения эффективной скорости гетерогенной гибели активных центров. Это может быть вызвано как уменьшением коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов и радикалов, так и гетерогенными процессами, протекающими с выбросом активного центра в объем. В случае горения смесей H_2 с O_2 или CO с O_2 в присутствии водородсодержащих соединений такими гетерогенными процессами могут быть, например, [1, 2]:

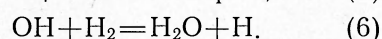


Уменьшение эффективной скорости гетерогенного обрыва цепей должно приводить к ускорению цепного процесса и к увеличению глубины превращения (по сравнению со случаем, когда скорость обрыва цепей не меняется).

«Аномально глубокие» выгорания, действительно, были обнаружены в процессе горения стехиометрической смеси H_2 с O_2 вблизи первого предела воспламенения [3, 4], в частности, при давлениях $0,1 \div 0,2$ мм рт. ст.

В настоящей работе приводятся результаты изучения глубины выгорания смеси $2CO + O_2$ в присутствии малых количеств H_2 . Как известно [5, 6], при горении этих смесей, в отличие от горения H_2 с O_2 , гетерогенный обрыв цепей осуществляется не только в результате рекомбинации атомов H , но в значительной мере также рекомбинации атомов O . Экспериментальные данные сопоставляются с результатами расчета, при котором считается как обычно, что константы скорости гетерогенного обрыва цепей не меняются по ходу изотермического процесса.

При температурах, достаточно превышающих температуру мыса полуострова воспламенения, вблизи первого предела механизм процесса можно представить следующими основными стадиями [5, 6]:



Как указывалось ранее [1, 2], в надкритической области реакции даже при низких давлениях в случае не очень малых выгораний необ-

¹ В данном случае механизм зарождения не существует (см. ниже).