

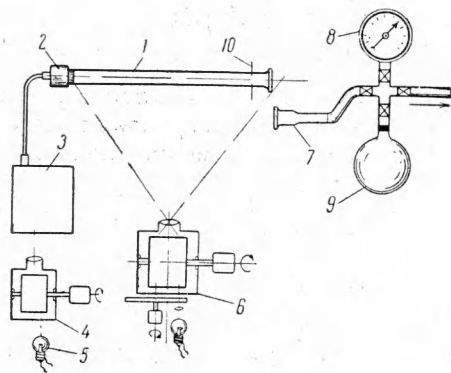
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН СЖАТИЯ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ
В ТРУБАХ

С. М. Когарко, А. С. Новиков

(Москва)

В работе [1] было показано, что в процессе горения различных топливо-воздушных смесей в сферическом сосуде, при зажигании смеси в центре сферы, в некоторых условиях опыта возникают и при взаимодействии с зоной реакции пламени усиливаются волны сжатия. В данной работе приводятся результаты, полученные при исследовании волн сжатия в процессе горения газовой смеси в закрытых и открытых с одного конца трубах.

Установка и методика эксперимента. На фиг. 1 приведена схема экспериментальной установки: 1 — отрезок стеклянной трубки, оканчивающийся с одной стороны плоским шлифом; 2 — пьезокварцевый датчик, установленный в торце трубки; 3 — катодный осциллограф; 4 — фоторегистр; 5 — неоновая лампа для нанесения на пленку меток времени; 6 — фоторегистр для регистрации распространения пламени с устройством для нанесения меток времени на пленку; 7 — отрезок стеклянной трубки с плоским шлифом, через которую производится откачка продуктов реакции; 8 — вакуумметр; 9 — сосуд с исследуемой смесью; 10 — электроды с искровым промежутком.



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки

Стеклянная трубка 1 через присоединенную на шлифе трубку 7 откачивается вакуумным насосом, направление к которому указано стрелкой на схеме, и заполняется исследуемой смесью из сосуда 9. В опытах при зажигании смеси у открытого конца перед поджиганием смеси трубка 7 отсоединяется. В опытах, в которых зажигание смеси осуществляется у закрытого конца, вместо трубки 7 присоединяется к трубке 1 через резиновую пробку стеклянный краник, через который осуществляется откачка и заполнение исследуемой смесью трубки 1. После зажигания исследуемой смеси в трубке 1 фоторегистром 6 производится регистрация распространения фронта пламени, а фоторегистром 4 с экрана катодного осциллографа регистрируется изменение давления в трубке 1 в процессе горения. Зажигание смеси осуществляется от катушки Румкорфа. Момент зажигания регистрируется одновременно на пленках обоих фоторегистров.

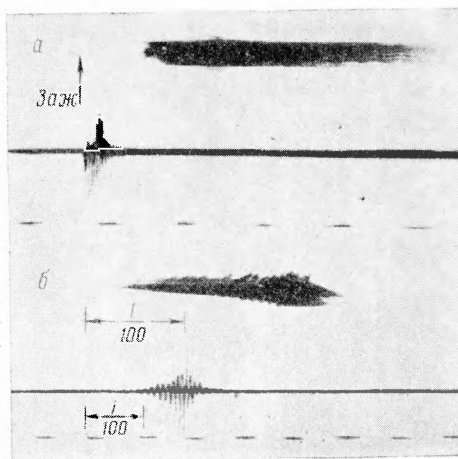
Результаты эксперимента. а) *Общая характеристика процесса горения.* При горении в трубке смеси одного и того же состава, но в условиях различного истечения продуктов реакции, т. е. когда горение осуществляется либо в закрытой с обоих концов трубке, либо в трубке открытой с одного конца, где и производится зажигание смеси, характер процесса горения на начальных стадиях существенно различный.

Когда процесс горения происходит в закрытой с обоих концов трубке, то сразу же из-за расширения продуктов реакции после зажигания смеси электрической искрой наступает заметное ускорение фронта пламени. Датчиком давления, расположенным в противоположном зажиганию конце трубки, вскоре после зажигания смеси регистрируется первая, достаточно большой амплитуды волна сжатия. Отраженная от датчика волна сжатия, встречаясь с фронтом пламени, отбрасывает его назад, а после отражения от торца в месте зажигания смеси, догоняя фронт пламени, увлекает его массовым потоком, движущимся за фронтом волны сжатия. Так как скорость распространения волны сжатия больше скорости распространения фронта пламени, то в течение всего процесса горения волна сжатия может несколько раз отбросить и увлечь за собой фронт распространяющегося по смеси пламени. В таких условиях опыта осуществляется так называемый режим вибрационного горения. Амплитуда первоначальной волны сжатия, возникшей в процессе воспламенения смеси и первоначального ускорения пламени, непрерывно увеличивается в процессе горения.

Если процесс горения осуществляется в открытой с одного конца у места зажигания трубке, то продукты реакции имеют свободный выход в окружающую атмосферу и пламя распространяется по смеси, на большей части трубки, с небольшой и практически постоянной скоростью. В момент воспламенения смеси после проскока через нее электрической искры возникает волна сжатия небольшой амплитуды, которая в этих условиях опыта может и не регистрироваться датчиком давления. В процессе горения первоначально возникшая слабая волна сжатия также усиливается и к концу горения ее амплитуда достигает большой величины. В опыте по мере увеличения амплитуды волны сжатия в начале наблюдаются небольшие отбросы пламени, которые при дальнейшем увеличении амплитуды волны сжатия также возрастают. К концу горения под воздействием распространяющейся по смеси волны сжатия наблюдается небольшое ускорение фронта пламени.

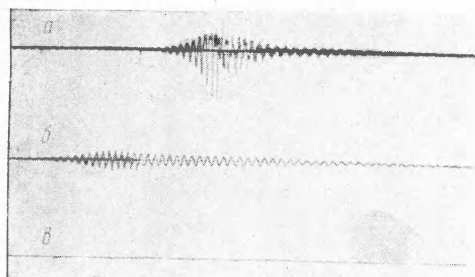
На фиг. 2 для иллюстрации приведены фотографии распространения фронта пламени по смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 3\text{O}_2$ в трубке диаметром $d = 20 \text{ мм}$ и длиной $L = 170 \text{ мм}$ и регистрации волн сжатия, возникающих и усиливающихся в процессе горения для разных условий опыта: а) горение смеси в трубке, закрытой с обоих концов, и б) горение смеси в трубке, открытой с одного конца при зажигании у открытого конца. В случае (а) регистрация волн сжатия в процессе горения произведена с чувствительностью осциллографа, в десять раз меньшей, чем в случае (б). Из анализа приведенных на фиг. 2 регистраций видно, что в обоих случаях в процессе горения происходит усиление волн сжатия. В первом случае усиление волн сжатия от взаимодействия их с зоной реакции пламени маскируется эффектом их усиления от значительного ускорения пламени на начальном участке трубки (начало зажигания на фигуре указано вертикальной стрелкой).

Во втором случае ускорение пламени на начальном участке трубки отсутствует, и эффект усиления волн сжатия связан только с взаимодей-

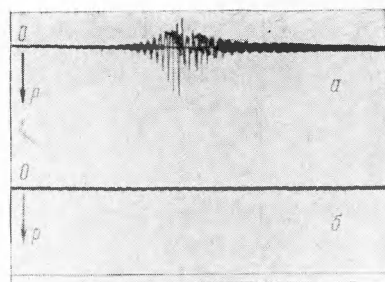


Фиг. 2

ствием их с фронтом пламени. Наблюдаемое в некоторых условиях небольшое ускорение фронта пламени к концу сгорания является следствием распространения волн сжатия по исходной смеси. Все дальнейшие опыты



Фиг. 3



Фиг. 4

были проведены в трубках, открытых с одного конца, при зажигании смеси у открытого конца.

б) *Исследование влияния состава смеси на усиление волн сжатия.* Были проведены опыты с метано-кислородными смесями, в которых уменьшением в смеси содержания горючего понижалась температура горения. Установлено, что при уменьшении содержания метана до 6.7% прекращается усиление волн сжатия в процессе горения.

На фиг. 3 приведены регистрации волн сжатия в процессе горения в трубке диаметром $d = 10$ мм и длиной $L = 170$ мм трех метано-кислородных смесей: 9.1% $\text{CH}_4 + 90.9\% \text{O}_2$, 7.7% $\text{CH}_4 + 92.3\% \text{O}_2$ и 6.7% $\text{CH}_4 + 93.3\% \text{O}_2$. Из рассмотрения регистрации (а) видно, что в смеси, содержащей 9.1% метана, в процессе горения волны сжатия усиливаются до значительной амплитуды, при горении смеси (б), содержащей 7.7% метана, усиление волн сжатия значительно слабее, а в смеси (в), содержащей 6.7% метана, вообще не наблюдается усиления волн сжатия в процессе горения.

Далее, в метано-кислородной смеси, содержащей 9.1% метана, исследовалось влияние замены избыточного кислорода на азот, т. е. исследовалось усиление волн сжатия в процессе горения в смесях состава: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{O}_2$ и $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2$. При замене избыточного кислорода на азот в метано-кислородной смеси практически не изменяются теплопроводность, коэффициент диффузии, теплоемкость и температура горения смеси.

В работе ¹ показано, что при замене избыточного кислорода на азот в метано-кислородных смесях уменьшается величина нормальной скорости распространения пламени. Это, по-видимому, связано с уменьшением скорости химических реакций в пламени [²], что приводит к увеличению ширины зоны реакции в пламени и, как следствие, уменьшению скорости распространения пламени.

Рассмотрение приведенных на фиг. 4 регистраций (а) волн сжатия в процессе горения при зажигании у открытого конца трубки ($L = 170$ мм, $d = 10$ мм) метано-кислородной смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{O}_2$ и (б) смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2$ показывает, что в метано-кислородной смеси имеет место ярко выраженное усиление волн сжатия в процессе горения, в то время как в процессе горения смеси, в которой избыточный кислород заменен на азот, регистрируется волна сжатия очень малой амплитуды, которая практически не усиливается.

¹ Jahn G. Диссертация, Karlsruhe, 1934.

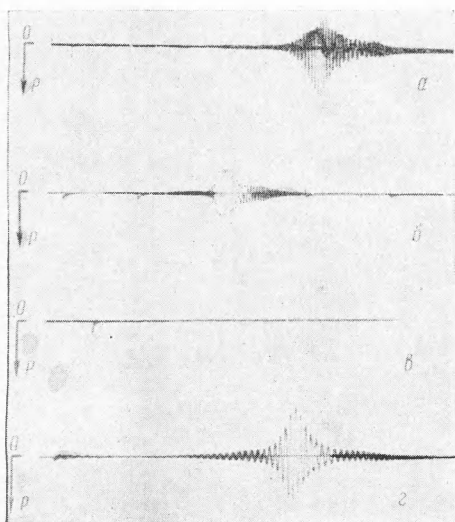
в) *Исследование усиления волн сжатия в трубках различной длины.* Так как механизм усиления волн сжатия при их взаимодействии с фронтом пламени связан с нарушением стационарности процессов в зоне реакции пламени и на ее границах, то представляло определенный интерес исследование усиления волн сжатия в процессе горения при различных частотах встреч волн сжатия с зоной реакции пламени. Были проведены опыты в трубках диаметром 10 мм различной длины при горении в них метано-кислородных смесей различного состава и метано-воздушной смеси стехиометрического состава. В результате проведенных опытов было установлено, что при уменьшении длины трубок, т. е. при увеличении частоты встреч зоны химической реакции пламени с волной сжатия, достигается такая длина, при которой в смеси данного состава прекращается усиление волн сжатия в процессе горения. В трубках меньшей длины, чем критическая длина для данной смеси, в процессе горения не регистрируются волн сжатия. В опытах установлено, что каждая смесь характеризуется своей критической длиной трубки.

Критическая длина зависит от величины нормальной скорости распространения пламени, т. е. от ширины зоны реакции в пламени. Чем больше ширина зоны реакции, тем больше и критическая длина. В табл. 1

Состав смеси	L , мм	p , кг/см ²
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 10\text{O}_2$	170	0.50
	75	0
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{O}_2$	170	1.65
	75	1.00
	42	0
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{O}_2$	42	1.75
	32	0.20
9.5% $\text{CH}_4 +$ 90.5% воздуха	170	0.35
	75	0

приведены значения максимальных амплитуд p давления в волне сжатия, полученных в результате опытов в трубках различной длины. Из этих данных видно, что в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 10\text{O}_2$ при длине трубки $L = 170$ мм в процессе горения наблюдается усиление волн сжатия, а при горении в трубке длиной $L = 75$ мм не наблюдается усиления волн сжатия.

В смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{O}_2$ в трубке той же длины $L = 75$ мм наблюдается явно выраженное усиление волны сжатия в процессе горения, но при горении этой же смеси в трубке длиной $L = 42$ мм не наблюдается усиления волн сжатия, хотя при горении смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{O}_2$ в трубке той же длины $L = 42$ мм наблюдается явно выраженное усиление волн сжатия в процессе горения. То же самое явление критической длины трубки



Фиг. 5

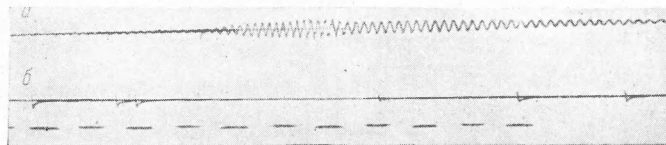
наблюдается и при горении метано-воздушной смеси стехиометрического состава.

При горении этой смеси в трубке длиной $L = 170$ мм наблюдается усиление волн сжатия, а при горении в трубке длиной $L = 75$ мм отсутствует усиление волн сжатия.

На фиг. 5 приведены регистрации волн сжатия при горении смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{O}_2$ в случае зажигания у открытого конца трубок одного и того же диаметра $d = 10$ мм, но различной длины: (а) $L = 170$ мм,

(б) $L = 75$ мм, (в) $L = 42$ мм, и там же приведена для сравнения регистрация (г) волн сжатия при горении смеси состава $\text{CН}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{O}_2$ в трубке длиной $L = 42$ мм.

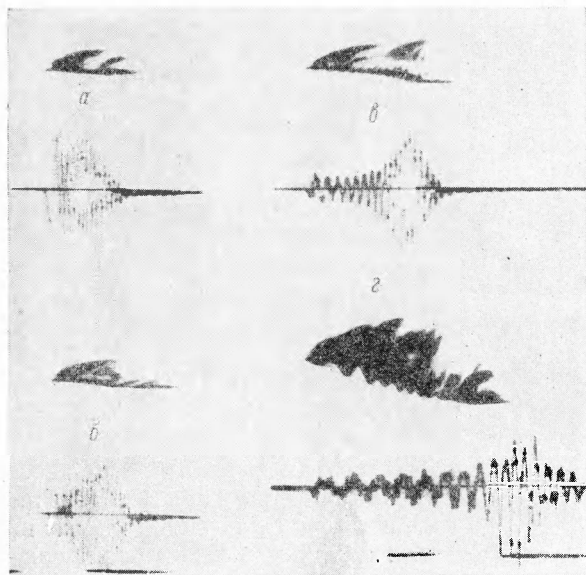
На фиг. 6 приведены регистрации волн сжатия при горении метано-воздушной смеси стехиометрического состава в случае зажигания у открытого конца трубок диаметром $d = 10$ мм, но различной длины: (а) $L = 170$ мм и (б) $L = 75$ мм.



Фиг. 6

Колебания фронта пламени, распространяющегося по взрывчатой смеси, происходят от встречи пламени с волной сжатия. Когда волна сжатия и фронт пламени распространяются в одном направлении, то происходит ускорение пламени, а когда в противоположных направлениях — происходит отброс пламени.

Амплитуда отброса или ускорения пламени зависит не только от амплитуды волны сжатия, но и от длины трубки.



Фиг. 7

На фиг. 7 приведены фоторегистрации распространения пламени в смеси $\text{CН}_4 + 1.2\text{O}_2$ и соответствующие регистрации волн сжатия в процессе горения в случае зажигания у открытого конца трубок различной длины: (а) $L = 32$ мм, (б) $L = 42$ мм, (в) $L = 75$ мм и (г) $L = 170$ мм, но одного диаметра $d = 10$ мм. В опыте использовалась минимальная длина трубки $L = 32$ мм, которая больше критической длины для данной смеси.

Рассмотрение регистраций фиг. 7 показывает, что при горении одной и той же смеси в трубках различной длины наибольшие отбросы пламени наблюдаются в более длинной трубке. В этом случае самые большие отбросы фронта пламени наблюдаются в начале процесса горения, далее амплитуда отбросов пламени уменьшается, хотя амплитуда волны сжатия непрерывно увеличивается. В процессе горения частота волн сжатия увеличивается, так как происходит заполнение трубки продуктами горения при высокой температуре взамен исходной холодной смеси. При увеличении частоты волны сжатия путем сокращения длины трубки также происходит уменьшение амплитуды отбросов пламени, хотя начальная

амплитуда волн сжатия возрастает, как это отчетливо видно из приведенных на рис. 7 регистраций волн сжатия.

Уменьшение амплитуды отбросов пламени при сокращении длины трубки, т. е. при увеличении частоты волн сжатия, связано, по-видимому, с тем, что при больших частотах не успевает устанавливаться массовый поток вещества за фронтом волны сжатия, а имеет место колебание газа с небольшими амплитудами около какого-то среднего положения. Поэтому в опыте и не наблюдается значительных колебаний фронта пламени в процессе горения, хотя амплитуда волн сжатия может быть и очень большой, как это хорошо видно на фотографиях (а) фиг. 7. Следовательно, только по регистрации отбросов пламени нельзя сделать однозначного вывода о величине амплитуды волн сжатия, распространяющихся по газовой среде и вызывающих указанные отбросы фронта пламени в процессе горения газовых смесей.

Рассмотрение результатов и выводы. 1. Полученные данные показывают, что даже в случае максимально возможного ослабления волн сжатия, путем выхода волн через один открытый конец трубки в окружающую атмосферу, при горении метано-кислородных смесей в опыте наблюдается усиление волн сжатия в широком диапазоне изменения содержания метана в смеси.

2. Механизм, по которому происходит усиление волн сжатия в процессе горения, когда пламя распространяется с небольшой и практически постоянной скоростью, разобран в работах [1,3]. Установленное в работе существование пределов по концентрации метана в смеси, в которых возможно усиление волн сжатия в процессе горения, связано, по-видимому, с уменьшением скорости химической реакции в зоне пламени. Усиление волн сжатия в зоне пламени зависит от величины изменения скорости химической реакции в зоне пламени под воздействием волны сжатия. Величина изменения скорости, в свою очередь, зависит от абсолютного значения скорости реакции. Ослабление волны сжатия при распространении по исходной смеси и продуктам реакции не зависит от величины скорости химической реакции в пламени и для данных условий опыта остается практически постоянным.

3. Уменьшение или увеличение содержания метана в смеси, начиная со смеси стехиометрического состава, приводит к понижению температуры горения и падению скорости химической реакции в зоне пламени. Когда энергия, получаемая волной сжатия в зоне реакции пламени, становится равной или меньшей энергии, рассеиваемой волной на остальном пути ее движения, наступает предел по усилению волн сжатия в процессе горения. Такое явление наблюдается в метано-кислородной смеси, содержащей 6.7% метана (фиг. 3).

Прекращение усиления волн сжатия в процессе горения при замене избыточного кислорода в метано-кислородной смеси на азот также связано с уменьшением скорости химической реакции в зоне пламени в метано-кислородо-азотной смеси.

4. Обнаруженное в работе существование критических явлений при усилении волн сжатия в процессе горения и связанных с размером системы, т. е. длиной трубки, обязано нарушению механизма, по которому нормально происходит усиление волны сжатия при ее взаимодействии с зоной химической реакции пламени. Для каждой исследованной смеси существует такая минимальная длина трубки, при которой в опыте не наблюдается усиления волн сжатия. Процесс горения в этих условиях протекает в отсутствие волн сжатия или при наличии очень слабых волн, амплитуда которых в процессе горения не увеличивается. Существование критической длины трубки для каждой смеси может быть качественно объяснено, исходя из следующих соображений.

Усиление волн сжатия при взаимодействии с зоной реакции пламени связано с нарушением стационарности процессов, происходящих в зоне

реакции и в непосредственной близости от нее. Если в промежуток времени между данным и последующим актом взаимодействия все нарушенные процессы восстановятся до начального стационарного состояния, соответствующего процессу горения в отсутствие внешних возмущений, то последующий акт взаимодействия будет проходить так же, как осуществлялся предыдущий акт взаимодействия, т. е. нормально. В случае, если промежуток времени установления стационарного состояния больше промежутка времени между двумя последовательными актами взаимодействия, то новое взаимодействие происходит в условиях нестационарного истечения продуктов реакции из зоны пламени, диффузии и теплопроводности. Может оказаться, что новый акт взаимодействия начнется в момент времени, когда у предыдущего акта взаимодействия закончилось время релаксации и начались нестационарные процессы рассасывания из зоны реакции пламени избыточной энергии, выделившейся в период предыдущего акта взаимодействия. Если в новом акте взаимодействия скорость выделения дополнительной энергии в зоне пламени будет равна скорости нестационарного ее рассасывания, то усиления волны сжатия в этом акте взаимодействия не произойдет. При таком соотношении времен и скоростей реакции в пламени и нестационарного рассасывания избыточной энергии из зоны пламени при последующих актах взаимодействия в течение всего процесса горения не будет наблюдаться усиления волны сжатия. В опыте могут наблюдаться и различные промежуточные случаи, лежащие между нормальным (максимальным) усилением и полным отсутствием усиления волн сжатия в процессе горения. Промежуток времени, необходимый для восстановления стационарного состояния в зоне пламени после прошедшего акта взаимодействия, будет зависеть также от величины ширины зоны пламени. Чем меньше величина нормальной скорости пламени, тем больше ширина зоны пламени. Промежуток времени между двумя последовательными актами взаимодействия определяется длиной трубки. Следовательно, у медленно горящих смесей критическая длина трубки будет больше, чем у смесей быстро горящих. Такое качественное объяснение существования критической длины трубки находится в хорошем согласии с полученными в работе экспериментальными данными.

Предложенный механизм усиления волн сжатия при взаимодействии с зоной реакции пламени и все получающиеся из него следствия применимы не только к ламинарному пламени, но и к пламени в турбулентном потоке, т. е. к любой зоне, в которой имеет место протекание химической реакции.

Институт химической физики
АН СССР

Поступило 10 X 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. К о г а р к о С. М. Усиление волн сжатия при взаимодействии с фронтом пламени, ЖТФ, 1960, т. 30, вып. 1.
2. J o s t W. Explosions u. Verbrennungsvorgange in gasen. Springer, Verlag von Julius, Berlin, 1939.
3. К о г а р к о С. М. и С к о б е л к и н В. И. Релаксационное взаимодействие ударных волн с зоной горения, ДАН СССР, 1958, т. 120, № 6.