

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ГАЗАХ  
В ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБАХ

В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко

(Новосибирск)

Методом высокоскоростной шпирен-фотографии исследуется возникновение детонации в газообразных взрывчатых смесях в условиях шероховатых труб. Рассматривается движение ускоряющихся пламен, их структура и изменение механизма передачи реакции. На различных стадиях преддетонационного периода исследуется характер взаимодействия формирующихся ударных волн с зоной горения. Показано, что на стадии, предшествующей возникновению детонации, в результате отражения ускоряющейся ударной волны от элементов шероховатости изменяется механизм распространения пламени: волна, непрерывно поджигая газовую смесь у стенок канала, образует единый ускоряющийся комплекс с турбулентным пламенем. Ускорение и развитие этого комплекса приводит к возникновению волны детонации на его фронте.

На основании экспериментальных данных высказываются некоторые новые соображения относительно действия элементов шероховатости трубы в процессе преддетонационного распространения пламени.

Исследование процессов, приводящих к переходу медленного горения газообразных взрывчатых смесей в детонацию, имеет большое научное, а также практическое значение. В техническом приложении, например, большие скорости горения, развивающиеся в преддетонационном периоде, представляют несомненный интерес при решении вопросов, связанных с интенсификацией процессов горения. С другой стороны, знание условий возникновения детонации является необходимым для ее предупреждения во взрывоопасных устройствах, скажем, газопроводах, двигателях, подземных сооружениях.

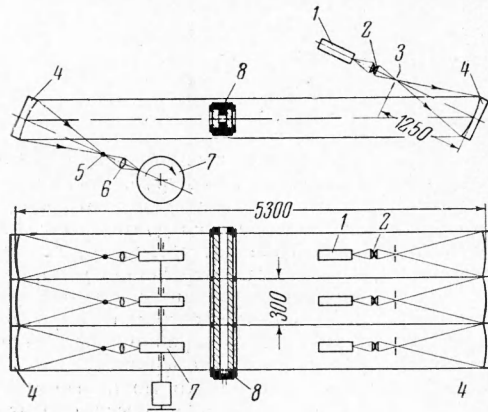
Переход медленного горения в детонацию газообразных смесей в трубах является предметом многолетнего исследования, однако несмотря на большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ, до сих пор отсутствует общепринятое представление о сложном процессе перехода горения в детонацию — процессе, включающем физико-химические, газодинамические и кинетические явления [1-5]. Остается нерешенным ряд важных вопросов возникновения детонации, такие, например, как причины преддетонационного ускорения пламени, свойства и механизм формирования ударной волны впереди фронта пламени, структура ускоряющихся пламен, вопросы кинетики химических реакций при температурах и давлениях, имеющих место в преддетонационном периоде.

Среди работ по исследованию возникновения детонации особый интерес представляют работы К. И. Щелкина. На основании своих опытов К. И. Щелкин указал на существенное влияние аэродинамических факторов на возникновение детонации [6-9]. Работая с шероховатыми трубами, К. И. Щелкин показал, что шероховатость сильно сокращает преддетонационный период от 20—40 диаметров в гладких трубах до 2—4 диаметров в шероховатых. Опыты с шероховатыми трубами привели К. И. Щелкина к открытию ряда интересных явлений, происходящих при развитии и распространении детонации [10, 11]. Однако возможности экспериментальной методики К. И. Щелкина были ограничены методом Ле Шателье — Диксона. Поэтому ряд вопросов, связанных со структурой пламени и механизмом его распространения в шероховатых трубах, не подвергался рассмотрению. В связи с этим авторами было предпринято дальнейшее экспериментальное исследование механизма преддетонационного распространения пламени в шероховатых трубах на установке Теплера [12] с использованием покадровой съемки высокой частоты. В настоящей статье приводятся некоторые результаты этого исследования.

**1. Методика экспериментов.** Преддетонационные процессы горения изучались в полузакрытых трубах при помощи фотографирования шпирен-методом. На фиг. 1 представлена схема трехканальной шпирен-системы с шестью вогнутыми сферическими зеркалами. На этой схеме: 1 — искровой разрядник, 2 — конденсор, 3 — диафрагма, 4 — зеркало, 5 — диафрагма или круглый экран, 6 — объектив фоторегистра, 7 — барабан с движущейся пленкой, 8 — ударная труба.

Источником света для этой системы служила серия электрических разрядов, протекающих одновременно в трех разрядниках. Серия обеспечивалась несколько измененной электрической схемой серийного искрового разряда, рассмотренной Нейбертом [13].

Стальная труба длиной 900 мм и сечением  $20 \times 20$  мм, снабженная с противоположных сторон тремя окнами, располагалась в параллельном световом пучке системы, как показано на фиг. 1. Шероховатость труб создавалась наклейкой на две противоположные стороны канала в различных опытах латунной стружки со средним размером  $2 \times 1.5 \times 0.5$  мм и фракций фарфора 0.63÷1 и 1÷2.5 мм. Две другие стороны канала ограничивались гладкими поверхностями оптических стекол окон, через которые производилось фотографирование распространяющихся пламен и ударных волн на движущуюся пленку. Такого рода фотографии приведены на фиг. 2 и 3. Скорость пленки во всех опытах оставалась постоянной — 60 м/сек.



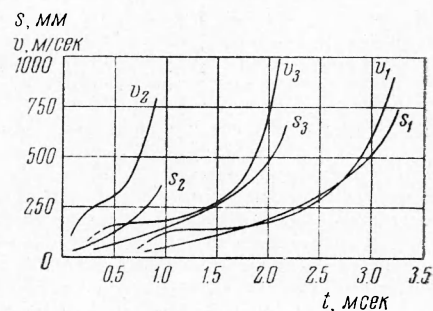
Фиг. 1

Исходные газы (водород, кислород, воздух) хранились в баллонах и во время опыта через редукторы подавались в смеситель и далее — в трубу. Состав смеси контролировался предварительно проградуированными трубками Вентури с автоматическим фотографированием показаний манометров в момент воспламенения смеси в трубе, которое осуществлялось слабой электрической искрой, расположенной у закрытого конца трубы.

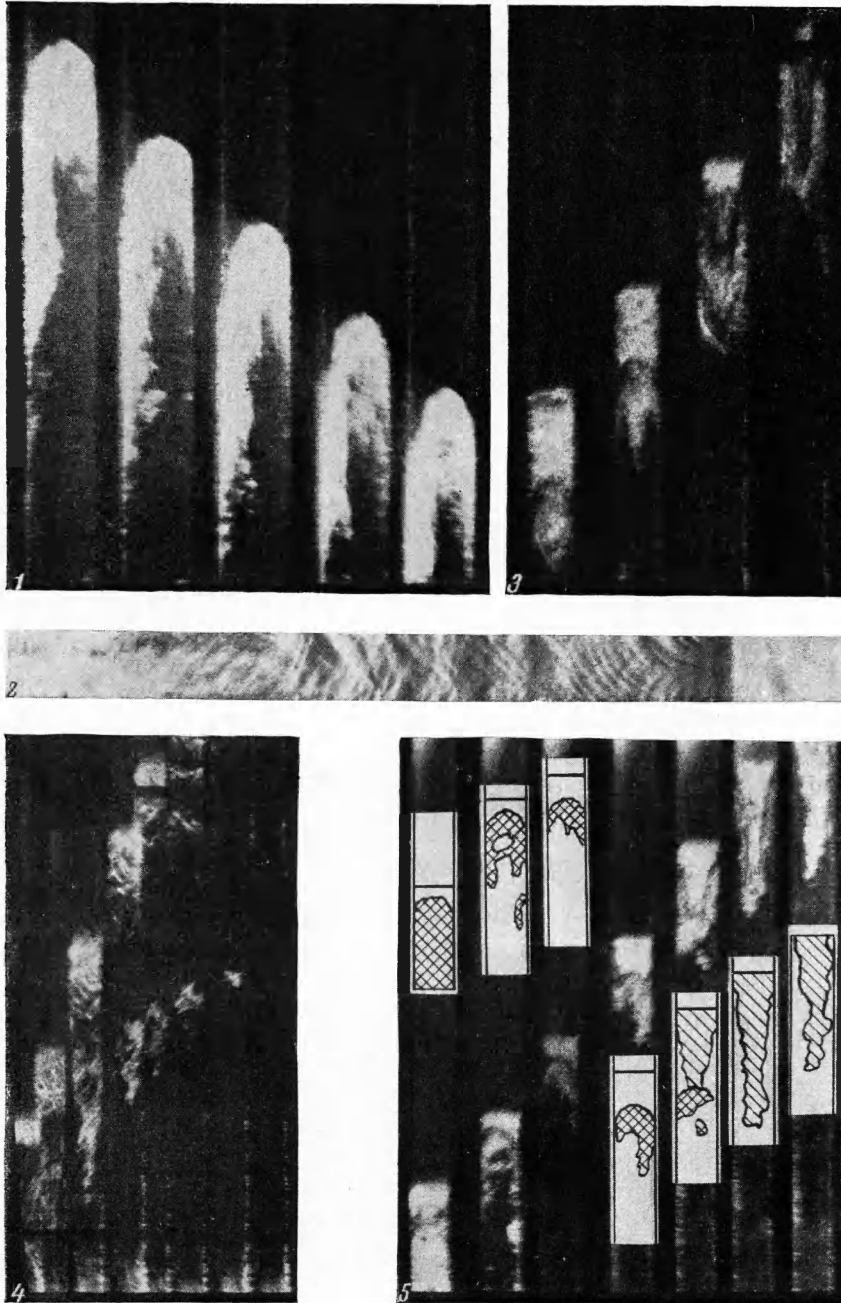
**2. Предетонационное развитие горения.** Рассмотрим предетонационное движение пламени в трубе с шероховатостью из стружки латуни с зерном  $2 \times 1.5 \times 0.5$  мм с соответствующим гидравлическим сопротивлением трубы  $\lambda = 0.08$ .

После воспламенения взрывчатой смеси электрической искрой пламя распространяется сферическим фронтом во все стороны до встречи со стенками трубы. На расстоянии 2—3 диаметров от начала воспламенения пламя теряет гладкую поверхность, превращаясь в турбулентное с приблизительно полусферической формой, сохраняющейся до последней стадии предетонационного периода. Общий характер движения пламени характеризуется первоначальным его ускорением до скоростей  $v$  порядка 200 м/сек с последующим падением ускорения и новым ускорением, поднимающим скорость пламени до 900 м/сек (фиг. 4).

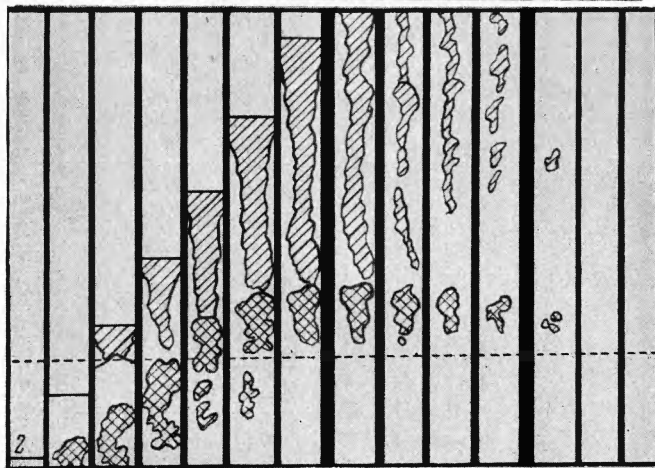
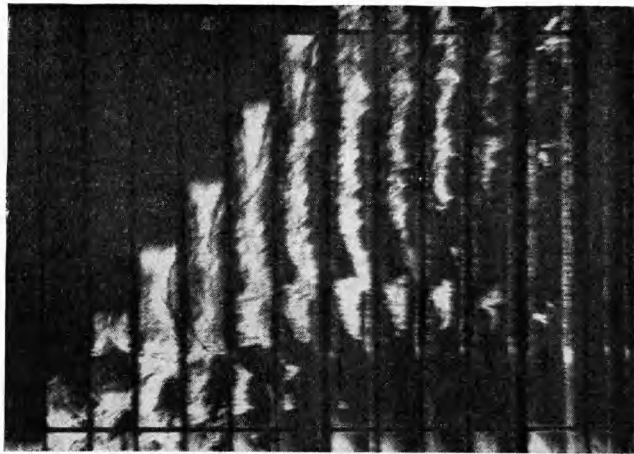
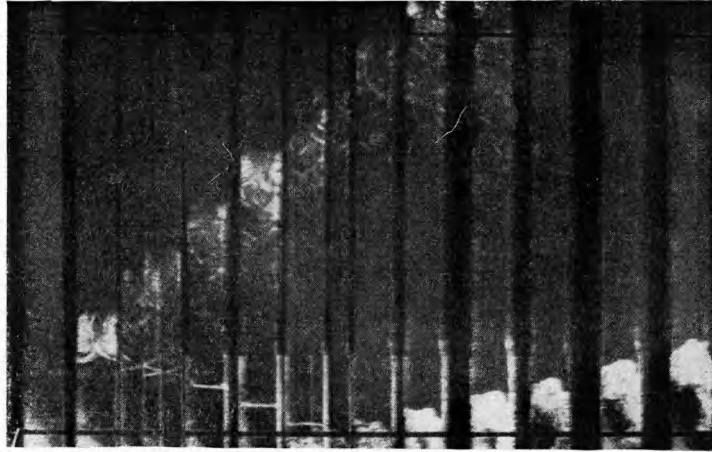
Своим следствием описанное двойное ускорение, отмеченное во всех исследованных смесях, имеет рождение волн сжатия впереди фронта пламени с образованием ударных волн. В результате первого ускорения образуется затухающая волна со скоростью порядка 500 м/сек, а в результате второго ускорения — ускоряющаяся ударная волна вблизи фронта пламени. По достижении ударной волной от второго ускорения определенной интенсивности происходит изменение механизма горения с вос-



Фиг. 4



Фиг. 2



Фиг. 3

пламенением смеси у шероховатых стенок вблизи волны. В соответствии с изменившимся механизмом воспламенения смеси в дальнейшем горение происходит в виде комплекса турбулентного пламени с ударной волной, внешний вид которого напоминает конус бунзеновской горелки. Ударная волна во фронте комплекса продолжает ускоряться до возникновения на этом фронте детонации. Остановимся подробнее на деталях процесса.

Характер распространения пламени существенным образом зависит от состава смеси. На фиг. 4 представлены зависимости пути  $s$  (в мм), проходимого фронтом пламени, а также скорости  $v$  (в м/сек) фронта от времени  $t$  (в мсек.) для различных смесей:

|  |                      |
|--|----------------------|
| 21.75% Н <sub>2</sub> + 22.45% О <sub>2</sub> + 55.8% N <sub>2</sub> | кривые $s_1$ и $v_1$ |
| 35.8 % Н <sub>2</sub> + 18.4% О <sub>2</sub> + 45.8% N <sub>2</sub>  | » $s_2$ и $v_2$      |
| 51.3 % Н <sub>2</sub> + 14.0% О <sub>2</sub> + 34.7% N <sub>2</sub>  | » $s_3$ и $v_3$      |

Графики скоростей наиболее отчетливо показывают особенности ускорения пламени. Максимальное начальное ускорение с соответствующим слабым замедлением наблюдается в смесях, близких к составу с максимальной нормальной скоростью пламени. В смесях, далеких от этого состава, ускорение уменьшается по величине, а последующая стадия замедления выражается значительно сильнее. В очень бедных и богатых смесях в стадии замедления пламя распространяется почти с постоянной скоростью. Приводим некоторые значения скоростей волн  $v$  м/сек, образующихся от начального ускорения, для различного содержания  $q$  % водорода в обогащенном до 48.7 % кислородом воздухе.

|            |      |      |      |       |      |       |
|------------|------|------|------|-------|------|-------|
| $q = 25.0$ | 30.8 | 35.8 | 40.0 | 44.25 | 48.4 | %     |
| $v = 437$  | 471  | 516  | 520  | 518   | 512  | м/сек |

Интенсивность ударной волны, как можно видеть из этих данных и фиг. 4, соответствует степеням ускорения. Кроме этого соответствия опыт показывает, что сильная волна образуется ближе к месту воспламенения, чем слабая. В смесях, близких к предельным, для формирования волны 900 мм труба оказывается уже недостаточной.

Распространяясь по турбулентному потоку, вызванному расширением продуктов горения, пламя на стадиях, предшествующих образованию комплекса, имеет несколько вытянутую вперед, приблизительно симметричную форму поверхности, как это видно по фотографии на фиг. 2.1. Заметного искажения формы пламени в стадии замедления, как это имеет место в гладких трубах [14], не наблюдается в пределах 20—50% Н<sub>2</sub>. Аналогично гладким трубам благодаря профилю скоростей и наличию пульсаций в потоке, в шероховатой трубе осуществляется механизм передачи реакции, при котором скорость пламени определяется наиболее выступающими вперед элементами ее поверхности [15,16].

Представляется весьма интересным отметить характер развития турбулентной области горения. Под этим термином мы понимаем отрезок трубы, на котором протекает реакция. При этом нетрудно видеть разницу между областью турбулентного горения и шириной зоны горения, определяемой К. И. Щелкиным [17] для случая крупномасштабной турбулентности как

$$\lambda = Bl \left( \frac{v'}{u} \right)^m$$

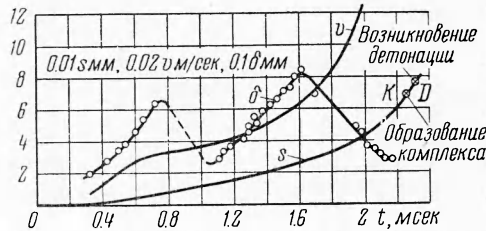
здесь  $v'$  — турбулентная пульсационная составляющая скорости потока,  $u$  — нормальная скорость пламени,  $l$  — масштаб турбулентности,  $B$  и  $m$  — постоянные, находящиеся в пределах соответственно 1÷3.5 и 0.5÷1.

Турбулентная область обычно больше зоны турбулентного горения. Это обусловлено прежде всего распределением скоростей потока по радиусу трубы и в случае шероховатых труб тем фактом, что благодаря шероховатости в пристеночном слое задерживаются значительные объемы

свежей смеси, догорание которых заканчивается на значительном расстоянии за передним фронтом пламени.

На фиг. 5 приведены зависимости протяженности области горения  $\delta$ , пути  $s$  и скорости пламени  $v$  от времени  $t$  в мсек. в преддетонационном периоде для смеси 25%  $H_2$  + 21.5%  $O_2$  + 53.5%  $N_2$ . На этой фигуре точка  $K$  — образование комплекса, точка  $D$  — возникновение детонации.

Как можно видеть, турбулентная область горения имеет два максимума. Первый максимум связан с начальным ускорением и последующим замедлением пламени. Второй обусловлен вторичным ускорением (подъем) и вероятным увеличением нормальной скорости распространения пламени с ростом температуры исходной смеси вследствие сжатия ее формирующейся ударной волной (спад). Существенно, что на стадии, предшествующей образованию комплекса, область турбулентного горения уменьшается, а не возрастает, как это часто



Фиг. 5

принимается и, более того, по причине отождествления с толщиной турбулентного фронта выдается за доказательство роли турбулизации смеси на скорость сгорания [9].

В результате второго, наиболее сильного ускорения, образуется ударная волна вблизи фронта пламени, при этом ее образование не приводит к немедленному воспламенению смеси. Дальнейший процесс совершается в виде ускоряющегося неустойчивого комплекса ударной волны с обычным, несколько выпуклым турбулентным пламенем, приближающимся по мере ускорения к ударному фронту.

Горение в зоне за ударным фронтом происходит в условиях возрастающей температуры и давления газа при усилении ударной волны волнами сжатия, распространяющимися от зоны реакции, а также в условиях развивающегося турбулентного пограничного слоя и системы отраженных от шероховатостей волн.

На фиг. 2.2 приведена шпирен-фотография ударной волны впереди фронта ускоряющегося пламени; при этом в качестве оптического ножа использована диафрагма; хорошо видны отраженные волны, распространяющиеся навстречу пламени. Ударную волну на этой стадии можно видеть также на первом и втором кадрах фиг. 2.3, на которой даны фотографии образования комплекса ударной волны с турбулентным пламенем на последней стадии преддетонационного периода. На этих кадрах зона реакции наблюдается в виде притемненной области с примерно полусферической границей. Впереди этой области находится светлая область — возмущенная зона за ударным фронтом. Заметно ее уменьшение.

При определенной скорости ударной волны, достигаемой в процессе ускорения, изменяется механизм первоначального воспламенения смеси (значения скоростей ударных волн приведены в верхней части таблицы): смесь непрерывно воспламеняется с весьма малой задержкой у шероховатых стенок вблизи фронта волны с последующим распространением пламени в направлении к центру канала. Ударная волна и турбулентное пламя образуют устойчивый комплекс. Образование комплекса можно видеть на третьем кадре фиг. 2.3. Четвертый кадр фиксирует сформировавшийся комплекс с областью горения в виде жгута пламени.

Ускорение комплекса приводит, с одной стороны, к увеличению длины горящего жгута, достигающего в отдельных случаях 5 и более диаметров трубы и, с другой стороны, — к усилению колебательно-вращательного движения. При продолжительном существовании комплекса, обычно наблюдаемом в смесях, близких к предельным, происходит рас-

Таблица

| Смесь            |                  |                  | D, м/сек | Смесь            |                  |                  | D, м/сек |
|------------------|------------------|------------------|----------|------------------|------------------|------------------|----------|
| H <sub>2</sub> % | O <sub>2</sub> % | N <sub>2</sub> % |          | H <sub>2</sub> % | O <sub>2</sub> % | N <sub>2</sub> % |          |
| 21.75            | 22.45            | 55.8             | 890      | 40.0             | 17.2             | 42.8             | 1065     |
| 22.7             | 22.2             | 55.1             | 925      | 44.25            | 16.0             | 39.75            | 1066     |
| 24.25            | 21.73            | 54.02            | 930      | 45.85            | 15.53            | 38.62            | 1090     |
| 25.0             | 21.5             | 53.5             | 935      | 50.6             | 14.18            | 35.22            | 1152     |
| 30.8             | 19.88            | 49.32            | 990      | 54.15            | 13.15            | 32.7             | 1380     |
| 25.0             | 21.5             | 53.5             | 953      | 26.5             | 21.1             | 52.4             | 980      |
| 25.0             | 21.5             | 53.5             | 965      | 28.1             | 20.6             | 51.3             | 1137     |
| 26.2             | 21.2             | 52.6             | 986      | 45.2             | 15.7             | 39.1             | 1370     |

пад жгута на части и сокращение его длины. Развитие комплекса завершается возникновением на его фронте детонации.

Объем смеси, находящейся в этот момент между ударным фронтом и фронтом пламени, обособленно догорает за детонационной волной, как это видно на фиг. 2.4.

Как уже указывалось, интенсивность ударной волны в момент ее образования недостаточна для детонационного самовоспламенения газа и, следовательно, место появления ударного разрыва не совпадает с местом возникновения детонации. Для иницирования детонации необходимо некоторое расстояние, на котором ударная волна во фронте комплекса получит достаточное усиление.

Возникновение и развитие комплекса, естественно, вызывает ряд вопросов: во-первых, каковы необходимые и достаточные условия для образования комплекса, во-вторых, каковы причины ускоренного развития комплекса и, в-третьих, при каких условиях иницируется детонация. В настоящей статье мы ограничиваемся первым из указанных вопросов.

Поскольку нам известны скорости ударных волн, при которых образуется комплекс, представляет интерес приблизительная оценка физического состояния газа за ударной волной, в условиях которого происходит воспламенение смеси на шероховатых стенках.

Отождествляя ударную волну в преддетонационном периоде с плоской стационарной волной равной скорости, для значений скоростей, приведенных в таблице, были определены температуры на фронте отраженных от шероховатости волн и температуры торможения газа на стенках трубы.

Сопоставление полученных температур с наблюдавшимися значениями температур самовоспламенения показывает, что значения температур отражения лежат выше, а температур торможения — ниже соответствующих температур самовоспламенения. Например, в смеси 40% H<sub>2</sub> + 17.2% O<sub>2</sub> + 42.8% N<sub>2</sub> (температура самовоспламенения около 890° K) при ударной волне, движущейся со скоростью 1065 м/сек, температура отражения порядка 1010° K при температуре торможения не более 790° K.

Сделанная оценка послужит в дальнейшем косвенным доказательством доминирующей роли отражения в воспламенении газа при образовании комплекса. Выяснение реального состояния газа, в условиях которого происходит воспламенение, кроме сделанных допущений, затруднено отсутствием характера изменения температуры и давления за фронтом волны и количественной оценки теплоотвода.

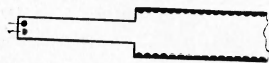
Образование механизма горения с воспламенением смеси у стенок трубы происходит за время порядка 30 ÷ 50 мсек. Это время определяется двумя последовательными кадрами, на первом из которых наблюдается обычное выпуклое пламя следом за ударной волной, а на втором — начавшееся периферийное воспламенение, например, на 2-м и 3-м кадрах фиг. 2.3. Первый из указанных кадров служит также для определения

расстояния, на котором пламя отстоит от фронта ударной волны в момент, предшествующий возникновению комплекса. В смесях различного состава это расстояние составляет 0,5—3 диаметра трубы. Более точное определение положения пламени ограничивается частотой кадров.

В этих условиях остается неопределенной роль самого пламени в образовании комплекса, т. е. непосредственное его диффузионное и тепловое воздействие на воспламенение смеси. Но возможно ли, например, при образовании комплекса явление «подтягивания» пламени к ударной волне по пристеночному слою в области с повышенной турбулентностью [18, 19], или же здесь основную роль играют другие факторы и в первую очередь повышение температуры и давления при отражении волны от элементов шероховатости? Изложенные ниже результаты некоторых опытов, как нам кажется, вносят определенную ясность в вопрос механизма воспламенения смеси у шероховатых стенок канала.

**3. Опыты с трубой, снабженной форкамерой.** Для выяснения роли самого пламени, а именно теплопроводности и диффузии активных частиц из зоны реакции, в образовании комплекса в определенном периоде были проведены опыты с описанной ранее трубой, специально оборудованной форкамерой из медной трубки длиной 33 см и внутренним диаметром 13 мм (фиг. 6).

Развитие горения в трубе с форкамерой происходит следующим образом. После воспламенения смеси пламя продвигается по гладкой трубке



Фиг. 6

форкамеры и входит в основную трубу. При выходе пламени из форкамеры создаются условия для быстрого увеличения скорости сгорания. Это увеличение обеспечивается, с одной стороны, турбулизацией смеси в циркуляционной зоне и, с другой стороны, увеличением поверхности пламени в результате изменения сечения канала. Благодаря резкому увеличению скорости сгорания вблизи выхода из форкамеры формируется ударная волна. После перестройки пламени и потока эффект резкого увеличения сгорающей в единицу времени смеси исчезает. В дальнейшем ударная волна, поддерживаемая энергией химической реакции, ускоряется. Ускоряется также и пламя, распространяющееся по ударно-сжатому газу. Однако в результате условий образования ударной волны от кратковременного увеличения скорости сгорания расстояние между фронтами ударной волны и пламени со временем увеличивается. Так же, как и в предетонационном периоде, по достижении ударной волной определенной интенсивности происходит воспламенение смеси у шероховатых стенок с образованием комплекса волны с пламенем. На фиг. 2.5 представлена шпирен-фотография образования комплекса в трубе, снабженной форкамерой.

Для большей ясности соответствующая картина процесса разъясняется схематическим представлением области обычного горения — двойная штриховка и области пламени комплекса — простая штриховка.

На 2—4 кадрах этой фигуры можно видеть расширяющуюся зону между фронтом волны и фронтом пламени. Расширяющаяся зона на снимке видна в виде светлой области, что свидетельствует о наличии в этой области возмущений, возникающих как от зоны горения, так и в результате отражения ударной волны от шероховатой стенки. Последующие кадры фотографии фиксируют начавшееся периферийное воспламенение. Результаты измерений в этих опытах скоростей ударных волн при образовании комплекса приведены в нижней части таблицы (стр. 169).

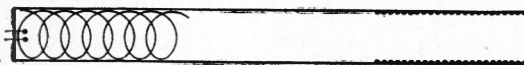
Таким образом, при образовании комплекса, по-видимому, не обязательно наличие контакта с пламенем, так же как не обязательно, чтобы пламя приближалось к фронту ударной волны. Комплекс образуется, следовательно, в результате увеличения интенсивности ударной волны до определенного значения. В свою очередь, увеличение интенсивности вол-



ны, т. е. поддержка ударной волны энергией от зоны реакции, зависит от характера движения самой зоны.

**4. Опыты с искусственной ударной волной.** Для дальнейшего выяснения условий образования комплекса и более обоснованных заключений были проведены опыты по организации горения в виде комплекса с помощью искусственной ударной волны. При получении искусственной ударной волны использовалось явление, отмеченное К. И. Щелкиным [9] и заключающееся в том, что при переходе детонации с пониженной скоростью<sup>1</sup> из шероховатой трубы в гладкую последняя при определенных условиях не превращается в нормальную детонацию, а распадается на ударную волну и зону турбулентного горения. Имея первоначально скорость, равную скорости детонации в шероховатой трубе, ударная волна постепенно удаляется от зоны горения и затухает. Помещая на пути ударной волны вновь шероховатость, можно таким образом исследовать процесс перехода ударной волны из гладкой трубы в шероховатую.

В наших опытах для инициирования детонации применялась проволоочная спираль, располагавшаяся у закрытого конца трубы. Схема такого опыта с искусственной ударной волной дана на фиг. 7. Изменением



Фиг. 7

шага спирали можно было изменять скорость детонации в спирали и тем самым на выходе получать ударную волну необходимой интенсивности. На расстоянии 675 мм от закрытого конца трубы создавался второй шероховатый участок длиной 225 мм, посредством наклейки зерна латуни  $2 \times 1.5 \times 0.5$  мм на две противоположные стороны канала.

Фиг. 3.1 и 3.2 представляют две типичные фотографии процесса взаимодействия ударной волны с шероховатыми стенками при переходе с гладкого участка трубы на шероховатый волн различной интенсивности. Фотографии расположены таким образом, что процесс на них регистрируется снизу вверх, а время — слева направо. На фиг. 3.1 показан переход слабой ударной волны из гладкой трубы в шероховатую. В случае смеси  $21.9\% \text{ H}_2 + 22.4\% \text{ O}_2 + 55.7\% \text{ N}_2$  скорость волны 710 м/сек, расстояние между масштабными метками (черные горизонтальные линии) равно 200 мм. В момент входа хорошо видны отраженные волны, которые, формируясь в единую плоскую волну, распространяются в обратном направлении навстречу пламени. При движении волны по шероховатому участку также видны отраженные от шероховатостей волны, вызывающие на фотографии «свечение», в результате чего прохождение волны по участку просматривается более отчетливо, чем в гладкой части трубы.

На фиг. 3.2 показан процесс перехода на шероховатый участок более интенсивной ударной волны в случае смеси  $24.5\% \text{ H}_2 + 21.7\% \text{ O}_2 + 53.8\% \text{ N}_2$ . Скорость волны 1010 м/сек, расстояние между отметками — 200 мм. Внизу для ясности показана схема картины процесса, пунктирная линия указывает границу шероховатого участка, двойная штриховка — пламя от распада детонации, простая штриховка — пламя комплекса.

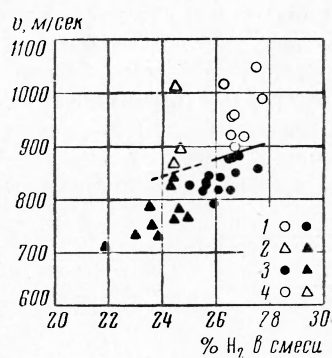
В отличие от случая, представленного на фиг. 3.1, волна вызывает воспламенение смеси при взаимодействии с шероховатостью. Непрерывное воспламенение происходит у шероховатых стенок, о чем свидетельствует зона горения в виде жгута пламени, в котором смесь догорает в центре канала. Замедляющееся пламя от распада детонации (на снимке

<sup>1</sup> Имеется в виду режим распространения горения с постоянной и сверхзвуковой скоростью, именуемой К. И. Щелкиным [10] «детонацией в шероховатых трубах».

оно появляется внизу с левой стороны) постепенно сливается с пламенем жгута. По мере продвижения ударной волны длина жгута растет и своим размером достигает длины шероховатого участка.

При сопоставлении с механизмом горения в преддетонационном периоде на последней его стадии механизм горения в данных опытах оказывается принципиально аналогичным. В обоих случаях горение происходит в виде комплекса ударной волны и турбулентного пламени с непрерывным воспламенением смеси у стенки вблизи ударной волны и последующим сгоранием смеси в направлении к центру канала.

Однако необходимо отметить, что в опытах с искусственной ударной волной имеются свои особенности. Например, длина горящего жгута



Фиг. 8

достигает значительно больших размеров, чем обычно наблюдаемая в преддетонационном периоде. Комплекс в преддетонационном периоде, в сравнении с искусственным комплексом, существует более короткое время. В настоящих опытах мы не преследовали цель выяснения вопросов, связанных с существованием и развитием искусственного комплекса, а также влияния различных гидродинамических и кинетических факторов. Эта область вопросов, как нам представляется, должна быть предметом дальнейших исследований.

В результате опытов с различной интенсивностью ударных волн было выяснено существование определенной границы в способ-

ности волн к воспламенению смеси на шероховатых стенках. На фиг. 8 приведены результаты определения минимальных скоростей ударных волн, воспламеняющих смесь при взаимодействии с шероховатой стенкой: в зависимости от %  $H_2$  в смеси точки 1 — смесь  $H_2$  + воздух; 2 — смесь  $H_2$  + воздух, обогащенный кислородом до 28.7%; 3 — нет воспламенения, 4 — есть воспламенение.

Пунктирная линия определяет минимальные скорости ударных волн в смеси  $H_2$  + обогащенный воздух, при которых смесь воспламеняется. Волны со скоростями, лежащими ниже этой линии, не вызывают воспламенения. Сплошная линия определяет минимальные скорости ударных волн в смеси  $H_2$  + воздух.

Сопоставляя минимальные скорости искусственных ударных волн со скоростями волн в преддетонационном периоде для соответствующих смесей, можно сказать, что скорости искусственных волн довольно близки к скоростям волн преддетонационного периода, при которых образуется комплекс. Точнее, они на 80—100 м/сек ниже соответствующих скоростей в преддетонационном периоде. Эта разница может быть объяснена существованием массового потока перед ударной волной в преддетонационном периоде, обусловленного, с одной стороны, движением газа при формировании волны от начального ускорения и, с другой, — самим характером вторичного ускорения пламени [20]. Заметим, что отмеченная разница, сравнительно небольшая, свидетельствует о соответственно небольших массовых потоках, по которым движется ударная волна (отсутствие потока впереди ударной волны в опытах с искусственной ударной волной проверялось расчетным путем).

Из всего сказанного со всей очевидностью следует, что комплекс турбулентного пламени с ударной волной образуется в преддетонационном периоде в результате такого взаимодействия ударной волны с шероховатой стенкой канала, при котором локальное повышение температуры и давления газа при отражении оказывается достаточным для его воспламенения.

5. Действие шероховатости в процессе развития горения. Как показывают результаты рассмотренных опытов, механизм воздействия шероховатости в процессе возникновения детонации изменяется по мере развития горения. На первых стадиях, не отрицая роли шероховатости в турбулизации смеси впереди пламени, приводящей к увеличению скорости сгорания, можно отметить и другой путь влияния на ускорение пламени шероховатой стенки посредством задержания исходной смеси в пристеночном слое с последующим ее догоранием за фронтом пламени.

При ускорении видимая скорость пламени, т. е. скорость пламени относительно стенок трубы, достигает нескольких сотен метров в секунду, нормальная же скорость пламени даже в наиболее быстро горящих смесях составляет метры и десятки метров в секунду. Большие видимые скорости достигаются вследствие движения со все возрастающей скоростью потока исходной смеси впереди фронта пламени. Распределение скоростей потока приводит к тому, что даже при очень больших скоростях близ стенок существует слой газа, имеющий скорость, во много раз меньшую максимальной скорости потока на оси трубы. Очевидно, что при распространении пламени в этом слое его скорость будет значительно меньше скорости в центре потока.

При движении газа элементы шероховатости задерживают значительные объемы свежего газа, который при догорании оказывается за фронтом пламени. Догорание этих объемов приводит к увеличению общей поверхности пламени, т. е. к увеличению скорости сгорания. Если предположить, что покоящийся пристеночный слой толщиной, равной высоте элемента шероховатости  $h$ , сгорает с нормальной скоростью  $u$ , протяженность области горения  $\delta$  будет определяться соотношением

$$\delta = f(t) - f\left(t - \frac{h}{u}\right)$$

где  $f(t)$  — закон движения пламени в трубе.

Например, в случае постоянного ускорения  $x = ct^2$  область горения равна

$$\delta = \dot{x}(t) \frac{h}{u} - c \left(\frac{h}{u}\right)^2$$

при линейно возрастающем ускорении  $x = ct^3$

$$\delta = \dot{x}(t) \frac{h}{u} - \frac{1}{2} \ddot{x}(t) \left(\frac{h}{u}\right)^2 + c \left(\frac{h}{u}\right)^3$$

Увеличение скорости пламени сопровождается увеличением протяженности области горения, причем это увеличение регулируется отношением  $h/u$ . Приведенные соображения находятся в качественном согласии с экспериментальными данными, представленными на фиг. 5. Сокращение области горения на стадии, предшествующей образованию комплекса, можно объяснить увеличением нормальной скорости пламени с повышением температуры исходной смеси в условиях формирующейся ударной волны, а также возможной турбулизацией смеси в пристеночном слое.

Поскольку ускорение пламени зависит от количества смеси, сгорающей в единицу времени, от степени развития поверхности пламени, увеличение скорости сгорания непосредственно связано с увеличением области горения. Большой скорости пламени при прочих равных условиях соответствует большая скорость горения. При постоянной скорости пламени догорающие объемы увеличивают начальную скорость газа впереди фронта пламени. Если пламя распространяется с ускорением, то догорающие объемы увеличивают это ускорение.

Как было показано, образование нового механизма горения на последней стадии преддетонационного периода обязано наличию шероховатости.

С образованием комплекса принципиальным образом изменяется механизм переноса реакции вместе с изменением механизма воспламенения смеси. Воспламенением смеси у шероховатостей близ волны достигается равенство скоростей ударной волны с пламенем. Если обычное турбулентное пламя переносится наиболее быстрыми элементами фронта пламени, то на последней стадии преддетонационного периода скорость горения определяется скоростью ударной волны на фронте комплекса. Происходит как бы принудительное непрерывное поджигание смеси. Турбулентное пламя при этом имеет естественную возможность распространяться с большими, хотя и недетонационными скоростями (более 900 м/сек) и, развиваясь, усиливать волну до интенсивности, достаточной для детонационного воспламенения. Таким образом, на последней стадии преддетонационного периода действие шероховатости проявляется главным образом через изменение механизма воспламенения смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколик А. С. О механизме преддетонационного ускорения пламени. ЖЭТФ, 1951, т. 21, вып. 10.
2. Зельдович Я. Б. Замечания к статье А. С. Соколика «О механизме преддетонационного ускорения пламени». ЖЭТФ, 1951, т. 21, вып. 10.
3. Соколик А. С. Ответ на замечания Я. Б. Зельдовича по поводу статьи А. С. Соколика. ЖЭТФ, 1951, т. 21, вып. 10.
4. Когарко С. М. и Новиков А. С. К вопросу об ускорении пламени в преддетонационном периоде. ЖЭТФ, 1954, т. 26, вып. 4.
5. Щелкин К. И. О переходе медленного горения в детонацию. ЖЭТФ, 1953, т. 24, вып. 5.
6. Щелкин К. И. К теории возникновения детонации в газовых смесях в трубах. ДАН, 1939, т. 23, № 7.
7. Щелкин К. И. Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах. ЖЭТФ, 1940, т. 10, вып. 7.
8. Щелкин К. И. Возникновение детонации в газах в шероховатых трубах. ЖТФ, 1947, т. 17, вып. 5.
9. Щелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М., Воениздат, 1949.
10. Дикент В. и Щелкин К. И. Быстрое горение в шероховатых трубах. ЖФХ, 1945, т. 19, вып. 4—5.
11. Щелкин К. И. Decrease of detonation velocity in Rough Tubes Acta Phys.-Chem. URSS, 1945, vol. 20, p. 303.
12. Бабкин В. С. и Козаченко Л. С. Механизм преддетонационного распространения пламени в шероховатых трубах. ДАН, 1960, т. 131, № 3.
13. Neuberger U. Beitrag zur Toeplerschen Schaltung der Funkenkinematographie. Z. Techn. Phys., 1943, vol. 24, № 8.
14. Саламандра Г. Д., Баженова Т. В. и Набоко И. М. Формирование детонационной волны при горении газа в трубах. ЖТФ, 1959, т. 29, вып. 11.
15. Щелкин К. И. О сгорании в турбулентном потоке. ЖТФ, 1943, т. 13, вып. 9—10.
16. Зельдович Я. Б. К теории возникновения детонации в газах. ЖТФ, 1947, т. 17, вып. 1.
17. Щелкин К. И. Замечания об измерении скорости распространения пламени турбулентного горения. Изв. АН СССР, ОТН, «Энергетика и автоматика», 1959, № 2.
18. Ривин М. А. О механизме переноса реакции в газовой детонации в трубах. ДАН, 1949, т. 67, № 5.
19. Щелкин К. И. Явления вблизи места возникновения детонации в газе. ЖЭТФ, 1955, т. 29, вып. 2 (8).
20. Jones H. Accelerated flames and detonation in gases. Proc. Roy. Soc. A, 1958, vol. 248, № 1254.