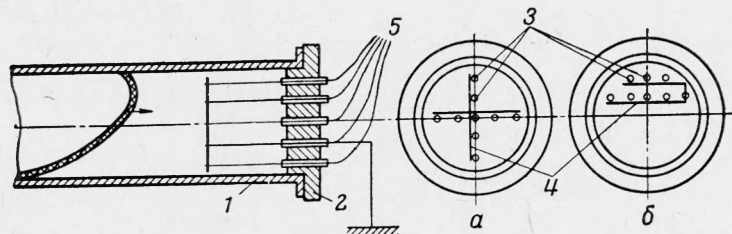


ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАМЕНИ РАСПАДА АЦЕТИЛЕНА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Б. А. Иванов, С. М. Когарко

(Москва)

При помощи ионизационных датчиков исследовалась форма поверхности пламени распада ацетилена в горизонтальных трубах при давлениях 2.5—5 *ата*. Использовалась труба диаметром 50 мм и длиной 750 мм. Зажигание производилось нагреванием нихромовой проволочки у открытого в ресивер с азотом торца трубы. Распространение пламени регистрировалось при помощи фоторазвертки процесса. Установлено, что пламя ацетилена имеет сложную и необычную для горючих смесей форму поверхности. При давлении ниже 4.5 *ата* пламя стационарно распространяется вогнутостью вперед. Полученная вогнутая форма поверхности пламени объясняется влиянием конвекции.



Фиг. 1. Схема ионизационных датчиков: 1 — экспериментальная труба, 2 — фланец, 3 — ионизационные датчики, 4 — массовый электрод, 5 — к осциллографу; а и б — схемы размещения датчиков на фланцах

Известно, что для быстро горящих смесей форма пламени при распространении в горизонтальных трубах представляет часть эллипсоида вращения и предложены методы для расчета величины этой поверхности. В медленно горящих и предельных смесях пламя, как правило, имеет сложную и несимметричную форму, и определение поверхности пламени в этом случае является трудным. Объяснение несимметричности формы пламени относительно оси трубы связывается с наличием конвективных потоков как в продуктах реакции, так и в исходной смеси. Определение формы пламени обычно проводится по теневым фотографиям методом Теплера, дающим хорошие результаты в том случае, если зона реакции достаточно тонка, а форма пламени представляет часть фигуры вращения.

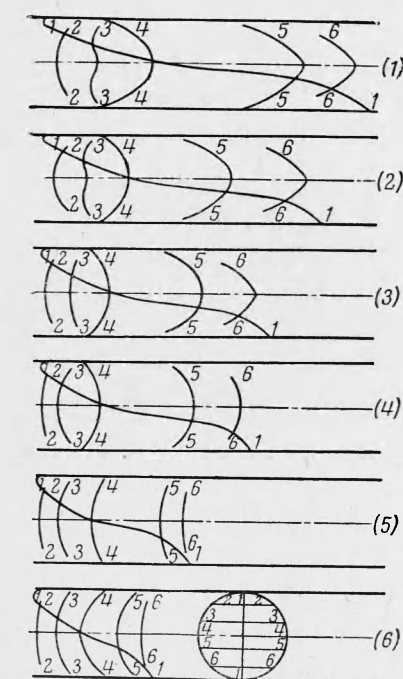
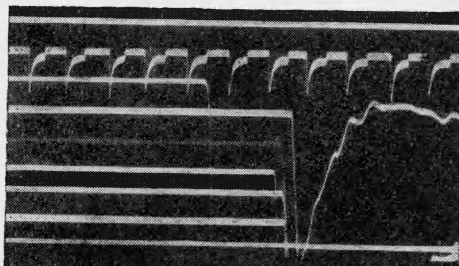
Однако в ряде случаев метод Теплера либо вообще не может быть использован, либо его применение связано с большими экспериментальными трудностями. Примером может служить пламя распада чистого ацетилена, зона химической реакции которого достаточно протяженна [1], а продукты распада состоят из мелкодисперсных сажевых частиц и водорода. Кроме того, чрезвычайно малая величина нормальной скорости горения, высокая температура пламени и наличие в продуктах легкого и хорошо диффундирующего водорода дают основание считать, что здесь влияние конвекции на форму пламени должно проявиться в наиболее сильной степени, и следует ожидать достаточно сложной поверхности пламени.

Исходя из вышеизложенного, для определения формы пламени ацетилена, распространяющегося в горизонтальной трубе (диаметром 50, длиной 750 мм), при зажигании у открытого в ресивер с азотом конца трубы были использованы ионизационные датчики, расположенные на противоположном зажиганию торце трубы. Положение датчиков и схемы их размещения показаны на фиг. 1. В качестве датчиков использовались тонкие (диаметром 1 мм), сточенные в конце на конус металлические стержни, между концами которых проходила проволочка (диаметром 0.5 мм), служащая массовым электродом. Минимальный размер ионизационного промежутка равнялся 0.5—1 мм, а расстояние между датчиками — 10 мм. На каждый датчик подводилось от независимых источников питания постоянное напряжение в 160 в. Изменение сопротивления искрового промежутка в момент прохождения через него пламени регистрировалось на движущуюся фотопленку шлейфовым осциллографом Н-102 в виде отбросов светового луча. В опытах было замечено, что независимо от чувствительности шлейфа резкий отброс луча, т. е. быстрое падение сопротивления искрового промежутка, происходит в каком-то одном месте пламени. Другими словами, при замене низкочувствительного шлейфа на высокочувствительный не меняется во времени (относительно остальных) положение начала резкого отброса луча. Меняется лишь характер

отброса: он становится резче, и иногда перед резким отбросом луча наблюдается незначительный подъем. аким образом, работая со шлейфами одной чувствительности, можно было считать, что все датчики отмечают момент прохождения через них какой-то одной (одинаково проводящей) поверхности, т. е. форму пламени. По относительному положению во времени отбросов лучей строились кривые сечения поверхности пламени вертикальными и горизонтальными плоскостями, в которых располагались датчики. Так как датчики располагались по сечению трубы не ближе 5 мм от стенки, то кривые сечения экстраполировались на это расстояние. По таким сечениям в натуральную величину изготовлялись модели формы пламени, по которым определялась площадь поверхности и по измеренной видимой скорости пламени рассчитывалась нормальная скорость пламени распада ацетиленов [2].

Для каждого начального давления экспериментально снимались осциллограммы ионизационного тока с шестью датчиками, расположенных в пяти горизонтальных и одном-двух вертикальных сечениях. Это осуществлялось

Фиг. 2. Осциллограммы ионизационного тока. Давление 4,5 *ama*. Время справа — налево



Фиг. 3. Сечения поверхности пламени вертикальной и горизонтальными плоскостями. Движение пламени справа — налево

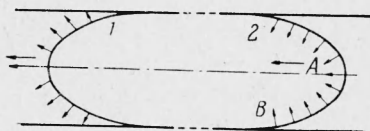
заменой датчиков, расположенных по схеме *a* на *б* (фиг. 1) и поворотом последних на 90 или 180°. О воспроизводимости опытов, которая необходима, так как полная форма пламени для данного давления определялась в нескольких опытах, можно было судить по постоянству величины видимой скорости и по контрольным датчикам, позволявшим проводить сопоставление с предыдущими опытами при данном начальном давлении.

На фиг. 2 для иллюстрации показана одна из осциллограмм ионизационного тока. По относительному положению отбросов лучей во времени (пять датчиков в средней по сечению горизонтальной плоскости, остальные два датчика использованы: первый — для контроля, второй — как отметчик времени) видно, что форма пламени в этом сечении выпуклая и симметричная. Аналогичные записи ионизационного тока были получены для всех исследованных давлений.

На фиг. 3 показаны кривые сечения поверхности пламени вертикальной 1—1 и горизонтальными 2—2, 3—3 и т. д. плоскостями при различных давлениях: (1)—2,5, (2)—3,0, (3)—3,5, (4)—4,0, (5)—4,5 и (6)—5,0 *ama*. Кривые строились по измеренным из осциллограмм относительным временам срабатывания датчиков τ и измеренной в опыте видимой скорости распространения пламени u $\Delta l = u \tau$, где Δl является величиной, показывающей насколько ближе или дальше находится пламя относительно датчика, отброс которого выбран за начало отсчета. Из фиг. 3 видно, что пламя ацетиленов при распространении в горизонтальной трубе имеет весьма сложную и необычную форму. Пламя, за исключением своей верхней части, при давлениях ниже 4,5 *ama* распространяется вогнутостью вперед. По мере увеличения давления эта вогнутость уменьшается и затем пламя принимает довольно обычную форму, хотя передняя («поджигающая») точка пламени оказывается очень высоко над осью и близко к стенке трубы, а «хвост» пламени имеет тенденцию выйти вперед.

Попытаемся объяснить столь необычную для пламен вогнутую форму пламени, стационарно распространяющегося по трубе [2]. Принятая в данной работе методика

исследования исключает возникновение каких-либо потоков в исходном несгоревшем ацетилене, направленных по оси трубы, и с ними не может быть связано объяснение наблюдаемой формы пламени. Известно, что сферическое пламя имеет более благоприятные условия распространения по смеси при движении с уменьшением поверхности, т. е. к центру, а наоборот, распространение сферического пламени от центра, особенно на начальном участке, является затрудненным [3]. Нетрудно представить, что вообще распространение пламени вогнутостью вперед (фиг. 4, 2) является, с точки зрения передачи необходимого для реакции тепла и активных частиц из зоны пламени в исходную смесь, более благоприятным. Однако в этом случае, если рассматри-

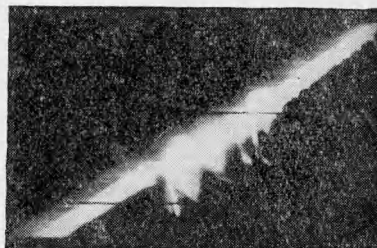


Фиг. 4. Схема выпуклого 1 и вогнутого 2 пламени. Пламя движется справа — налево. Стрелками указано направление потоков тепла в исходную смесь

вать устойчивость не сферического, а какого-то реального вогнутого пламени, распространяющегося по покоящемуся газу в трубе и имеющего контакты со стенкой, в исходном газе возникают области с неодинаковым нагревом (А и Б, фиг. 4), т. е. появляется возможность, например, более быстрого распространения пламени по области А. Этот процесс закончится перестройкой вогнутой формы пламени на выпуклую (1, фиг. 4), устойчивость которой не вызывает сомнения. Таким образом, следует считать, что вогнутое пламя является неустойчивым. Кроме того, очевидны трудности «стыкования» пламени со стенкой в случае вогнутого пламени. Однако, если в исходном газе будут иметься силы, действующие на газ (например, разность плотностей), и наличием этих сил будет обеспечен подвод исходного газа к этой вогнутой поверхности в таком количестве, которое она способна сжигать в единицу времени, то такая форма пламени может оказаться устойчивой.

Как показали приведенные опыты, устойчивое вогнутое пламя ацетилена действительно существует. Чем же достигается устойчивость этого пламени, т. е. что препятствует ему перестроиться на выпуклое? Естественным объяснением полученной формы пламени и его устойчивости является наличие сильных конвективных потоков вблизи поверхности пламени, о вероятности развития которых в ацетилене и возможности влияния на форму пламени уже говорилось ранее. Конвективные потоки легче развиваются по среднему сечению трубы, так как конвекция на периферии затруднена наличием стенок. Этим, очевидно, и объясняется как появление вогнутости в пламени сначала по среднему сечению трубы, так и сильная приподнятость всего среднего продольного сечения пламени. Развитие основных потоков конвекции в исходном ацетилене по среднему сечению трубы можно также объяснить и устойчивостью вогнутого пламени. Можно предположить, что необходимое избыточное количество ацетилена к области А доставляется именно этими конвективными потоками, т. е. около среднего продольного сечения пламени (в вогнутой части) на единицу сечения трубы сгорает больше ацетилена, чем в любом другом месте пламени. Причем и в самом среднем сечении на единицу сечения трубы сгорает неодинаковое количество ацетилена из-за различной кривизны поверхности пламени: оно больше в нижней части и меньше в верхней. Этим, очевидно, и объясняется то, что «хвост» пламени стремится выдвинуться вперед. Таким образом, устойчивое вогнутое пламя является результатом динамического равновесия между количеством ацетилена, которое сжигается на единицу сечения трубы и поступающего к этому сечению за счет перемещения пламени и сил конвекции. В этом равновесии решающая роль принадлежит конвекции. Отсюда следует, что если каким-либо образом будет уменьшено влияние конвекции, то форма пламени должна измениться. Конвекция связана с переносом вещества, с образованием массового потока, поэтому влияние конвекции на форму пламени уменьшается с увеличением скорости распространения пламени, так как конвективные потоки просто не успевают развиться. Действительно, с возрастанием давления (при этом увеличивается и u) вогнутость сокращается, и при 4.5 *атм* пламя имеет обычную выпуклую форму (фиг. 3).

Интересно отметить следующее. После зажигания пламя имеет сферическую форму. По мере развития сферы и приближения к стенкам трубы пламя вытягивается и принимает форму, близкую к эллипсоиду, который и начинает распространяться по



Фиг. 5. Фоторазвертка процесса распространения пламени в ацетилене. Давление 4.25 *атм*. Движение пламени слева — вверх — направо

трубе. Довольно быстро, уже на первых диаметрах трубы в нижней части среднего сечения пламени появляется вогнутость, которая быстро увеличивается в размерах, распространяясь при этом вверх по среднему сечению. Когда пламя проходит 5—7 диаметров, его форма становится стационарной и больше не меняется. Таким образом формировалось вогнутое пламя при давлении 2.5 *ama*.

Однако такое постепенное изменение формы пламени происходит не всегда. Так, при давлении 4.25 *ama*, находящемся в интервале давления, при котором совершается переход от стационарного вогнутого пламени к стационарному выпуклому, смена выпуклой поверхности на вогнутую произошла в результате нескольких колебаний пламени (фиг. 5).

Заметим, что как до изменения формы, так и после пламя распространялось с постоянными, хотя и различными, скоростями.

Можно предположить, что в медленно горящих смесях и особенно при распространении пламени в трубе сверху — вниз пламя также может изменить свою выпуклую форму на вогнутую. Имеются данные [4], показывающие уплотнение пламени при распространении сверху — вниз и связанные с этим изменения в поведении зависимости гасящего диаметра от давления.

Поступила 26 IV 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Когарко С. М., Иванов Б. А. О предельном давлении самопроизвольного распространения зоны реакции в ацетилене. Докл. АН СССР, 1961, т. 140, № 1.
2. Иванов Б. А., Когарко С. М. Нормальная скорость пламени распада чистого ацетилена. Докл. АН СССР, 1963, т. 150, № 6.
3. Семенов Е. С., Соколик А. С. Характеристики сферических пламен в стадии формирования. Докл. АН СССР, 1962, т. 145, № 2.
4. Potter A. E. and A n a g n o s t o n E. Reaction order in the hydrogen — bromine flame from the pressure dependence of quenching diameter. 7-th Sympos. (Intern.) Combust. London, 1959.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ Р. М. ЗАЙДЕЛЯ «О ВОЗМОЖНОСТИ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ»

С. К. Асланов (Саратов)

Исследование устойчивости плоского фронта пламени относительно малых возмущений впервые выполнено Л. Д. Ландау [1] в предположении постоянства скорости горения. Р. М. Зайдель [2] рассмотрел эту задачу в режиме индукции с учетом влияния возмущений на кинетику химической реакции, придя к выводу о возможности устойчивого пламени в ограниченных пределах ([2], условие (15)). Это ограничение, как будет показано в настоящей заметке, возникло за счет неточности использования одного из граничных условий (непрерывности потока импульса) на фронте пламени.

Стационарный плоский фронт (поверхность разрыва), совпадающий с осью y , отделяет исходную горючую газовую смесь ($x < 0$) с плотностью ρ_1 , давлением p_1 , температурой T_1 и скоростью v_1 от продуктов горения ($x > 0$) соответственно с ρ_2 , p_2 , T_2 , v_2 . В рамках приближения несжимаемой жидкостью линеаризованные уравнения для возмущений скорости v' и давления p' принимают вид

$$\operatorname{div} \mathbf{v}'_s = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{v}'_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial \mathbf{v}'_s}{\partial x} + \frac{1}{\rho_s} \nabla P'_s = 0 \quad (1)$$

Здесь $s = 1, 2$ — соответственно для исходной смеси и продуктов горения.

Механические краевые условия на поверхности разрыва (в линейной постановке $x = 0$) заключаются в непрерывности касательной скорости и потоков массы и импульса относительно разрыва

$$v_{1\tau} = v_{2\tau}, \quad \rho_1 v_{1n} = \rho_2 v_{2n} \\ p_1' + p_1 + \rho_1 v_{1n}^2 = p_2' + p_2 + \rho_2 v_{2n}^2 \quad (2)$$

где $v_{s\tau}$ и v_{sn} — составляющие относительной скорости (касательная и нормальная к возмущенной поверхности разрыва). Если малое смещение фронта вдоль оси x в результате возмущений есть $\varepsilon(y, t)$, то линейное приближение дает

$$v_{s\tau} = v_{sy}' + v_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}, \quad v_{sn} = v_s + v_{sx}' - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (s = 1, 2) \quad (3)$$