

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ВОДОГОРЮЧИХ ПЕН

*В. В. Заматицкий, В. С. Бабкин, Е. М. Тихомолов,  
Л. М. Голубушкин, О. К. Софилканич, К. Б. Канн,  
И. Р. Шрейбер*

(Новосибирск, Тюмень)

Дисперсия горючей газовой смеси в воде — одна из разновидностей газожидкостных пен. По аналогии с водовоздушными такие пены назовем водогорючими. В работах [1, 2] показано, что при определенных условиях в таких системах возможно распространение пламени. Однако сведения, касающиеся режимов горения, скоростных и структурных характеристик волны горения, в литературе отсутствуют.

Система пузырьков газа, изолированных друг от друга инертной перегородкой, исключает непрерывный перенос реакции по газу теплопроводностью и диффузией, поэтому для распространения пламени в водогорючих пенах весьма существенным оказывается процесс разрушения жидкой пленки. С ее разрушением в горение включаются такие элементарные процессы, как образование жидких аэрозолей, испарение жидкости, всасывание пеной избытка жидкости перед фронтом пламени и др. Если в зоне пламени успевает испариться значительная часть жидкости, то пары воды могут оказать существенное влияние на горение. Индивидуальный характер воспламенения и сгорания газа в отдельном пузыре предопределяет пульсирующий режим распространения фронта пламени. Отмеченные особенности позволяют ожидать существования интересных режимов горения, необычных закономерностей скорости распространения пламени.

Для исследования процесса горения водогорючих пен выполнены эксперименты, основная цель которых состояла в определении характера и скорости распространения волны горения в зависимости от основной структурной характеристики пены — ее кратности.

Водогорючую пену получали в барботажном пеногенераторе 6 (рис. 1) — стеклянной трубе, в нижней части которой устанавливался пористый фильтр 7. Пенообразующая жидкость (3%-ный раствор сульфанола в воде) из баллона 5 поступала в камеру 6, причем уровень жидкости над фильтром поддерживался постоянным. В смесителе 13 СГ-15/50 готовилась стехиометрическая метановоздушная смесь, которая через редуктор 12 и расходомер 11 подавалась под фильтр. Пузыряя смеси, всплывая на поверхность раствора, образовывали пену, которая через трехходовой кран 1 подавалась в стеклянную реакционную трубу 2. Труба вращалась с частотой 1 Гц. Эта операция подавляла процесс стекания жидкости в пене и позволяла сохранить ее кратность постоянной по сечению трубы при проведении опыта. Длина реакционного сосуда составляла 2650 мм, внутренний диаметр  $D = 105$  мм. Пена поджигалась у открытого конца трубы электрическим разрядом, происходившим между электродами 3, на которые подавалось высокое напряжение от импульсного трансформатора.

Во время опыта фронт пламени регистрировали в разные моменты времени. Схема системы регистрации показана

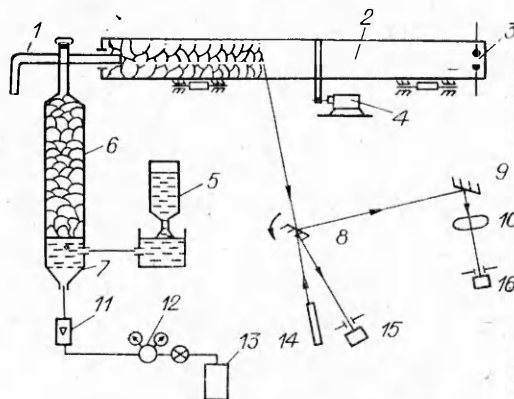


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

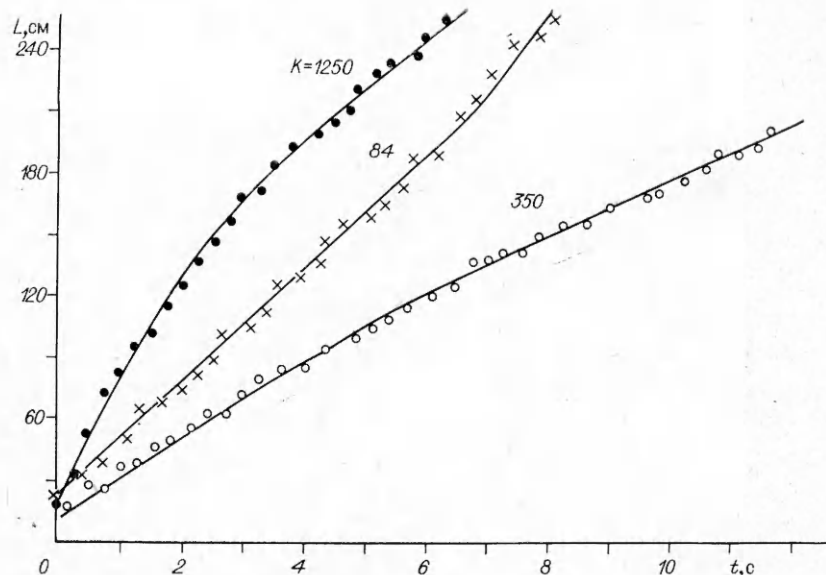


Рис. 2. Зависимости координаты фронта пламени от времени для разных  $K$ .

на рис. 1. Вращающееся зеркало 8 (период вращения  $62 \cdot 10^{-3}$  с) в зависимости от своего положения направляло на диафрагму изображение определенного участка трубы. Через диафрагму изображение попадало на ФЭУ-79 16. Таким образом зеркало периодически сканировало весь сосуд. Метка начала сканирования создавалась лазерным пучком 14, который отражался от второго зеркала, расположенного на общей вращающейся оси с основным зеркалом 8. Время сканирования трубы  $6,5 \cdot 10^{-3}$  с. Сигнал с фотодиода 15 о начале сканирования и сигнал с ФЭУ от светящегося фронта пламени поступали на усилитель, а затем на АЦП и в ЭВМ «Электроника-60М». В ЭВМ запоминалось время между меткой начала сканирования и информационным сигналом (свечением пламени). Длительность информационного сигнала составляла  $\sim 150 \cdot 10^{-6}$  с. За столь короткое время фронт пламени, скорость которого во всех опытах была меньше 80 см/с, не успевал заметно переместиться.

Средний диаметр пузырьков пены задавался пористостью фильтра и поддерживался примерно постоянным ( $\sim 3$  мм). Кратность  $K$  пены в реакционной трубе зависела от режима работы пеногенератора: с увеличением расхода газовой смеси кратность пены убывала. В каждом эксперименте величина  $K$  измерялась контрольным отбором пены через патрубок трехходового крана. Известный объем пены взвешивался и  $K$  определялась как отношение массы жидкости объемом, равным объему пены, к массе пены. В настоящих опытах диапазон изменения  $K = 80 \div 1700$ .

На рис. 2 приведены характерные траектории пламени. Значение  $t = 0$  соответствует началу регистрации, но не моменту подачи зажигающего импульса. Точки на каждой траектории получены в одном опыте. Видно, что скорость и характер распространения пламени существенно зависят от  $K$ . При больших  $K$  пламя распространяется с относительно высокой скоростью и непрерывно замедляется. Горение сопровождается интенсивным гудением. При  $K \sim 350$  скорость пламени минимальна. Слабо выраженное замедление движения имеет тенденцию к выходу на постоянную скорость. Сила звукового сопровождения существенно меньше, чем в случае больших  $K$ . Если  $K < 300$ , распространение пламени на большей части длины реакционной трубы равномерное. Только в конце трубы пламя заметно ускоряется и усиливается звуковое сопровождение. В большинстве опытов при разных кратностях фронт почти перпендикулярен оси трубы. В некоторых невоспроизводимых опытах пламя распространялось, имея несколько наклонный фронт,

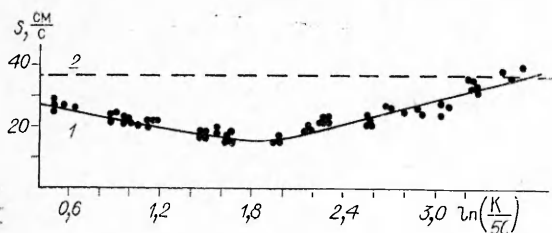


Рис. 3. Зависимость  $S(K)$  (1) и нормальная скорость пламени в стехиометрической метановоздушной смеси (2).

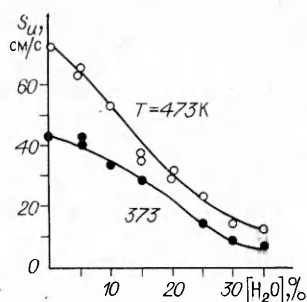


Рис. 4. Нормальная скорость распространения пламени в стехиометрической метановоздушной смеси с добавками воды при  $p_{II} = 1$  атм.

причем такое положение фронта сохранилось в процессе распространения (совершая вращательное движение вместе с трубой). Только в случае ускоренного движения при  $K < 300$  на заключительной стадии горения фронт пламени имеет, как правило, деформированный вид.

Пока трудно дать однозначную интерпретацию отмеченным особенностям распространения пламени при горении водогорючих пен. Возможно, что процесс замедления пламени в пене с  $K > 300$  связан с выходом на стационарное состояние, тогда как процесс ускорения в пене с  $K < 300$  — с возбуждением колебаний в реакционной трубе и взаимодействием их с процессом горения. Заметим, что ускорение пламени происходит не с начала процесса, а только в конце трубы, на фоне равномерного распространения.

Отсутствие непрерывного ускорения пламени во всем исследованном диапазоне  $K$ , тенденция к выходу на равномерное распространение при  $K \sim 350$  и равномерное распространение пламени при  $K < 300$  на достаточно большой измерительной базе ( $L/D \approx 20$ ) указывают на возможность существования стационарных режимов горения.

На рис. 3 приведена зависимость средней скорости распространения пламени от кратности пены. Так как скорости невелики, можно пренебречь эффектом сжимаемости пены перед фронтом пламени и считать, что скорость распространения  $S$  фронта равна скорости горения. Из рисунка видно, что при  $K \approx 300$  значение  $S$  минимально и приблизительно в 2 раза ниже нормальной скорости пламени в гомогенной метановоздушной смеси. Одной из возможных причин этого может быть участие паров воды в процессе горения. Известно, что пары воды при горении метановоздушных смесей играют флегматизирующую роль, действуя как инертный разбавитель [3]. На рис. 4 видно, что нормальная скорость, которая измерялась по начальному участку распространения пламени в бомбе постоянного объема [3], монотонно уменьшается, и при содержании воды  $> 35\%$  горение становится невозможным. Это критическое для распространения пламени содержание паров воды подтверждается данными [5], где пределу распространения пламени соответствует  $40\%$  воды. В нашем случае даже при  $K = 2000$  полное испарение жидкости приведет к содержанию ее паров больше  $40\%$ . Это дает основание предположить, что часть воды не успевает испариться и проходит зону пламени в виде аэрозоли.

Что касается минимума на зависимости  $S(K)$ , то такой характер кривой согласуется с зависимостью концентрационных пределов от кратности. В [1] показано, что концентрационная область распространения пламени в метановоздушных смесях имеет сужение при тех же значениях  $K$  ( $250 \div 300$ ). Если предположить постоянство скорости горения на пределах в рассматриваемой горючей системе (аналогично некоторым гомогенным газовым смесям [5]), то связь обсуждаемых явлений получает естественное объяснение. Для выяснения сущности процессов, происходящих при горении пен, необходимы дальнейшие исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Burgoyne J. H., Steel A. J. Fire Research Abstracts and Reviews, 1962, 4, 1, 2.
2. Цап В. П., Шароварников А. Ф и др. Коллоидный журнал, 1982, 2.
3. Бабкин В. С., Вьюн А. В. ФГВ, 1971, 7, 7.
4. Zabetakis M. G. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Bulletin 627.— Washington, US, 1965.
5. Ловачев Л. А., Баратов А. М. и др.— В кн.: Горючесть веществ и химические средства пожаротушения.— М.: ВНИИПО, 1973.

Поступила в редакцию 25/VI 1987

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ГЕТЕРОГЕННОЙ РЕАКЦИИ

С. С. Рыбанин, С. Л. Соболев  
(Черноголовка)

Волна горения при гетерогенной химической реакции может распространяться по поверхности таких материалов, как металл, полимер, уголь, находящихся в окислительной среде. С физической точки зрения этот процесс представляет собой распространение источника тепла вдоль границы раздела фаз. При этом тепловыделение происходит за счет гетерогенной реакции на поверхности горючего материала, окислитель к которой подводится диффузией и конвекцией. Выделяющееся вследствие реакции тепло идет на нагревание горючего материала и набегающего на него потока окислителя, что обеспечивает распространение волны горения. Рассматриваемый процесс по своей природе существенно неодномерный, поэтому его описание вызывает большие математические трудности, в связи с чем приходится прибегать к значительным упрощениям.

Обзор простейших моделей распространения волны горения по поверхности материала содержится в [1]. Анализ двумерных моделей посвящены работы [2—5]. В [2—4] рассмотрен случай распространения волны горения по термически тонкому слою материала, в [5] — по термически толстому для диффузионного режима химической реакции.

### Постановка задачи

В настоящей работе изучается распространение стационарной волны горения навстречу потоку окислителя, имеющего скорость  $U$  и направленного вдоль поверхности термически толстого слоя горючего материала. Система пространственных координат связывается с волной горения со скоростью  $V_f$  таким образом, что ось  $X$  направлена вдоль поверхности горючего материала, а ось  $Y$  — перпендикулярно к ней (рис. 1). В этой системе координат горючий материал и окислитель движутся со скоростями  $V_f$  и  $V = V_f + U$ .

Вводятся стандартные упрощения [2—6]: теплофизические свойства веществ считаются постоянными; используется простейшая химическая кинетика; пренебрегается зависимостью скорости потока окислителя от пространственных координат и эта скорость считается постоянной (приближение

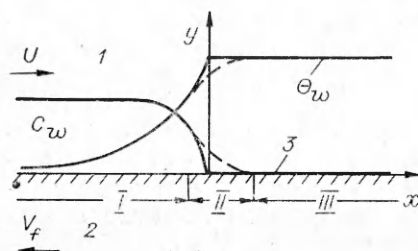


Рис. 1. Модель волны горения, поля температуры  $\theta_w$  и концентрации окислителя  $C_w$  на поверхности горючего материала.

1 — окислительная среда; 2 — горючий материал; 3 — зона химической реакции.