

УДК 541.182.45 614.841.12

ДИНАМИКА ГОРЕНИЯ ПЕН*Н. А. Какуткина, В. В. Замашников**Институт химической кинетики и горения СО РАН,
630090 Новосибирск*

Экспериментально исследована динамика горения водоосновных пен в трубах. Обнаружено, что пены, заполненные водородовоздушными смесями, горят стационарно. При горении пен с метановоздушными смесями выявлено два типа нестационарных эффектов. Показано, что нестационарность обусловлена взаимодействием звука, сопровождающего горение, с пеной и непосредственно с пламенем.

В водогорючих пенах пузырьки горючего газа отделены друг от друга негорючими жидкими пленками, затрудняющими распространение пламени по пене и сужающими концентрационные пределы распространения по отношению к пределам соответствующих газовых смесей, заполняющих пузырьки пены [1]. Тем не менее пламя способно распространяться по такой системе в широком диапазоне параметров [1], причем, в ряде случаев со скоростями, существенно превышающими нормальные скорости горения газовых смесей, заключенных в пузырьках пены [2]. Предварительные исследования динамики горения пен в горизонтальных трубах выявили в некоторых случаях эффекты замедления, а в других — ускорения пламени по мере распространения, что оставляет открытым вопрос о стационарности обнаруженного режима горения пен. Настоящая работа посвящена исследованию динамики горения пен и выяснению причин наблюдаемых эффектов нестационарности.

Методика эксперимента

Исследования проводили в стеклянной горизонтальной трубе диаметром 0,105 и длиной 2,75 м. Пену получали в барботажном пеногенераторе путем пропуска горючей газовой смеси через сетку с налитым на нее пенообразующим раствором (водный раствор сульфонола). Горючие газовые смеси предварительно готовили в смесителе высокого давления. В экспериментах использовали метано- и водородовоздушные смеси различного состава.

Пена из генератора подавалась в реакционную трубу. Для предотвращения вытекания жидкости из пены трубу вращали с частотой 1 об/с. Поджигали пену с открытого конца трубы открытым пламенем. В экспериментах регистрировали координату фронта пламени как функцию времени. Подробное описание установки и методики измерений дано в [3].

Основные структурные параметры пены — кратность и средний размер пузырьков пены. Средний размер пузырьков задается размером отверстий в сетке пеногенератора и в данной работе составлял 2 мм. Кратность пены K представляет собой величину, обратную объемной доле жидкости в пене. Измеряли кратность взвешиванием известного объема пены на аналитических весах. В пеногенераторе обычно получали пену с $K=1600$. На входе в реакционную трубу в эту пену вливали пенообразующий раствор с помощью перистальтического насоса. За счет капиллярных сил и вращения трубы вливаемая жидкость равномерно распределялась по объему пены, уменьшая ее кратность. Скорость вливания варьировалась, что позволяло менять кратность в реакционной трубе от 30 до 1600.

Динамика горения пен

Характер горения пен с водородо- и метановоздушными смесями различен. В водородных пенах пламя распространяется стационарно, независимо от кратности пены и состава газовой смеси, заполняющей пузырьки пены (рис. 1,а). По мере уменьшения кратности величина стационарной скорости горения сначала падает, а начиная с $K=300 \div 400$ растет. Причина немонокотной зависимости скорости горения от кратности рассмотрена в [4]. Следует отметить что горение водородной пены удается наблюдать только при содержании водорода в смеси менее 20%. В пенах с более богатыми водородными смесями сразу после зажигания происходит мгновенное разрушение всего столба пены в трубе, после чего наблюдается турбулентное сгорание газа, освобожденного при разрушении пены. Горение водородных пен происходит практически бесшумно и со слабо светящимся фронтом.

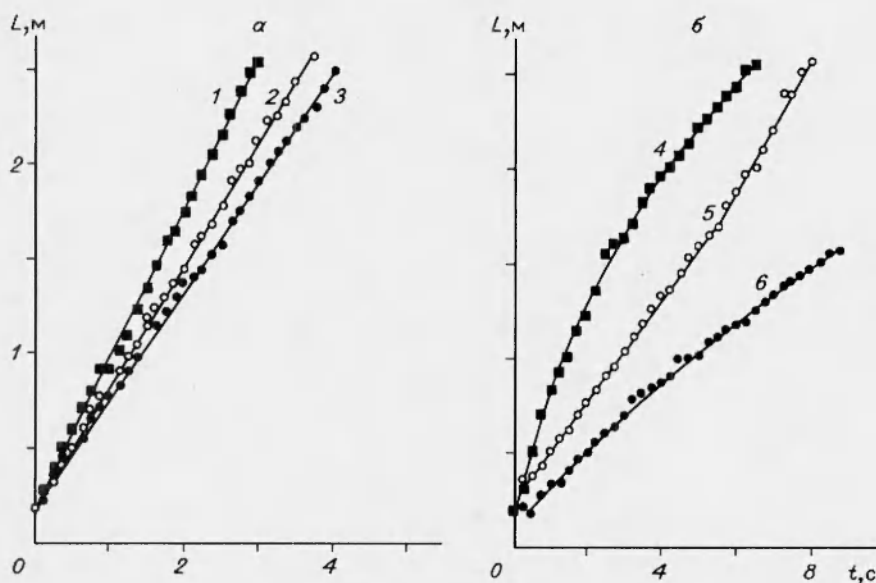


Рис. 1. Зависимости координаты фронта пламени L в пене с 10 %-й водородовоздушной (а) и стехиометрической метановоздушной (б) смесями от времени при кратности $K = 1300$ (1), 110 (2), 330 (3), 1250 (4), 84 (5), 350 (6).

Горение метановых пен, в отличие от водородных, сопровождается выраженным звуком. Наиболее сильный звук наблюдается при горении пен со стехиометрической метановоздушной смесью. Уменьшение содержания метана в смеси приводит к уменьшению интенсивности звука. Кратность пены также влияет на интенсивность звучания.

Характер горения метановых пен меняется с изменением кратности. При больших значениях K горение нестационарно: по мере распространения по трубе пламя замедляется (см. рис. 1,б, 4), горение сопровождается интенсивным звучанием. С уменьшением K характер горения приближается к стационарному (см. рис. 1,б, 6), а интенсивность звука уменьшается. При дальнейшем понижении кратности возникает новый нестационарный эффект. При $K < 200$ по большей части трубы пламя распространяется стационарно со слабым звуком, затем возникает интенсивный звук, и пламя ускоряется (см. рис. 1,б, 5). Измерения показали, что частота звука близка к собственной резонансной частоте трубы.

Таким образом, обнаруженные эффекты нестационарности горения коррелируют с акустическими эффектами, возникающими при горении пен. Это позволяет высказать предположение об акустической природе нестационарности. Для проверки этого предположения были проведены исследования влияния звука на горение пен.

Влияние звука на горение пен

В этих экспериментах при горении пен у открытого торца трубы устанавливался динамик. На динамик подавался сигнал от звукового генератора. Диапазон частот сигналов составлял $20 \div 1000$ Гц, максимальная сила звука 135 дБ. В качестве объекта акустического воздействия были выбраны пены с 10 %-й водородовоздушной смесью ввиду того, что их горение не сопровождается собственным звуком. Сопоставлялись зависимости скорости горения S пен от кратности, полученные без действия звука, с воздействием звуком в процессе горения и с предварительной обработкой пены звуком. Обработка состояла в том, что перед иницированием горения пена в течение 2 мин подвергалась воздействию звука. Затем звук отключался, и пена немедленно поджигалась.

На рис. 2 приведены зависимости $S(K)$, полученные при воздействии звуком с частотой 20 Гц и амплитудой звукового давления 112 Па. Видно, что звук не только изменяет величину скорости горения пен, но и вид зависимости скорости горения от кратности. Характер изменений сильно зависит от того, подвергается пена действию звука во время горения или до него.

Предварительная обработка пены звуком не влияет на скорость горения низкократных пен и существенно снижает скорость горения высокократных пен (рис. 2, 3). Замечено, что скорость горения снижается тем сильнее, чем ниже частота звука и больше его интенсивность. Рис. 3 иллюстрирует влияние амплитуды звуковой волны при предварительной обработке пены на скорость горения.

Действие звука во время горения увеличивает скорость горения пен в основном диапазоне кратностей и уменьшает при высоких значениях K (рис. 2, 1 и 2). Этот эффект зависит также от частоты и амплитуды звука. Более существенное влияние оказывает звук низкой частоты и большой интенсивности (рис. 4).

Результаты экспериментов однозначно указывают на значительную роль звука в процессе горения пен, причем тот факт, что предварительная обработка звуком также меняет скорость горения пен, свидетельствует об изменении под действием звука физических свойств пены, ответственных за ее горючесть. Рассмотрим возможные объяснения обнаруженных акустических эффектов.

Причиной замедления горения пен, предварительно обработанных звуком, очевидно, является акустическая накачка пены, обнаруженная и исследованная в [5]. Под действием звука в пене происходит структурная

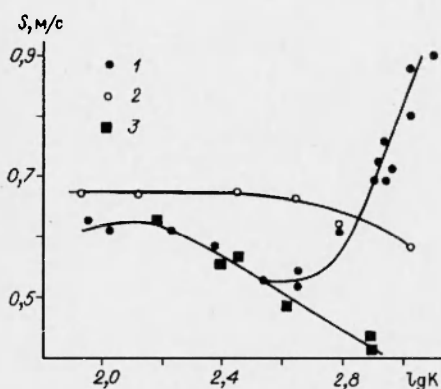


Рис. 2. Зависимости скорости горения пены с 10 %-й водородовоздушной смесью от кратности без воздействия звука (1), при действии звука (2) и после предварительной обработки пены звуком (3). Частота звуковой волны 20 Гц, амплитуда 112 Па.

перестройка, а именно, жидкость из каналов Плато и узлов пены перекачивается в пленки. В результате возникает неравновесная структура пены с утолщенными пленками [5]. Скорость горения пен, как показано в [4], определяется теплотерями пламени на разрушение жидких пленок и испарение капель, образующихся в результате распада пленок. Естественно, что для пен с неравновесной структурой эти величины отличны от таковых для равновесных пен. В частности утолщение пленок в обработанных звуком пенах увеличивает теплотери на их разрыв и, следовательно, уменьшает скорость горения.

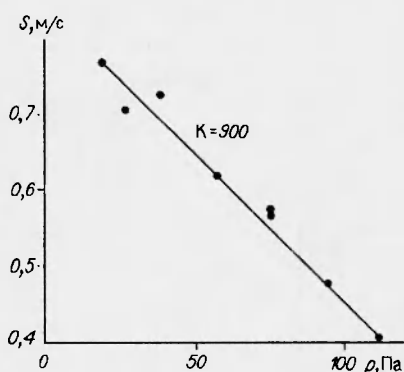


Рис. 3. Зависимость скорости горения пены, предварительно обработанной звуком, от амплитуды звуковой волны.

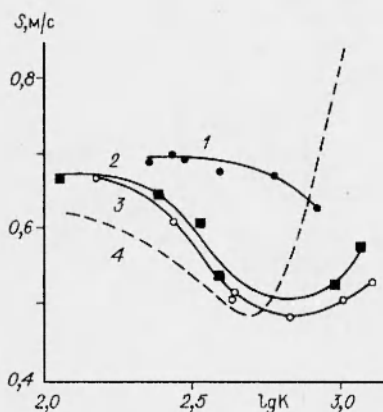


Рис. 4. Зависимости скорости горения пены от кратности при воздействии звуком:

1 — частота $\nu = 30$ Гц, амплитуда $p = 112$ Па; 2 — $\nu = 200$ Гц, $p = 112$ Па; 3 — $\nu = 30$ Гц, $p = 38$ Па; 4 — без действия звука.

Эффект уменьшения скорости горения предварительно обработанных звуком пен наблюдается только для высокократных пен (см. рис. 2). Это объясняется тем, что сильно накачиваются звуком только легкие, высокократные, пены [5]. В низкократных пенах изменения, производимые звуком, незначительны, поэтому и скорость их горения не меняется в результате предварительной обработки звуком. Наконец, влияние частоты и амплитуды звука на понижение скорости горения пен, обработанных звуком, также объяснимо. Результаты исследования акустической накачки пен показывают, что структурные изменения тем сильнее, чем ниже частота и выше интенсивность воздействующей звуковой волны [5].

Неравновесная структура, возникшая в результате акустической накачки, релаксирует после отключения звука [5]. Поэтому можно было бы ожидать, что горение предварительно обработанных звуком пен должно протекать нестационарно, так как скорость горения должна меняться по мере восстановления равновесной структуры пены. Это, однако, не наблюдается ввиду того, что характерные времена релаксации неравновесной структуры составляют десятки секунд [5], а время горения в данных условиях не превышает 8 с. В результате за время горения не успевают происходить заметная релаксация структуры, которая отразилась бы на скорости горения. Следует ожидать, однако, что в более длинных трубах

горение предварительно обработанных звуком водородных пен будет нестационарным, по мере распространения пламя должно ускоряться.

При действии звука в процессе горения на явление акустической накачки накладываются дополнительно эффекты вибрационного горения пены. Это, как видно из рис. 2, приводит к увеличению скорости горения пены при низких кратностях и к уменьшению при высоких. Увеличение

скорости при низких кратностях связано, вероятно, с акустическим воздействием на процесс сгорания газа, освобожденного из пены. При высоких K действуют одновременно два фактора в противоположных направлениях: структурное изменение в пене под действием звука, приводящее к замедлению горения, и ускоренное вибрационное сгорание освободившегося из пены газа (в дальнейшем «акустическое ускорение»). Это приводит к тому, что скорость в этом случае выше, чем для предварительно накачанной звуком пены, но ниже, чем для пен, вообще не обрабатываемых звуком.

Природа нестационарности горения

Полученные данные позволяют понять природу нестационарности горения метановых пен, которое, в отличие от водородных, сопровождается выраженными акустическими эффектами. То обстоятельство, что одинаковые по структуре пены, заполненные разными газовыми смесями, дают при горении отличающиеся звуковые эффекты, указывает, что источником звука является не разрушение пленок, а турбулентное сгорание порций газа, выбрасываемого при разрушении пузырьков. Более интенсивное акустическое сопровождение горения метановых пен может быть обусловлено большим коэффициентом расширения продуктов сгорания использованных метановых смесей (применялись бедные смеси водорода с низким коэффициентом расширения). В пользу этого предположения свидетельствует то, что самый сильный звук возникает при горении пен со стехиометрической метановоздушной смесью, несмотря на то, что скорости горения водородных смесей значительно выше.

Рассмотрим, каким образом звук, возникающий при горении, может повлиять на динамику горения пен. Горение водородных пен, как уже отмечалось, протекает почти беззвучно, поэтому ни эффект акустической накачки, ни эффект акустического ускорения не сказываются на динамике горения, и процесс горения стационарен.

Иная ситуация при горении метановых пен. Умеренный звук при спокойном горении высокочастотных пен (в отсутствие резонанса трубы) не способен вызвать акустическое ускорение, но достаточен для акустической накачки пены. Характерное время накачки пен — несколько секунд [5]. За время распространения пламени по трубе (~ 5 с) последние порции пены накачиваются сильнее, чем первые. Поскольку накачка приводит к снижению скорости горения, то горение высокочастотных метановых пен должно происходить с постепенным замедлением, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 1, б).

По мере уменьшения кратности пена все труднее накачивается звуком. Кроме того, при понижении кратности пены до 300 снижается интенсивность звукового сопровождения. Вероятно, это происходит благодаря снижению коэффициента расширения продуктов сгорания смеси, обусловленному увеличением теплотерь пламени на пленки пены и капли, образующиеся при разрушении пленок [4]. Этот звук не способен ни накачать пену, ни привести к акустическому ускорению, поэтому горение таких пен приближается к стационарному.

Дальнейшее понижение кратности ($K < 300$) приводит к появлению новых эффектов. Во-первых, благодаря увеличению среднего размера капель, образованных при разрушении пены пламенем, уменьшаются теплотери на их испарение [4]. Это приводит к увеличению коэффициента расширения продуктов сгорания, и, следовательно, усилению звука, сопровождающего горение. Однако, тяжелая, низкочастотная пена плохо накачивается звуком, и пламя распространяется стационарно на этой стадии. По мере распространения пламени все большая часть трубы освобождается

от пены. Вероятность возбуждения резонансных колебаний в свободной от пены части трубы зависит от ее длины, интенсивности звука, создаваемого горением и от того, какая часть звуковой волны отразится от пены. Коэффициент отражения звука от границы пена — воздух резко возрастает с уменьшением кратности [6]. Это в совокупности с увеличением интенсивности звука при низких кратностях приводит к тому, что при определенной длине свободной части трубы возбуждаются резонансные колебания. В результате после стационарного участка при низких кратностях наблюдается резкое ускорение горения (см. рис. 1, б). Эксперименты показывают, что кратность, начиная с которой наблюдается акустическое ускорение, понижается с уменьшением содержания метана в смеси. Это объясняется тем, что бедные смеси горят с меньшим коэффициентом расширения и, как следствие, создают меньшие акустические возмущения. Поэтому резонансные колебания в трубе возбуждаются при более низких кратностях, когда большая часть звуковой волны отражается от границы пены.

Таким образом, все наблюдаемые эффекты нестационарности горения пен удается объяснить влиянием звука. При низких кратностях до ускорения звук не оказывает существенного влияния на горение, поэтому скорость на начальном стационарном участке можно считать характеристикой горения пены. При высоких кратностях звук в течение всего процесса оказывает воздействие на пену, приводя к постепенному замедлению горения. Поскольку для каждой частоты и интенсивности звука существует стационарный уровень накачки и конечное время выхода на него [5], то в достаточно длинной трубе может быть достигнут стационарный участок горения. Однако, стационарная скорость горения в этом случае не является характеристикой горения данной пены, так как горит пена с неравновесной структурой, индуцированной звуком. Поскольку для акустической накачки пены требуется время, наиболее близко характеризует горение высокочастотных пен скорость, измеренная на начальном участке, когда изменения в структуре пены еще незначительны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-03-08938а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Burgoyne J. H., Steel A. J. Flammability of methane-air mixtures in water-base foams // Fire Res. Abstr. Rev. 1962. V. 4, N 1. P. 67-75.
2. Замашников В. В., Какуткина Н. А. Экспериментальные исследования закономерностей горения водоосновных пен, заполненных горючими газами // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 15-21.
3. Замашников В. В., Бабкин В. С., Тихомолов Е. М. и др. Экспериментальные исследования горения водогорючих пен // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 4. С. 35-38.
4. Zamashchikow V. V., Kakutkina N. A., Babkin V. S. Mechanism of flame propagation in foams // Combustion, Detonation, Shock Waves: Proc. of the Zel'dovich Memorial. Moscow, 1994. P. 229-231.
5. Замашников В. В., Какуткина Н. А. Структурные изменения в пене под действием звука // Коллоид. журн. 1992. Т. 54, № 2. С. 64-70.
6. Замашников В. В., Какуткина Н. А. Экспериментальные исследования акустических свойств пены // Акуст. журн. 1991. Т. 37, № 3. С. 484-489.

Поступила в редакцию 15/XII 1994 г.