

ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ГАЗА НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЖИДКОСТИ

В. В. Замашников

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, albor@kinetics.nsc.ru
Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Исследуется влияние модуляции скорости набегающего на пламя газа на среднюю скорость распространения пламени над «мелкой» жидкостью. Показано, что средняя скорость пламени зависит от частоты модуляции. Если частота модуляции больше собственной частоты колебаний пламени, то при наложении возмущений скорость пламени сначала возрастает, а затем постепенно возвращается к исходному значению. При частотах, близких к собственной частоте колебаний пламени, средняя скорость распространения пламени постоянна, но больше исходной.

Ключевые слова: горение жидкостей, мелкая жидкость, горение в узких каналах.

ВВЕДЕНИЕ

Распространение волны горения над поверхностью горючей жидкости возможно только, если перед фронтом пламени образуется горючая смесь. Для этого необходимо, чтобы жидкость прогрелась и ее пары успели перемешаться с окислителем. Экспериментально и теоретическому изучению явлений, происходящих при распространении пламени над «глубокой» и «мелкой» горючей жидкостью, посвящены работы [1–6]. Шлирен-фотография и инфракрасная термография позволили авторам работы [1] детально изучить процессы в жидкости перед и за фронтом пламени. Согласно исследованиям [1–6] перед фронтом образуются тепловые вихри. Это свидетельствует о том, что тепло передается вперед по жидкости со скоростью, необходимой для поддержания волны горения. Эксперименты [1, 2] показали, что существуют два режима распространения пламени: равномерный и пульсационный. При пульсационном режиме авторы [1] наблюдали периодическую смену относительно медленно распространения пламени и более быстрого. При этом после фазы быстрого распространения тепловые вихри в жидкости перед фронтом не наблюдаются, они постепенно появляются при медленном распространении пламени. В работе [1] поток воздуха двигался навстречу пламени. При этом скорость перемещения пла-

мени не зависела от скорости потока. Возможно, это связано с тем, что вблизи поверхности жидкости, там, где находилось пламя, возникали дополнительные конвективные потоки, которые и определяли картину процесса. В работе [7] эксперименты проводились в узкой трубке, при этом пламя распространялось в пульсационном режиме, а его средняя скорость зависела от скорости набегающего потока. Можно ожидать, что наличие набегающего потока повлияет и на характер пульсаций фронта горения. Кроме того, при периодическом изменении скорости набегающего потока средняя скорость перемещения фронта пламени может зависеть от периода этих изменений. Однако в работе [7] эти вопросы не рассматривались. Цель настоящей работы — исследование влияния периодически изменяющейся скорости набегающего потока на скорость распространения пламени над «мелкой» жидкостью.

УСТАНОВКА

Эксперименты проводились в горизонтальной кварцевой трубке длиной 1 м. Внешний диаметр трубки $10.5 \div 11$ мм, толщина стенки 1 мм. В качестве горючей жидкости использовался бутанол-1 (температура вспышки 35°C [8]). В каждом опыте в трубку заливалось $17 \div 19$ мл бутанола. Через один конец трубки подавался воздух, другой конец был открыт. Более подробно установка и методика проведения эксперимента описаны в работе [7]. В данной работе дополнительно между труб-

Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарного гранта Сибирского отделения РАН (№ 111, 2007 г.).

кой и поплавковым расходомером устанавливался динамик, на который подавался синусоидальный сигнал. Частота сигнала изменялась в диапазоне $18 \div 40$ Гц. Распространение пламени регистрировалось двумя видеокамерами. Скоростная видеокамера FASTCAM PCI-1000 фирмы «Photron» была установлена на расстоянии 54 см от открытого конца. Вторую камеру VM-7380E (25 кадр/с) фирмы «Hitachi» можно было перемещать вдоль трубки. С ее помощью проводились измерения средней скорости распространения пламени, для этого измерялась зависимость координаты фронта от времени. Точность определения скорости — 15 %, расхода воздуха — 3 %. Точность определения глубины жидкости из-за краевых эффектов [7] была невысокой — около 25 %. Эксперименты проводились при температуре $19.4 \div 22$ °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При изучении влияния звука на процесс распространения волны горения внутри трубки важно контролировать колебания газа перед фронтом пламени. Амплитуда колебаний газа зависит не только от величины подаваемого на динамик электрического сигнала, но и от акустических свойств всей системы. Эксперименты, проведенные в пустой трубке, с частицами размером ≈ 15 мкм, добавленными в воздушный поток, показали, что амплитуда колебаний (A) частиц сильно зависит от частоты (f) (рис. 1). Для регистрации колебаний

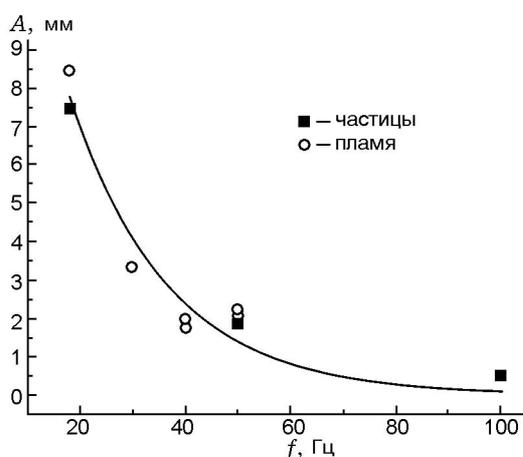


Рис. 1. Зависимость амплитуды колебаний частиц (Al_2O_3) и пламени от частоты при одинаковом напряжении, подаваемом на динамик, и близких расходах воздуха ($G = 12.5 \div 13.5$ см³/с)

частиц их подсвечивали лазером. На рисунке видно, что при одном и том же напряжении, подаваемом на динамик, амплитуда колебаний частиц значительно уменьшается с увеличением частоты. Для того чтобы не допустить большой ошибки из-за инерционности частиц, были вычислены отношения амплитуды колебаний частиц к амплитуде колебаний воздуха по соотношению, приведенному в [9]. Результаты вычислений позволили определить амплитуду колебаний воздушного потока по амплитуде колебаний частиц (см. рис. 1). Для изучения влияния колебаний скорости набегающего газа на скорость распространения пламени необходимо контролировать колебания газа во время опыта. Однако измерять амплитуду колебаний частиц при распространении пламени над жидкостью крайне затруднительно, поэтому измерялась амплитуда колебаний пламени. Так как пламя над поверхностью жидкости может свободно двигаться, можно считать, что кроме своих собственных колебаний оно будет отслеживать колебания набегающего на него газа. Колебания пламени регистрировались скоростной видеокамерой. Для того чтобы проверить, насколько оправданно предположение о возможности регистрировать колебания газа по колебаниям пламени, сравнивались амплитуды, полученные при измерении колебаний воздуха в трубке (без жидкости), с амплитудами колебаний пламени над жидкостью, которые связаны с изменением расхода воздуха. Так как при заданном расходе амплитуда колебаний скорости зависит от площади поперечного сечения, то данные, полученные для пламени, умножались на отношение площадей поперечного сечения свободного пространства над жидкостью к площади поперечного сечения трубки. Результаты обработки результатов экспериментов приведены на рис. 1. Видно, что различие значений A лежит в разумных пределах. Для того чтобы убедиться, что средний расход газа не зависит от его модуляции, расход газа измерялся с помощью счетчика объема газа TG05 фирмы «Ritter» при подаче электрического сигнала на динамик и в его отсутствие. Изменение расхода лежит в пределах точности измерения (не более 3.5 %), и его можно не учитывать.

В отсутствие модуляции пламя распространяется в пульсационном режиме. Результаты обработки видеоматериалов показали, что с увеличением расхода газа колебания пла-

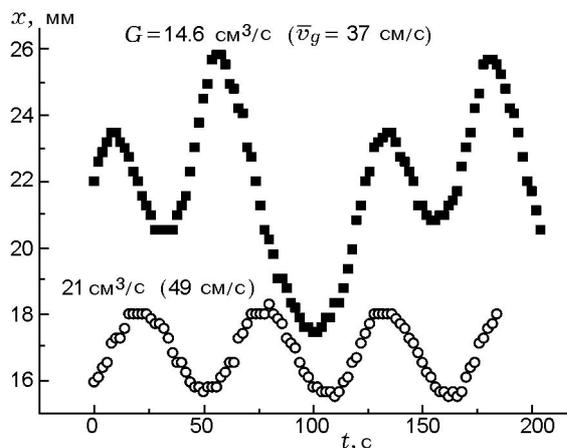


Рис. 2. Зависимости координаты пламени от времени при пульсационном распространении пламени для двух различных расходов воздуха

мени становятся более гармоничными, а их амплитуда уменьшается. Такой характер движения пламени иллюстрирует рис. 2, на котором приведены зависимости координаты пламени (x) от времени при расходах газа $G = 14.6 \text{ см}^3/\text{с}$ (средняя скорость газа $\bar{v}_g \approx 37 \text{ см/с}$) и $21 \text{ см}^3/\text{с}$ ($\bar{v}_g \approx 49 \text{ см/с}$), полученные на расстоянии 54 см от открытого конца трубки (начало отсчета на рис. 2 соответствует координате $x = 54 \text{ см}$). Для удобства сравнения зависимости сдвинуты друг относительно друга. Необходимо отметить, что пламя, помимо колебательного движения, совершает медленное поступательное движение вдоль трубы, но настолько медленное, что за время регистрации оно незаметно. Фурье-анализ показал, что в диапазоне частот $f = 0.5 \div 250 \text{ Гц}$ имеются максимумы на частотах 7.8 и 15.6 Гц при $G = 14.6 \text{ см}^3/\text{с}$. Нижний предел по частоте (0.5 Гц) определялся временем регистрации видеокамеры. При $G = 17.4 \text{ см}^3/\text{с}$ ($\bar{v}_g = 42 \text{ см/с}$) и $21 \text{ см}^3/\text{с}$ (см. рис. 2) пламя колеблется почти гармонично с частотами около 16 и 19 Гц соответственно. Наблюдается тенденция к увеличению частоты с ростом расхода. Полученные колебания сильно отличаются от колебаний, наблюдаемых в работе [1]. В работе [1] их частота была всего около 1 Гц. Кроме того, скорость пламени при колебаниях всегда оставалась положительной. В данной работе, как видно на рис. 2, это не так: скорость пламени при пульсациях изменяет свой знак. Причины различий могут быть в том, что в настоящей работе другая гидродинамика в зоне го-

рения, обусловленная ограниченностью свободного пространства, меньше глубина жидкости, большее влияние на горение оказывают стенки трубки.

Согласно рис. 1 амплитуда колебаний воздуха в трубке сильно зависит от частоты. Вследствие этого не удалось создать амплитуду колебаний, достаточную для изучения влияния колебаний на среднюю скорость пламени при $f = 40 \text{ Гц}$. При этом колебания пламени были хорошо различимы и регистрировались скоростной камерой. Однако средняя скорость пламени в пределах точности не изменялась.

Для изучения влияния модуляции на среднюю скорость пламени динамик включался и отключался в течение одного опыта. Таким образом, часть пути пламя преодолевало при наличии модуляции, а часть без нее. Изменение скорости пламени отражалось на зависимости координата — время.

Заметное влияние на скорость пламени наблюдалось при частоте 30 Гц. При достаточно больших амплитудах ($> 10 \text{ мм}$) пламя гасло. Причем если электрический сигнал подавался на динамик с начала эксперимента, то пламя какое-то время распространялось, прежде чем погаснуть. Наблюдается тенденция к увеличению расстояния, прошедшего пламенем до гашения, с уменьшением амплитуды звуковых колебаний и увеличением расхода воздуха. При меньших амплитудах пламя не гасло. Зависимость координата — время (осредненная

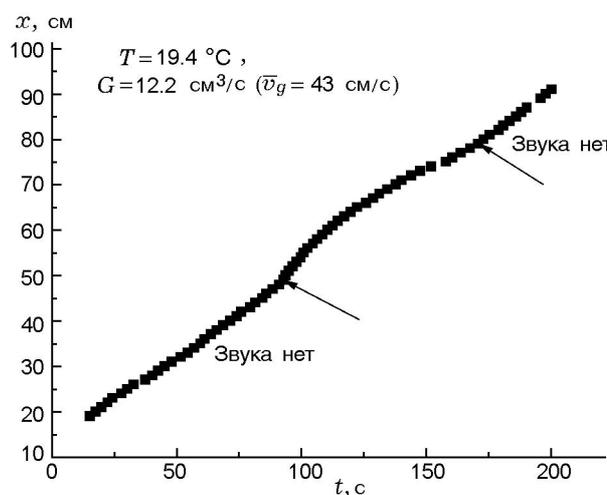


Рис. 3. Зависимость осредненной координаты пламени от времени при наличии и в отсутствие модуляции скорости набегающего на пламя газа с частотой 30 Гц ($A = 9.4 \text{ мм}$)

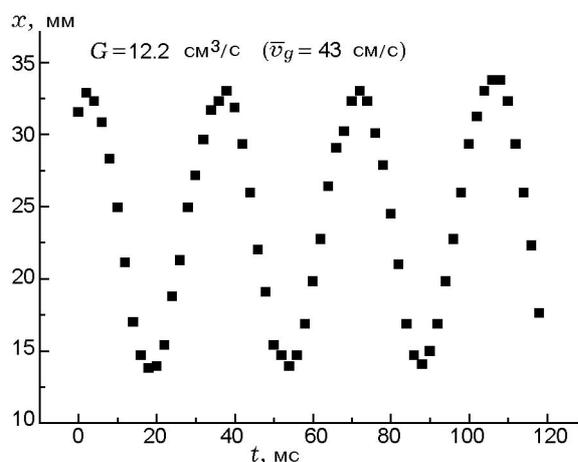


Рис. 4. Зависимость координаты пламени от времени, демонстрирующая колебание пламени под воздействием звука (30 Гц)

координата, без учета пульсаций) для такого случая приведена на рис. 3. Видно, что после включения модуляции средняя скорость сначала возрастает, а затем падает, т. е. пламя распространяется с различной средней скоростью. Если звук начинал воздействовать на пламя с начала процесса, то характер зависимости сохраняется. С уменьшением напряжения, подаваемого на динамик, отклик скорости пламени на модуляцию становился все слабее. Зависимость координата — время, полученная с помощью скоростной видеокамеры во время воздействия звука ($f = 30$ Гц) на пламя, приведена на рис. 4. Видно, что при таких амплитудах модуляции пламя совершает почти гармонические колебания с частотой ≈ 30 Гц. Характер поведения скорости пламени: сразу после включения звука она возрастает, а затем убывает (см. рис. 3) — свидетельствует о том, что пламя либо погаснет, либо начнет распространяться почти со стационарной средней скоростью. В последнем случае нестационарность связана с зависимостью амплитуды колебаний скорости набегающего газа от координаты, вследствие затухания звука при его распространении вдоль трубки. Измерения амплитуды колебания пламени под действием звука в разных точках трубки показали, что на расстоянии 50 см она уменьшается в 1.4 (ошибка 8 %) раза при $f = 18$ Гц и в 1.4 (ошибка 10 %) раза при $f = 30$ Гц. То есть в этом диапазоне частот затухание почти не зависит от частоты.

На рис. 5 приведены зависимости (максимальной и минимальной) средней скорости рас-

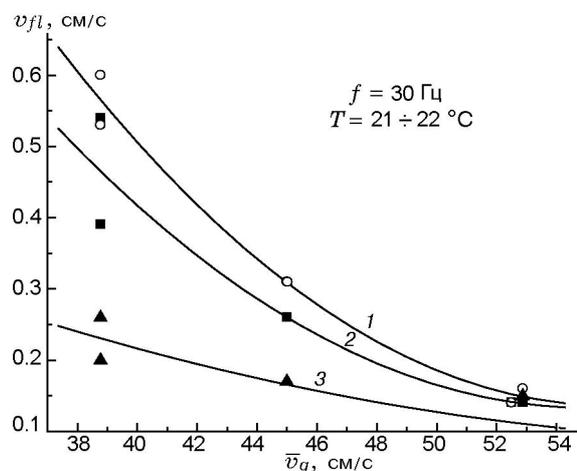


Рис. 5. Зависимости средней скорости пламени (1 — максимальной, 3 — минимальной) от средней скорости набегающего газа, полученные при одинаковом напряжении на динамике (2 — скорости, полученные без воздействия звука; $A = 8 \div 10$ мм)

пространения пламени после включения модуляции ($f = 18$ Гц) от средней скорости газа. Для сравнения приведены также скорости пламени, полученные без модуляции. Измерения проводились при одинаковой величине сигнала, подаваемого на динамик. При этом амплитуды колебаний пламени отличались из-за различий в глубине жидкости. Несмотря на то, что заливалось приблизительно одно и то же количество бутанола-1, глубина жидкости была разной, поскольку прежде всего она зависит от расхода. С увеличением расхода перепад глубин перед и за фронтом пламени возрастал и жидкость растекалась. Кроме того, не удалось воспроизвести хотя бы два опыта в совершенно одинаковых условиях (с одинаковыми глубинами). Однако необходимо отметить, что скорость пламени, согласно [7], если и зависит от глубины, то незначительно. На рис. 5 видно, что минимальная скорость ниже полученной в отсутствие модуляции расхода, а разница в скоростях уменьшается с увеличением расхода. Отметим, однако, что приведенные на рис. 5 значения скорости пламени при средней скорости газа 38.7 см/с соответствуют скорости пламени перед гашением. Обработка всех полученных данных показала, что в случае, когда гашения не было, минимальные скорости близки к полученным без воздействия звука. Таким образом, на частотах модуляции расхода, больших характерной собственной частоты

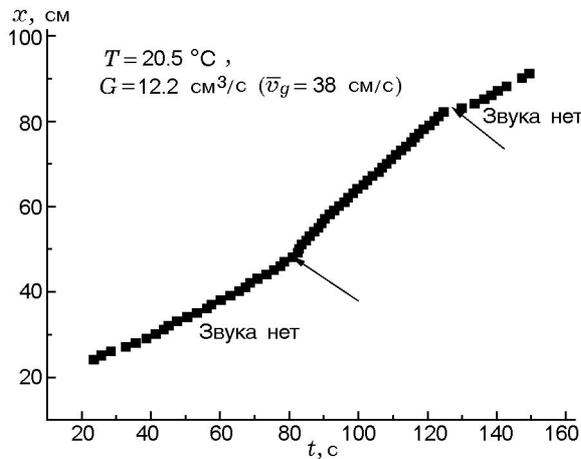


Рис. 6. Зависимость осредненной координаты от времени без воздействия и под действием звука частотой 18 Гц ($A = 18$ мм)

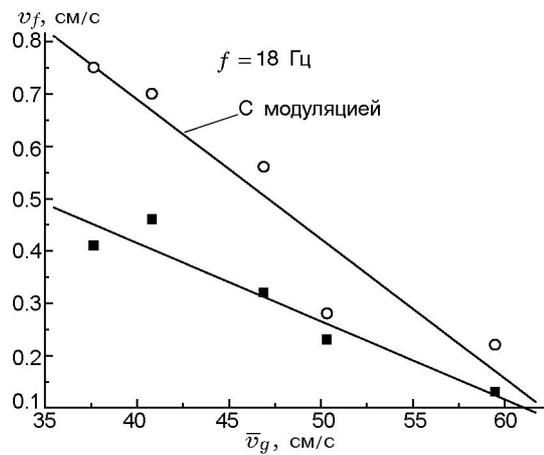


Рис. 8. Зависимости средней скорости пламени от средней скорости набегающего газа, полученные при модуляции скорости набегающего на пламя газа и без модуляции (амплитуда колебаний пламени при наличии модуляции $18 \div 19.6$ мм)

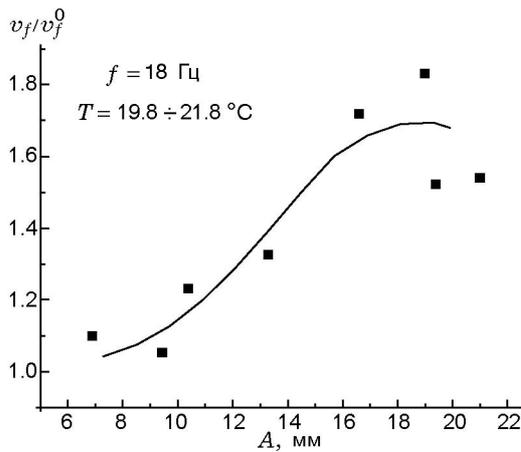


Рис. 7. Зависимость отношения средних скоростей распространения пламени при наличии и в отсутствие модуляции скорости набегающего газа от амплитуды колебаний ($l = 3.2 \div 3.7$ мм, $G = 12.2$ см³/с)

колебания пламени, отклик средней скорости пламени на модуляцию выражается в появлении нестационарного участка (для средней скорости), после которого скорость пламени приближается к скорости пламени без модуляции. При достаточно больших амплитудах модуляции наблюдается гашение пламени.

Картина существенно меняется при частоте модуляции 18 Гц. В этом случае также наблюдается гашение, но уже при $A > 21$ мм. Зависимость координата — время (средняя без

учета пульсаций) для случая, когда пламя не гаснет, приведена на рис. 6. Видно, что после включения модуляции пламя после небольшого нестационарного участка распространяется с постоянной, но большей средней скоростью. Отношения скорости пламени при наличии модуляций (v_f) к скорости пламени без модуляций (v_f^0), полученные при разных амплитудах колебаний пламени, приведены на рис. 7. Все эксперименты проводились при расходе воздуха 12.2 см³/с. Глубина жидкости от опыта к опыту менялась в диапазоне $l = 3.7 \div 3.2$ мм, комнатная температура, а значит, и температура жидкости изменялась от опыта к опыту в диапазоне $T = 19.8 \div 21.8$ °С. Так как скорости пламени при воздействии звуком и без него измерялись в одном опыте и затем находилось их отношение, то можно рассчитывать, что полученные таким образом данные будут не сильно зависеть от температуры. Видно, что средняя скорость пламени возрастает при наличии модуляции (почти в 1.8 раза). Скорости пламени при наличии модуляции и без нее при разных средних скоростях потока газа приведены на рис. 8. При получении этих данных на динамик подавалось одинаковое напряжение. Глубина жидкости варьировалась в опытах от 2.5 до 3.3 мм. Амплитуда колебаний пламени менялась от 18 до 19.6 мм. Разброс в амплитудах колебаний обусловлен прежде всего ее зависимостью (при прочих равных условиях) от глуби-

ны жидкости. Комнатная температура в опытах изменялась в пределах $21.7 \div 20.5$ °С. Видно, что с увеличением расхода разница между скоростями уменьшается.

Наблюдается некоторое различие средних скоростей перемещения пламени в отсутствие модуляции потока, приведенных на рис. 5, 8 и на рис. 6 в работе [7]. Можно назвать, по крайней мере, две причины такого различия. Во-первых, средняя скорость сильно чувствительна к температуре [7]. В настоящей работе температура отличалась от той, что была в [7], и изменялась в большем диапазоне, что естественно привело к большему разбросу средних скоростей. Во-вторых, в настоящей работе глубина жидкости, как правило, была больше, чем в работе [7]. И хотя согласно [7] средняя скорость пламени слабо зависит от глубины жидкости, тем не менее эта зависимость существует и может усиливаться с увеличением глубины жидкости.

Для равномерного распространения пламени над поверхностью жидкости необходимо, чтобы синхронно с пламенем по жидкости распространялась тепловая волна. При этом концентрация паров жидкости перед фронтом должна обеспечивать нужную нормальную скорость. Если такая ситуация невозможна, то невозможно и равномерное распространение пламени, что наблюдается при пульсационном режиме. Характерная частота колебаний при пульсационном режиме определяется характерными временами передачи тепла по жидкости, перемешиванием паров с воздухом, т. е. характерными временами процессов, которые происходят при распространении пламени. Если скорость набегающего потока модулировать с частотой, большей собственной частоты колебаний пламени, то процессы в жидкости не будут успевать за перемещением пламени. Если же частота модуляций скорости набегающего потока близка к собственной частоте колебаний пламени, то ситуация кардинально изменяется. Этим, по всей видимости, и объясняется существенное различие в реакции пламени на модуляцию встречного потока с разными частотами.

ВЫВОДЫ

При пульсационном распространении пламени над «мелкой» жидкостью в условиях на-

бегающего потока существует характерная частота колебаний пламени. Модуляция скорости набегающего на пламя газа оказывает сильное влияние на скорость пламени. Если частота модуляции больше собственной характерной частоты колебаний пламени, то при значительных амплитудах модуляции пламя гаснет. При меньших амплитудах скорость сразу после включения модуляции возрастает, затем падает и достигает значения, близкого к наблюдаемому в отсутствие модуляции. Если частота модуляции близка к характерной собственной частоте колебаний пламени, то после включения модуляции пламя распространяется с постоянной, но большей средней скоростью. С увеличением амплитуды модуляции скорости набегающего на пламя газа при прочих равных условиях скорость пламени растет, пока не происходит гашение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ross H. D., Miller F. J.** Detailed experiments of flame spread across deep butanol pools // Twenty-Sixth Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst., 1996. P. 1327–1334.
2. **Garcia-Ybarra P. L., Castillo J. L., Antoranz J. C., Sankovitch V., San Martin J.** Study of the thermocapillary layer preceding slow, steadily spreading flames over liquid fuels // *Ibid.* P. 1469–1475.
3. **Schiller D. N., Sirignano W. A.** Opposed-flow flame spread across *n*-propanol pools // *Proc. of the Combustion Inst.* 1996. V. 26. P. 1319–1325.
4. **Schiller D. N., Ross H. D., Sirignano W. A.** Computational analysis of flame spread across alcohol pools // *Combust. Sci. Technol.* 1996. V. 118. P. 203–255.
5. **Kozue Takahashi, Akihiko Ito, Yuji Kudo, Tadashi Konishi, Kozo Saito.** Scaling and instability analyses on flame spread over liquids // *Proc. of the Combustion Inst.* 2005. V. 30. P. 2271–2277.
6. **Takahashi K., Kodaira Y., Kudo Y., Ito A., Saito K.** Effect of oxygen on flame spread over liquids // *Proc. of the Combustion Inst.* 2007. V. 31. P. 2625–2631.
7. **Замашиков В. В.** Распространение пламени над поверхностью жидкости в канале ограниченного сечения в условиях набегающего потока воздуха // *Физика горения и взрыва.* 2008. Т. 44, № 1. С. 29–34.
8. **Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник /** Под ред. А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко. М.: Химия, 1990. Кн. 1. С. 193.

9. **Лазерная** анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия: Справочник /

В. П. Клочков, Л. Ф. Козлов, И. В. Потыкевич, М. С. Соскин. Киев: Наук. думка, 1985. С. 224–227.

Поступила в редакцию 3/XII 2007 г.
