

ся с экспериментальными данными работы [9] (штриховые кривые на рис. 5). Распределение скорости, температуры и концентраций внутри пограничного слоя изображено на рис. 6. Для сравнения штриховой кривой в соответствующих безразмерных переменных изображен профиль температур по экспериментальным данным [9].

Таким образом, в работе предложен метод исследования горения материалов в ламинарном диффузионном пламени, определено влияние массообмена на распределение скоростей, температур, напряжений трения и других параметров пограничного слоя, найдена зависимость скорости выгорания материала от длины зоны горения, определено влияние внешних параметров задачи на форму диффузионного пламени и распределение параметров в пограничном слое.

Поступила в редакцию 13/IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Грин.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
2. Г. Максен, К. Вулдридж, Р. Маззи.— В сб.: Гетерогенное горение. М.: Мир, 1967.
3. Р. Маззи. РТК. 1963. 9.
4. Ю. А. Кустов, С. С. Рыбанин. ФГВ. 1970. 6. 1.
5. В. Ф. Плешаков, И. А. Щепатьев, Б. А. Иванов. ФГВ, 1976, 12, 1.
6. У. Х. Дорренс. Гиперзвуковые течения вязкого газа. М.: Мир, 1966.
7. К. W. Ragland. AIAA J., 1970, 7, 3.
8. Н. И. Зверев, И. Н. Смирнов. Вестн. МГУ. Мат. мех., 1981, 3.
9. Toshisuke Hirano, Mitsuo Kinoshita. 15-th Symp. (Intern.) on Combust. Tokyo, 1974.
10. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М.: Наука, 1965.
11. Л. Лиз.— В сб.: Газодинамика и теплообмен. М.: ИЛ, 1962.

О РЕЖИМАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В АЭРОВЗВЕСЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

*В. Г. Шевчук, Е. Н. Кондратьев, А. Н. Золотко, В. В. Смирнов
(Одесса)*

Сжигание газовзвесей частиц твердых горючих может быть реализовано либо в процессе объемного горения, когда взвесь воспламеняется и сгорает одновременно во всем объеме (тепловой взрыв), либо в процессе волнового горения, подразумевающего существование сформировавшегося фронта пламени, распространяющегося с определенной скоростью от локального источника зажигания. Теоретические основы процесса объемного реагирования газовзвесей частиц с различными законами окисления, а также обширные экспериментальные исследования изложены в работах [1—8].

В то же время вопросы волнового горения, несмотря на многообразие возможных режимов и их практическую значимость, освещены недостаточно. Теоретические [9—13] и экспериментальные [14—15] исследования посвящены в основном ламинарному режиму распространения пламени и выявляют ведущий механизм передачи тепла во взвеси.

Аналогично газовым горючим смесям, по степени воздействия продуктов сгорания режимы распространения пламени в газовзвесах могут быть разделены на два класса: а) режимы, возникающие при свободном оттоке продуктов сгорания (ламинарный [14, 16] и вибрационный [14]), имеющие место при распространении пламени в полукрытых трубах при поджигании взвеси у открытого конца трубы; б) режимы, реализующиеся в случае газодинамического влияния продуктов сгорания на фронт пламени. Исходя из общих соображений, ко второму классу можно отнести режим распространения пламени по движущейся перед фронтом

пламени (вследствие теплового расширения продуктов сгорания) исходной взвеси и турбулентный. В настоящей работе не будет рассматриваться детонация в газодисперсных системах. Указанные выше режимы могут наблюдаться в свободных и замкнутых объемах взвеси и в трубах при поджигании у закрытого конца трубы.

Влияние газодинамических факторов на скорость и характер распространения пламени в аэровзвесах частиц различных твердых горючих отмечается в [14, 17, 18]. Однако систематические исследования второго класса режимов распространения пламени в газозвзвесах не предпринимались.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов, в которых рассматривалось влияние параметров аэровзвеси и условий проведения опытов на качественные особенности и характерные уровни скоростей распространения пламени в аэровзвесах частиц алюминия (АСД-1, ПА-4), магния (фракционированного, размер частиц 35 мкм) и алюмомагниевого сплава (ПАМ-4).

Распространение пламени в вертикальных трубах

Опыты проводились на вертикальной, открытой внизу, стеклянной трубе длиной 3,5 и диаметром 0,056 м. Методика создания аэровзвеси и контроля ее параметров подробно изложена в [16]. Взвесь поджигалась электрической искрой, образующейся при разрядке конденсаторной батареи емкостью 1 мкФ, заряженной до напряжения 4 кВ. Электроды устанавливались в центре трубы таким образом, чтобы искровой промежуток, равный 1 мм, находился на оси трубы. «Центральный» способ зажигания взвеси позволяет одновременно исследовать пламя, распространяющееся вверх к закрытому концу трубы при оттоке продуктов сгорания от фронта пламени и вниз, когда движение расширяющихся продуктов направлено в сторону движения фронта. Скорость распространения пламени измерялась с помощью фотодиодов, расположенных вдоль трубы на расстоянии 0,2 м друг от друга, сигнал от которых регистрировался шлейфовым осциллографом. В опытах измерялась скорость пламени в зависимости от положения фронта горения.

Общая особенность распространения пламени для всех исследованных аэровзвесей состоит в одновременном распространении пламени вверх (с невысокой постоянной относительно стенок трубы скоростью) и вниз (с визуальной мгновенной скоростью распространения). Результаты опытов по распространению пламени вверх представлены на рис. 1 в виде зависимости скорости от массовой концентрации горючего. В этом случае имеет место ламинарный режим распространения пламени; характер растущей зависимости скорости от концентрации согласуется с теоретическими представлениями [9, 11].

Данные по распространению пламени вниз к открытому концу трубы представлены на рис. 2 в виде зависимости скорости от положения фронта пламени относительно места поджигания (l — координата, направленная вдоль трубы). Различные кривые на каждом рисунке характеризуют серию опытов, полученных в одинаковых для каждого типа взвесей условиях. В сравнении с рассмотренным выше ламинарным режимом со свободным оттоком продуктов сгорания процесс характеризуется рядом существенных особенностей. Общая для всех приведенных зависимостей особенность состоит в относительно высоких значениях

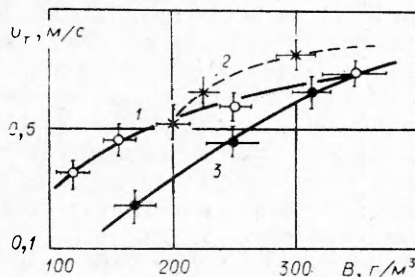


Рис. 1. Зависимость скорости пламени v от концентрации частиц B .

1 — ПАМ-4; 2 — АСД-1; 3 — ПА-4.

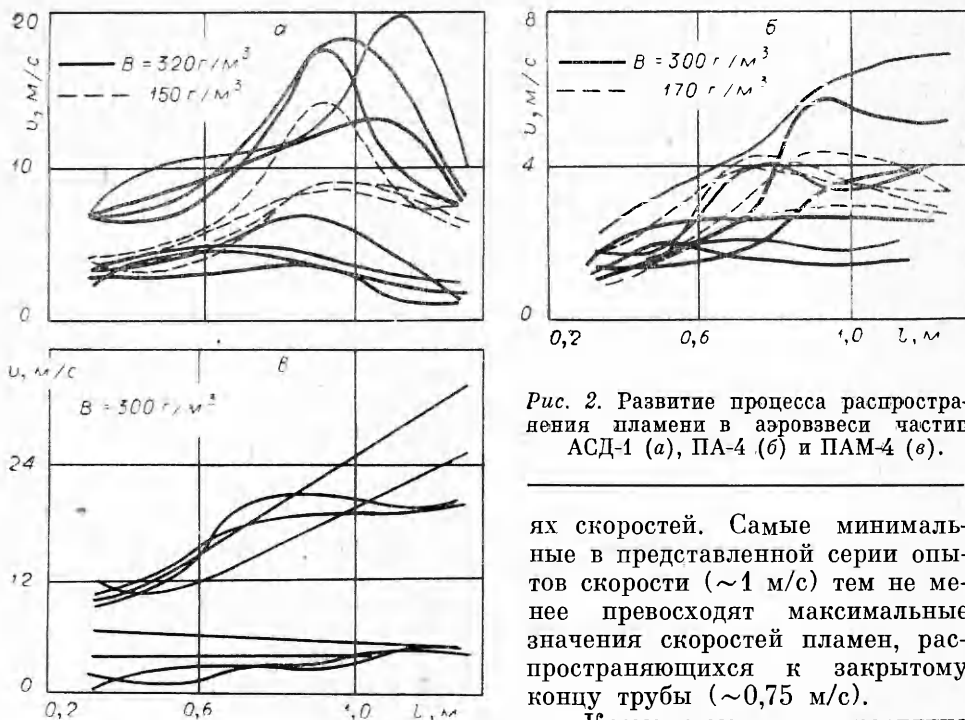


Рис. 2. Развитие процесса распространения пламени в аэровзвеси частиц АСД-1 (а), ПА-4 (б) и ПАМ-4 (в).

ях скоростей. Самые минимальные в представленной серии опытов скорости (~ 1 м/с) тем не менее превосходят максимальные значения скоростей пламен, распространяющихся к закрытому концу трубы ($\sim 0,75$ м/с).

Кроме отмеченного различия в величине скорости, существенно отличие в самом характере распространения пламени вниз. Как видно из рис. 2, при достаточно высоких концентрациях в ряде опытов наблюдалось нестационарное, ускоренное на определенном участке трубы движение видимого фронта пламени. Например, в проведенной серии опытов в одних и тех же условиях для газозвеси частиц алюминия АСД-1 при концентрации 320 г/м^3 отмечалось появление либо «медленного», со слабо меняющейся скоростью, либо «быстрого» ускоренного распространения пламени (см. рис. 2, а). Отметим, что при $B = 150 \text{ г/м}^3$ и прочих равных условиях проведения опыта подобный двойственный характер распространения пламени отсутствует. Этот факт кроме экспериментального доказательства срыва стационарности, возможно, указывает на существование концентрационного предела реализации «быстрого» режима. Подчеркнем вероятностный характер появления «быстрого» режима: с увеличением концентрации горючего вероятность его реализации растет.

Интересной особенностью является существование сохраняющейся по всей длине трубы разницы между значениями скоростей «быстрого» и «медленного» режимов. Эта особенность отражает факт существования начальной стадии формирования неустойчивости, приводящей к срыву «медленного» режима распространения пламени. Протяженность этой стадии зависит от конкретных свойств взвеси и определяется достижением в условиях опытов определенного значения скорости. Так, в газозвеси частиц АСД-1 сформировавшийся зазор по скоростям виден на расстоянии 20 см от места поджигания. Причем достижение скорости ~ 6 м/с на этой стадии оказывается достаточным для реализации в последующем (на базе 1 м) ускоренного распространения пламени. Однако сравнительно низкие начальные скорости в той же области оказываются недостаточными для перехода в «быстрый» режим.

Видимо, малая по протяженности область формирования неустойчивости в газозвесах мелкодисперсного алюминия побудила авторов [14] высказать предположение о возмущающей роли поджигания. Однако изменение емкости искрового разрядника (в диапазоне 1–10 мкФ) не приводило к качественному изменению характера процесса в аэровзвесах

АСД-1. Кроме того, опыты, проведенные в газовзвесах частиц алюминия ПА-4, относительно крупнодисперсного порошка, также свидетельствуют о том, что влияние поджигания не может быть единственной причиной возмущения. Как видно из рис. 2, б, характер изменения скорости при увеличении концентрации до 300 г/м^3 остается весьма сложным на всем протяжении трубы и лишь в конечной области распространения пламени появляются признаки определившихся режимов. Характерный уровень достигаемых при этом скоростей 6 и 2 м/с, т. е. в данном случае зона формирования неустойчивости оказывается затянутой по сравнению с газовзвесью частиц АСД-1. Это говорит о том, что решающую роль в развитии неустойчивости играет газодинамическое влияние продуктов сгорания на течение фронта пламени.

По достижении вполне определенного в условиях опытов значения скорости, равного для газовзвесей АСД-1, ПАМ-4 и магния 6, 8 и 10 м/с соответственно, ускоренный характер распространения пламени становится явно выраженным.

Несколько неожиданным оказалось сильное влияние граничных условий, связанных с концом трубы, приводящее к уменьшению скорости и стабилизации ее значения. Почти на всех приведенных зависимостях, за исключением наиболее быстрогорящих взвесей частиц магния размером 7 мкм и сплава ПАМ-4, наблюдалось уменьшение скорости как в «быстром», так и в «медленном» режимах распространения пламени. Следует также отметить, что стабилизация скорости на выходе связана также с реакционной способностью горючего порошка: для порошка ПАМ-4 это явление менее выражено, а для мелкодисперсного магния оно отсутствует.

Обратимся к обсуждению полученных результатов. Для «быстрого» режима распространения пламени, реализующегося в случае газодинамического влияния расширяющихся продуктов сгорания, специфично наличие трех характерных участков, в той или иной мере проявляющихся для аэровзвесей различных порошков горючих: начальной области формирования неустойчивости, обуславливающей появление пороговых скоростей; области последующего нестационарного распространения пламени; области стабилизации скорости вблизи конца трубы. Анализ указанных особенностей распространения пламени в аэровзвесах связан с общей проблемой устойчивости ламинарного распространения пламени.

Применительно к аэровзвесям частиц горючих этот вопрос тесно связан с влиянием физико-химических параметров взвеси (состав взвеси, дисперсность горючего) и конкретных условий опытов (длина и диаметр трубы, мощность поджигания, наличие турбулизующих элементов и т. д.) на процесс распространения пламени. Естественно, что в рамках одной работы, учитывая современное теоретическое состояние проблемы, невозможно ответить на весь комплекс затронутых вопросов. Вместе с тем, основываясь на результатах проведенных экспериментов, можно высказать ряд соображений относительно причин наблюдаемых закономерностей.

Очевидно, в зависимости от физико-химических параметров аэровзвеси указанные пороговые значения скорости достаточны для генерации собственных масштабных возмущений в каждой из рассмотренных взвесей. Различия как в самом уровне пороговых скоростей, так и в последующем характере ускорения, вероятнее всего, могут быть связаны с развитием мелкомасштабных возмущений. Действительно, размер крупномасштабных возмущений соизмерим с геометрическими параметрами системы и слабо зависит от физико-химических свойств взвеси. Размеры мелкомасштабных возмущений, в отличие от газовых систем, зависят от дисперсных характеристик. Если в газах минимальные размеры вихрей l_u определяются диссипацией энергии за счет молекулярного трения [19]

$$l_u^2 = 2\sigma_u^2 \left| \left(\frac{\partial u'}{\partial \delta} \right)_{\delta \rightarrow 0} \right|^{-2},$$

где σ_u^2 — интенсивность турбулентности; $\left(\frac{\partial u'}{\partial \delta} \right)^2$ характеризует диссипа-

цию энергии, то в газовзвесах достижению такого масштаба препятствует наличие твердофазных включений в виде частиц горючего и конденсированных продуктов сгорания. Последнее обстоятельство существенно усложняет анализ развития турбулентности в газовзвесах.

Порядок значений скорости и сам ускоряющийся характер пламени не может быть объяснен эффектом простого гидродинамического увлечения фронта пламени течением расширяющихся продуктов сгорания, поскольку максимально достигаемые скорости пламени в режиме со свободным оттоком продуктов сгорания v_r оказываются много меньше наблюдаемых в «быстром» режиме значений v и пересчитанных по формуле $v^* = v/\epsilon$, где $\epsilon = T_r/T_0$ — степень расширения газового компонента, меняющаяся в зависимости от концентрации металла в диапазоне $\sim 6-10$; T_r — адиабатическая температура сгорания; T_0 — начальная температура взвеси. Таким образом, ускорение пламени может быть объяснено развитием турбулентности в результате воздействия возмущений, вносимых расширяющимися продуктами сгорания.

Более сложно интерпретировать наблюдаемое уменьшение скорости вблизи конца трубы. В настоящее время можно только указать возможные причины этого явления. Если предположить, что энергия от крупных энергосодержащих вихрей (масштаба L) передается к самым мелким (масштаба l) без потерь, то по аналогии с газовыми системами методом размерного анализа [20] нетрудно показать, что среднее значение скорости турбулентного течения $\bar{u} = L/l^2 \tilde{v}$, где \tilde{v} — осредненный параметр, играющий роль вязкости в газодисперсной среде. Как видно из этого соотношения, на скорость может влиять как уменьшение размеров крупных вихрей, так и увеличение размера самых мелких вихрей.

При равновероятном подавлении вихрей разных масштабов сильнее (ввиду квадратичной зависимости) должно было бы сказаться подавление мелкомасштабных возмущений. Однако такой механизм гашения скорости трудно связать с относительно большим расстоянием от конца трубы ($\sim 0,5$ м), на котором становится заметным спад скорости. Видимо, более предпочтительным следует считать предположение о преимущественном подавлении крупномасштабных возмущений, обусловленном, например, выносом их из реакционной трубы. В частности, возможной причиной подавления крупномасштабных возмущений может также быть рециркуляция потока на выходе из трубы. Следует обратить внимание на иную возможность гашения скорости [21], когда турбулентное движение может перейти в ламинарное до полного выгорания смеси вследствие обмена энергией между турбулентным движением и ускоренным осредненным потоком газа.

Распространение сферически симметричного пламени

Известно [22], что в газовых горючих смесях сферический фронт горения более устойчив к воздействию вносимых возмущений по сравнению с пламенами, распространяющимися в цилиндрических каналах. Интересно в этой связи проверить устойчивость ламинарной структуры течения сферического фронта пламени в газовзвесах.

Другим важным вопросом, связанным с проблемой определения нормальной скорости пламени в газовзвеси, является выяснение влияния степени расширения продуктов сгорания на видимые значения скорости и проведение на этой основе сопоставления со скоростями распространения пламени в трубах [16].

Опыты проводились в камере постоянного давления, представляющей собой тонкостенный резиновый зонд объемом 5 л с импульсным способом создания облака взвеси [23]. Электроды поджигания располагались в центре зонда. В опытах использовался фракционный сферический магний со средним размером частиц 7 и 35 мкм. Процесс распространения пламени регистрировался скоростной кинокамерой. Измерялась зависимость скорости пламени от положения его фронта и концентрации горючего.

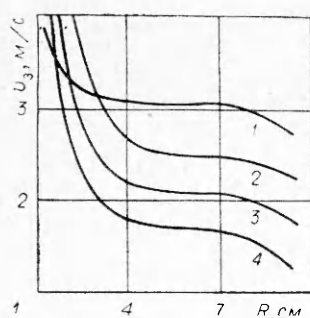


Рис. 3. Распространение пламени в аэровзвесьях частиц магния в зондах. 1 — $d=7$ мкм; 2—4 — $d=35$ мкм. B , г/м³: 1, 3 — 200, 2 — 300, 4 — 100.

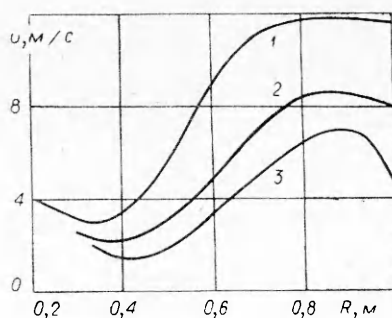


Рис. 4. Распространение пламени в облаке частиц алюминия. B , г/м³: 1 — 350, 2 — 180, 3 — 130.

В покадровом разрешении распространение пламени имело ясно выраженный пульсационный характер. Для выяснения природы этих пульсаций проводилась дополнительная обработка кинограмм методом сглаживания пульсаций (при скорости протяжки пленки 1000 кадр/с для сглаживания пульсаций оказалось достаточным проводить усреднение по 10 кадрам). Характерный пространственный масштаб видимых нерегулярностей оказался равным 1,5—2 мм и сопоставим с шириной горения (зоны). Это позволяет сделать вывод, что отмеченный пульсационный характер связан с локальными флуктуациями твердого компонента. Усредненные таким образом значения скорости представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, характерной чертой процесса является наличие плато на зависимости скорости пламени от координаты фронта горения. Характер распространения пламени на этом участке устойчивый, а фронт пламени сохраняет ламинарную структуру (если пренебречь детальными эффектами, обнаруженными в покадровом разрешении). Спад скорости за областью плато вызван возрастающей упругостью стенок зонда в момент, предшествующий его разрыву. Регистрация давления внутри зонда показала, что на участке, соответствующем плато в значениях скорости, давление остается постоянным.

Таким образом, проведенные опыты показывают, что течение продуктов сгорания в изобарических условиях зонда не оказывают возмущающего действия на структуру пламени. Однако порядок значений видимых скоростей пламени оказывается значительно выше таковых в условиях организации процесса со свободным оттоком продуктов сгорания [16]. Отмеченное отличие обусловлено простым гидродинамическим увлечением пламени расширяющимися продуктами сгорания в случае сферических пламен.

Для выяснения степени влияния расширяющихся продуктов сгорания на видимые значения скорости пламени проведем оценку их нормальных значений, реализующихся в зондах и трубах в режиме свободного оттока.

d , мкм	B , г/м ³	$v_{т.н}$, м/с	v_z , м/с	$v_{з.н}$, м/с
	100	0,25	1,76	0,21
	200	0,27	2,1	0,24
35	250	0,3	2,2	0,25
	300	0,35	2,5	0,28

Нормальные значения скорости в зондах $v_{з.н}$ получены пересчетом видимой скорости в области плато по формуле $v_{з.н}/\epsilon$, где ϵ — степень расширения при адиабатической температуре сгорания (по условиям симметрии пламя в данных условиях всегда распространяется по нормали к исходной взвеси); $v_{т.н}$ — нормальные значения скорости в трубах [16], определяемые как видимые значения скорости, деленные на отношение поверхности пламени к площади его основания (в условиях опытов [16] указанный коэффициент трансформации равен приблизительно 2).

Сравнение полученных результатов показывает соизмеримость определяемых таким образом нормальных скоростей. Некоторое количественное отличие можно объяснить как погрешностями в определении коэффициента трансформации поверхностями пламени в трубах, так и неполным увлечением частиц расширяющимися продуктами сгорания. В пользу последнего говорит также аналогичное сопоставление для частиц размером 7 мкм. Например, при $B = 200 \text{ г/м}^3$ $v_{т.н} = 0,37 \text{ м/с}$, $v_{з.н} = 0,35 \text{ м/с}$. Однако для мелкодисперсного магния более полное сопоставление затруднено, поскольку процесс распространения в трубах в этом случае носит вибрационный характер, поэтому в качестве $v_{т.н}$ выбрано усредненное значение за время, значительно превышающее период вибраций.

Проведенный анализ нормальных значений скорости пламени подтверждает вывод о невозмущающем влиянии расширяющихся продуктов сгорания на течение фронта пламени в случае сферически симметричных пламен. Заметим, что аналогичная корреляция между значениями видимой скорости в режиме свободного оттока продуктов (см. рис. 1) и для «медленного» режима в случае влияния расширяющихся продуктов сгорания (см. рис. 2) наблюдается при распространении пламени в трубах для аэровзвесей других металлов.

В заключение рассмотрим влияние размера пылевого облака на характер распространения пламени. На рис. 4 представлены результаты экспериментов с облаками аэровзвесей частиц алюминия размером $\sim 1 \text{ м}$. Как и в случае малообъемных аэровзвесей, фронт пламени сохраняет ламинарную структуру (с точностью до нерегулярных пульсаций, обусловленных флуктуациями концентрации). Процесс носит нестационарный характер: в начальной стадии скорость пламени уменьшается, выходя на значения, соответствующие «медленному» режиму, а затем возрастает по мере увеличения радиуса фронта пламени. Последующий спад скорости вызван уменьшением концентрации горючего вблизи границы облака.

Одной из причин отмеченной тенденции возрастания скорости может являться возрастающий по мере увеличения горящего очага вклад радиационной составляющей теплового потока в прогрев предпламенной зоны.

Авторы выражают благодарность Н. Д. Агееву и А. В. Афанасьеву за помощь в проведении эксперимента, а также Л. А. Клячко и С. Н. Буйновскому за полезное обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию 21/V 1981, после доработки — 2/XI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Клячко. Теплоэнергетика, 1966, 8, 65.
2. Б. И. Хайкин, В. Н.Bloшенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 5, 4, 474.
3. М. А. Гуревич, Г. С. Озерова, А. М. Степанов. ФГВ, 1974, 7, 4, 518.
4. В. Б. Либрович, В. И. Лисицын, Б. И. Хайкин. ПМТФ, 1974, 1, 75.
5. А. Н. Золотко, Л. А. Клячко и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 38.
6. Е. В. Черненко, В. И. Розенбад. ФГВ, 1980, 16, 6, 3.
7. Н. М. Cassel, I. Liebman. Comb. Flame, 1963, 7, 1.
8. Ю. А. Юрманов, А. Б. Рыжик и др.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
9. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин. Докл. АН СССР, 1974, 201, 1.
10. О. М. Тодес, А. Д. Гольдiker и др.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
11. В. Г. Шевчук, Е. Н. Кондратьев и др. ФГВ, 15, 6, 1979, 41.
12. П. Б. Вайнштейн, Р. И. Нигматулин. ПМТФ, 1974, 4, 19.
13. Г. Е. Озерова, А. М. Степанов. ФГВ, 1979, 15, 2, 66.
14. Н. М. Cassel, A. K. Das Gupta, S. Guruswamy. Third Symp. on Combustion and Flame and Explosion. Baltimore, Md. 1949.
15. О. М. Тодес, А. Д. Гольдiker, К. К. Ионушас. ФГВ, 1974, 10, 1, 83.
16. В. Г. Шевчук, С. В. Горшин и др. ФГВ, 1980, 16, 1, 57.
17. К. К. Ионушас, Н. М. Проничева и др. ФГВ, 1979, 15, 5, 53.
18. В. Н. Брызна, И. В. Бабайцев, С. Т. Панаев. ФГВ, 1979, 15, 1, 117.
19. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1954.
20. М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978.
21. В. В. Либрович, В. И. Лисицын.— В сб.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
22. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович. Докл. АН СССР, 1966, 168, 1, 43.
23. Е. Н. Кондратьев, С. В. Горшин, В. Г. Шевчук.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 20, Киев — Одесса: Вища школа, 1980.