

УДК 536.46+662.611/.612

Наука о горении и проблемы современной энергетики

С. М. Фролов

СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ ФРОЛОВ — доктор физико-математических наук, заведующий отделом горения и взрыва Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, профессор Московского инженерно-физического института (МИФИ ГУ). Область научных интересов: макрокинетика, турбулентность, воспламенение, горение, детонация, газовая динамика реагирующих течений.

119991 Москва, ул. Косыгина, 4, ИХФ РАН, тел. (495)939-72-28, факс (495)651-21-91,
E-mail smfrol@chph.ras.ru

Введение

Одна из важнейших фундаментальных проблем современной физики горения и взрыва, имеющих непосредственное отношение к теплоэнергетике, — управление горением газообразных, жидких и твердых горючих и обеспечение максимально высокой полноты и термодинамической эффективности сгорания при минимально низком выходе вредных веществ (прежде всего, оксидов азота и углерода, а также сажи).

Горение — неравновесное физико-химическое явление, в основе которого лежат процессы окисления в условиях, осложненных процессами массо- и теплообмена — молекулярного и турбулентного переноса вещества и энергии, тепловыделением и конвективными течениями. Вследствие высоких температур при горении развиваются различные сопутствующие процессы: электродинамические, включая излучение, а также физико-химические процессы взаимодействия продуктов горения с поверхностью. Вследствие сильной температурной чувствительности химических превращений это сложное явление имеет концентрационные пределы, вне которых автономное существование горения в потоке невозможно. В окрестности пределов горение становится неустойчивым, причем начинают проявляться неустойчивости, вызванные разными факторами и механизмами, включая гидродинамические, акустические, термоакустические, диффузионно-тепловые и другие.

Парадокс заключается в том, что одно из наиболее перспективных решений указанной выше фундаментальной проблемы относится к гомогенному горению на бедном пределе, то есть к горению смесей с концентрацией газообразного горючего, значительно меньше стехиометрической, которые в обычных условиях горят неустойчиво. При успешном решении проблемы стабилизации горения на пределе можно ожидать и высокой полноты сгорания (вследствие большого избытка окис-

лителя), и ультранизкого выхода вредных веществ (ввиду низкой температуры горения). Подчеркнем, что речь идет именно о гомогенном горении предварительно подготовленной смеси горючего с воздухом. При использовании жидких и твердых горючих такая перспектива подразумевает необходимость их предварительной газификации.

Другое перспективное решение — использование быстрых режимов горения, а именно, детонации. Детонация — это сверхзвуковой самоподдерживающийся режим распространения горения, в котором химические реакции окисления газообразного, жидкого или твердого горючего инициируются сильной ударной волной и протекают за очень короткое время (микросекунды). Термодинамически это самый эффективный способ прямого сжигания горючего.

Именно поэтому в настоящее время активно развиваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в энергетических установках и технологических горелках. Горючее предлагают сжигать в циклическом режиме в бегущих детонационных волнах. При успешном решении проблемы циклической детонации воздушных смесей обычных топлив (природный или попутный газ, угольные частицы, мазут и др.) можно ожидать значительной экономии горючего вследствие более высокой термодинамической эффективности детонационного горения и низкого выхода вредных веществ (ввиду очень малой продолжительности детонационного цикла).

Ниже приведено несколько примеров, иллюстрирующих последние достижения в области управления горением и детонацией.

Беспламенное горение

Один из способов надежно стабилизировать горение на бедном концентрационном пределе — организация

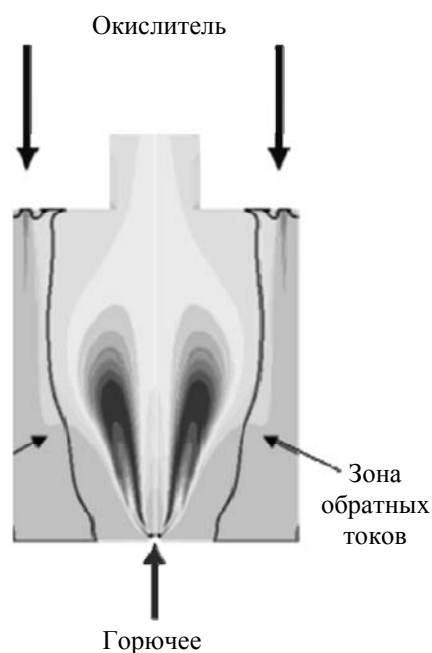


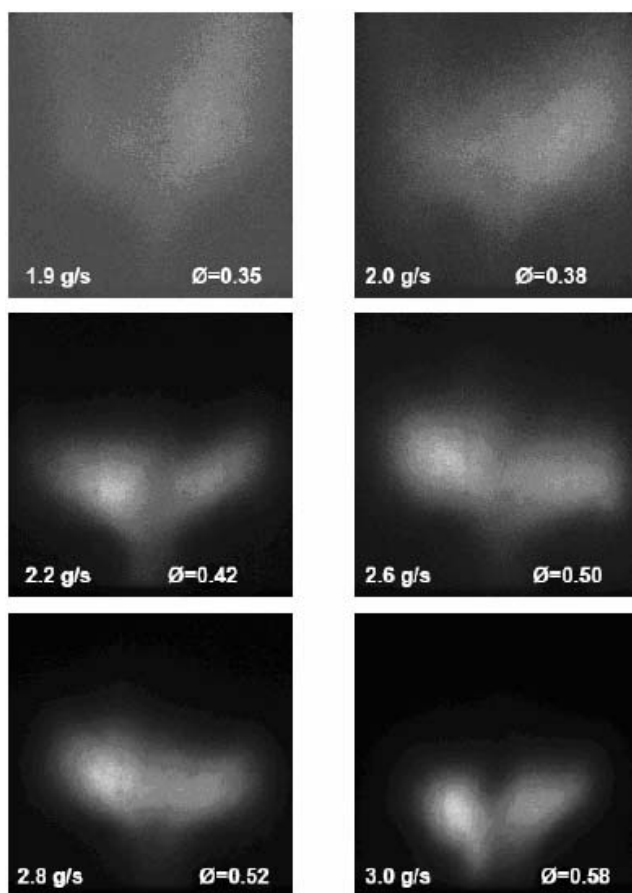
Рис. 1. Схема организации беспламенного горения [2]

беспламенного горения [1]. беспламенным горением называют распределенное (объемное) горение топлива, при котором в видимом диапазоне не наблюдается привычного свечения пламени. Для организации такого горения топливо и окислитель подают в камеру сгорания таким образом, чтобы обеспечить очень быстрое смешение компонентов до начала горения (рис. 1 [2]). Другими словами, смешение компонентов должно произойти в течение периода индукции самовоспламенения так, что после самовоспламенения горючее окисляется в кинетически лимитированном режиме со скоростью, определяемой локальной температурой и концентрацией компонентов. Для снижения скорости реакции предлагают использовать рециркуляцию продуктов горения — предварительное смешение с продуктами горения либо горючего (снижение концентрации горючего), либо воздуха (снижение концентрации кислорода), либо подготовленной смеси горючего с воздухом (снижение концентраций обоих компонентов). При этом степень рециркуляции продуктов горения определяет и температуру смеси, и концентрацию в ней горючего и/или кислорода. Разумеется, чем лучше смешение продуктов сгорания с горючим и/или окислителем, тем однороднее горение в камере и меньше вероятность образования локальных очагов высокотемпературного пламени. Для такого режима характерны высокая полнота сгорания, широкие концентрационные пределы и низкая температура горения, малый выход оксидов азота и CO , а также значительное снижение выхода CO_2 , что очень привлекательно для энергетических приложений (прежде всего в технологических горелках [3] и газовых турбинах [4]). Кроме того, режим беспламенного горения пригоден

для сжигания низкокалорийных топлив и горючих отходов.

В качестве примера беспламенного режима горения на рис. 2 представлены результаты экспериментов для пропано-воздушных смесей с разным коэффициентом избытка горючего Φ [2]. В экспериментах температуру воздуха, подаваемого на вход в камеру сгорания (см. рис. 1), повышали путем сжигания некоторого количества пропана. При этом концентрация кислорода в воздухе уменьшалась (при температуре воздуха $800\text{ }^\circ\text{C}$ концентрация кислорода составила $14,3\%$ (об.)). Фотографии хемилюминесценции возбужденного гидроксила, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что в очень бедных смесях ($\Phi = 0,35$ и $0,38$) горение действительно имеет распределенный характер. Измерения концентрации оксидов азота в этих условиях показали, что уровень NO в продуктах горения не превышает 5 частей на миллион.

Для использования беспламенного горения в энергетике необходимо глубокое понимание особенностей протекания химических реакций окисления горючего в смесях с продуктами горения в условиях интенсивной неоднородной турбулентности. В настоящее время в этой области еще остается множество нерешенных проблем.

Рис. 2. Фотографии хемилюминесценции OH^* на длине волны 310 нм в пропано-воздушных смесях с разным коэффициентом избытка горючего Φ [2]

Горение в пористых матрицах

Принцип сжигания топлива в условиях «избыточной энтальпии», а также некоторые схемы практических горелок с внешними теплообменниками впервые предложены еще в начале 1970-х годов [5]. Горение газовой реагирующей смеси в твердом пористом каркасе (матрице) — один из ярких примеров управления горением с помощью «внутреннего» теплообменника. Вследствие высокой теплопроводности каркаса зона прогрева газового пламени формируется под воздействием дополнительных тепловых потоков из прогретого каркаса. Такое воздействие на зону прогрева газового пламени приводит к увеличению скорости горения и расширению концентрационных пределов горения [6, 7]. Как следствие, применение пористой матрицы позволяет сжигать смеси, которые в обычных условиях не горят, а также смеси, сильно обедненные горючим. Кроме теплового воздействия на предпламенную зону предлагают использовать и химическое воздействие путем нанесения каталитического слоя на внутреннюю поверхность пор. Сжигание бедных смесей в каталитических и некаталитических пористых матрицах — один из перспективных методов снижения эмиссии вредных веществ (прежде всего оксидов азота) в стационарных газотурбинных энергетических установках. Другое важное приложение — уничтожение вредных отходов.

В [8] для дальнейшего расширения бедного концентрационного предела горения по сравнению с известными методами предложено подводить дополнительно тепло к пористому каркасу в зоне прогрева стационарного пламени. Подчеркнем, что дополнительное тепло-

вое воздействие осуществляется именно в зоне прогрева пламени, чтобы максимально использовать тепло, поступающее по теплопроводной матрице из продуктов горения. В этом случае для небольшого локального повышения температуры до уровня, при котором начинаются активные предпламенные реакции, требуется минимальная мощность внешнего теплового источника. Дополнительное тепловое воздействие может быть осуществлено с помощью миниатюрных электронагревателей (рис. 3), вставок из электропроводной пористой матрицы или с помощью микроволнового излучения. В [8] на примере горения метано-воздушных смесей теоретически доказано, что при локальном внешнем подогреве значительно расширяется бедный концентрационный предел горения, увеличивается скорость горения и снижается выход NO до ультранизкого уровня (2—3 ppm). Для заметного расширения бедного предела горения метана потребовался внешний подогрев, который по мощности значительно меньше (менее 3—5%) суммарного энерговыделения Θ_{\max} в ламинарном пламени на пределе распространения без подогрева (рис. 4).

На пути практического использования управляемого горения в пористых матрицах еще есть немало нерешенных проблем. Например, до сих пор неясно, какова реальная структура пламени и как протекают химические превращения в газе в условиях очень развитой поверхности матрицы при наличии турбулентных направленных микроструй. Необходимы детальное исследование по оптимизации местоположения внешнего теплового источника в зоне прогрева и по пространственному распределению теплоподвода.

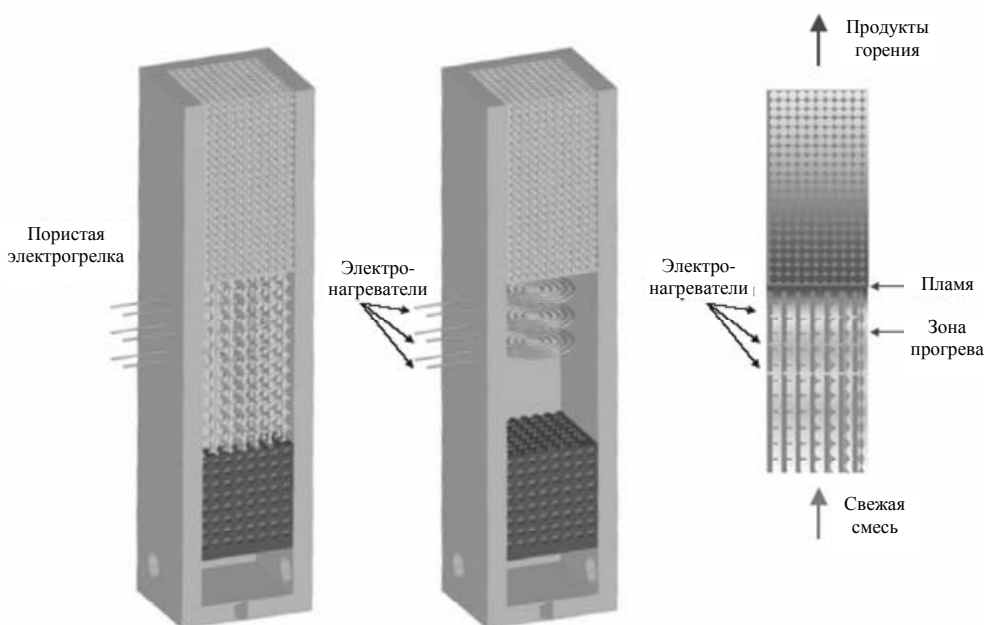


Рис. 3. Схема пористой электрогорелки с дополнительным подводом тепла в зону прогрева пламени с помощью электронагревателей

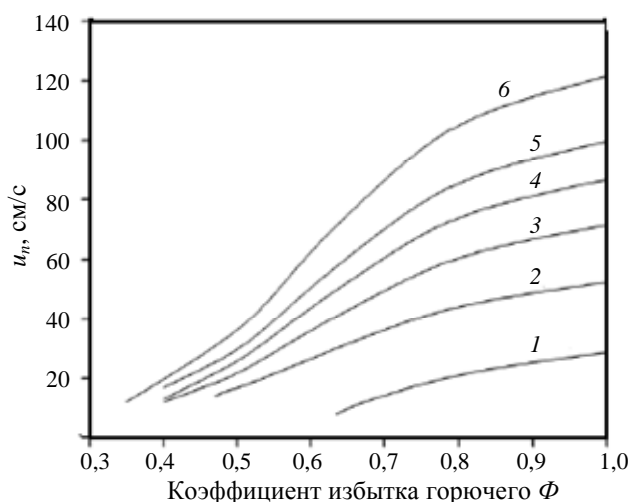


Рис. 4. Зависимость скорости u_n от коэффициента избытка горючего Φ при распространении пламени:

1 — в полой трубке с холодной стенкой (критические условия: $\Phi^* = 0,635$, $u_n = 7,85$ см/с); 2 — в трубке с пористым каркасом без подогрева; 3—6 — в трубке с пористым каркасом и локальным внешним подогревом (3 — $0,01\Theta_{max}$, 4 — $0,02\Theta_{max}$, 5 — $0,03\Theta_{max}$, 6 — $0,05\Theta_{max}$)

Детонационное горение

Вопрос об использовании детонационного горения в энергетике и реактивных двигателях впервые поставлен Я.Б. Зельдовичем еще в 1940 г. [9]. По его оценкам прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД), использующие детонационное сгорание топлива, должны иметь максимально возможную термодинамическую эффективность.

В количественном отношении преимущества детонационного горения особенно наглядны при рассмотрении диаграммы «Коэффициент полезного действия (кпд) — число Маха полета летательного аппарата» (рис. 5а [10]). По сравнению с ПВРД при обычном горении двигатель на детонации в идеале обеспечит топливную экономичность до 30% при числе Маха полета 2,5 и до 20% при числе Маха 3, что позволит значительно увеличить или дальность полета аппарата с таким двигателем, или полезную нагрузку. Другое принципиальное отличие детонационного двигателя от ПВРД на обычном горении — его способность создавать реактивную тягу при низких скоростях полета вплоть до самостоятельного старта без разгонных устройств.

На рис. 5б показана одна из возможных схем организации детонационного цикла на примере сверхзвукового летательного аппарата с диффузором, механическим клапаном, связкой детонационных труб и общего сопла. Трубы периодически заполняются топливно-воздушной смесью. Смесь сгорает в бегущих детонационных волнах, а горячие продукты детонации выбрасываются с высокой скоростью в окружающее пространство через сопло, создавая реактивную тягу. Существуют анало-

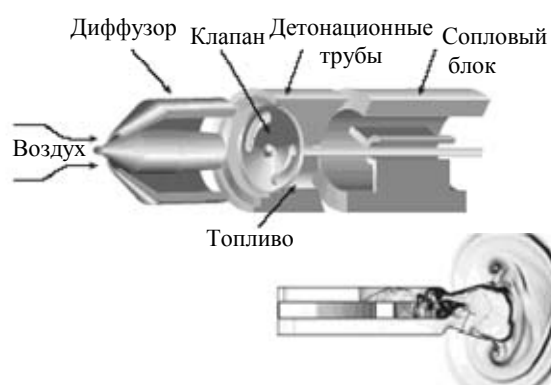
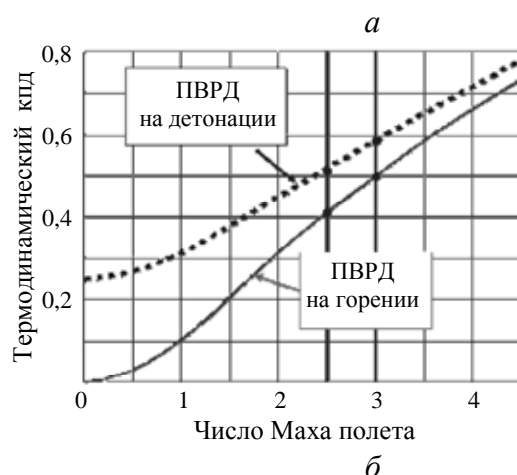


Рис. 5. Преимущества детонационного сжигания топлива (а) и схема импульсного детонационного двигателя для летательного аппарата (б)

гичные схемы организации детонационного цикла без механических клапанов, то есть в конструкции двигателя вообще отсутствуют подвижные элементы. Видно, что конструктивно такой импульсный детонационный двигатель (ИДД) очень прост, а его тягу можно практически неограниченно увеличивать за счет количества детонационных труб. Кроме того, изменяя подачу топлива в трубы, можно управлять вектором тяги без применения поворотных рулей.

Импульсные детонационные двигатели весьма привлекательны и по своим потенциальным тяговым характеристикам: они перекрывают широкий диапазон скоростей полета от 0 до числа Маха 4—5, обеспечивая почти постоянный удельный импульс по топливу на уровне 2000—2500 с при работе на углеводородном горючем. При числе Маха полета выше 3 импульсный детонационный двигатель становится эффективнее не только ПВРД, но и турбореактивного двигателя.

Важно подчеркнуть, что для создания ИДД нет фундаментальных ограничений. Однако есть ограничения эксплуатационные: чтобы успешно конкурировать с существующими аналогами, такой двигатель должен работать на штатном авиационном керосине без активных добавок, использовать минимальную энергию за-

жигания детонации, быть компактным и легким. Именно эти эксплуатационные требования рассматриваются как основной барьер на пути создания практического двигателя.

Дело в том, что для инициирования детонации керосино-воздушной смеси в трубе с помощью известных классических способов требуются либо огромные энергии зажигания, либо очень длинные трубы, что неприемлемо для силовых установок летательных аппаратов [11]. В связи с этим в ИХФ РАН в 2002 г. была поставлена фундаментальная задача — найти новые способы инициирования детонации, которые позволят значительно уменьшить энергию инициирования детонации, сократить длину трубы и время перехода горения в детонацию.

К настоящему времени эта задача успешно решена с помощью целого арсенала новых комбинированных средств инициирования и усиления взрыва [12—19]. Впервые удалось получить периодическую детонацию керосино-воздушной смеси на длине трубы 1,5 м при зажигании обычной автомобильной искрой. Таким образом, энергию зажигания детонации понизили более чем в 10000 раз, одновременно уменьшив длину трубы более чем в 10 раз. Тем самым были созданы предпосылки для начала практических работ по новой системе реактивного движения на импульсном детонационном сжигании керосина.

На основе полученных результатов в ИХФ РАН создан и испытан макет демонстратор рабочего процесса в ИДД. Демонстратор выполнен по двухконтурной схеме: первый контур обеспечивает надежное циклическое инициирование детонации и перепуск детонационной волны в трубу второго контура; в прямой трубе второго контура диаметром 52 мм и общей длиной менее 2 м происходит детонационное сгорание основной массы топлива. На рис. 6 показаны фотографии периодических сверхзвуковых струй продуктов детонации при работе демонстратора. Измерена тяга демонстратора при относительно низких рабочих частотах (до 10 Гц)

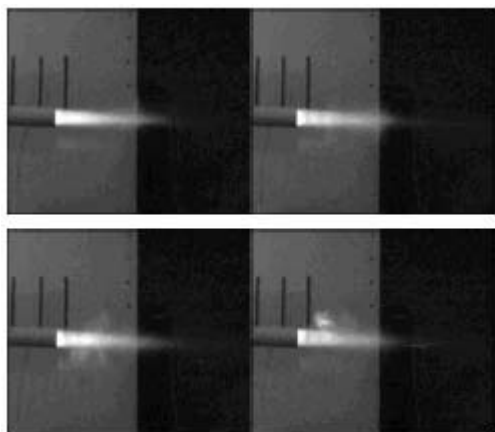


Рис. 6. Фотографии периодических сверхзвуковых струй продуктов детонации при работе демонстратора ИДД

и показано, что тяга линейно зависит от частоты импульсов, как и предсказывает теория. Исходя из этого результата, можно ожидать, что при частоте импульсов до 100 Гц подобная труба обеспечит тягу более чем в 75 кГ, а связка из 10 одинаковых труб обеспечит тягу более чем в 750 кГ. Для работы демонстратора с более высокими частотами группой ученых ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) создано специальное форкамерное зажигающее устройство, обеспечивающее надежное инициирование детонации с частотой до 60 Гц.

Отмеченные выше эксплуатационные требования по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте ИДД относятся, главным образом, к силовым установкам летательных аппаратов. Для стационарных же энергетических установок эти требования не являются определяющими и, следовательно, технологический прорыв в этом направлении следует ожидать в ближайшее время. Наиболее привлекательное направление работ — организация циклической детонации смесей природного газа с воздухом. В настоящее время в ИХФ РАН и МИФИ (ГУ) активно ведутся работы по организации импульсного детонационного сжигания природного газа с использованием новых комбинированных средств инициирования детонации. Успех на этом пути сулит существенную экономию природного газа и позволит значительно повысить эффективность работы энергетического оборудования, в частности, силовых установок газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов. Последнее приложение особенно важно ввиду острой необходимости снижения собственного потребления природного газа газотранспортными компаниями. Разумеется, замена жаровых труб в газотурбинных установках ГПА на детонационные трубы потребует дополнительных вложений (разработка устройств, сглаживающих импульсные ударные нагрузки на элементы турбин, и др.), однако экономический эффект, ожидаемый от новой технологии, несомненно, перекроет все сопутствующие затраты.

Особенности импульсного детонационного горения можно использовать для многих других приложений. Например, в импульсных горелках, совмещающих ударное воздействие с воздействием высокоскоростной струи горячих продуктов детонации. Указанные выше факторы (импульсное ударное и конвективно-тепловое воздействие) будут в перспективе использоваться для дробления и газификации тяжелых фракций нефти и угля, бытовых и промышленных отходов, для дробления горных пород, льда и т.д.

Заключение

Сегодня в связи с бурным развитием измерительной техники и электроники становится реальной возможность тонкого управления физико-химическими процессами в пламени с получением тех или иных характеристик горения. Поскольку управление подразумевает глубокое понимание причинно-следственных связей между различными явлениями, роль фундаментальной науки трудно переоценить.

В последнее время часто высказывается точка зрения, что современная физика горения и взрыва трансформировалась из фундаментальной науки в науку прикладную, направленную на решение инженерных задач (создание эффективных горелочных устройств и камер сгорания, разработка технологий получения новых веществ и материалов и др.). Действительно, в последние десятилетия в финансировании науки во всех странах мира, включая Россию, наблюдается приоритетное развитие прикладных исследований. Физика горения и взрыва — наука смежная, на стыке физики и химии, поэтому ее развитие особенно чувствительно к административному делению на «физические», «химические» и другие науки и неадекватно отведенной ей второстепенной роли одного из направлений «физической химии». Физика горения и взрыва дала человечеству необычайное многообразие устройств и технологий, которые на протяжении многих лет успешно эксплуатируются современным обществом, создавая иллюзию исчерпывающей полноты фундаментальных знаний о природе сопутствующих явлений. Стоит ли говорить о том, что состояние фундаментальных знаний в физике горения и взрыва, как и во многих других дисциплинах, весьма далеко от идеала, и для продвижения вперед необходимы дальнейшие кропотливые и планомерные научные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wunning J.A., Wunning J.G.* Progress in Energy and Combustion Sciences, 1997, v. 23, p. 81—94.
2. *Cornwell M. D., Gutmark E., Guillou E., Overman N.R.* Proc. 20th ONR Propulsion Meeting, Arlington, VA, 2007.
3. *Tsuji H., Gupta A. K., Hasegawa T., Katsuki M., Kishimoto K., Morita, M.* High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction. CRC Press, FL, 2003.
4. *Borissov A.A., Arghode V.K., Gupta A.K.* Proc. 20th ONR Propulsion Meeting, Arlington, VA, 2007.
5. *Weinberg F.J.* Nature, 1971, v. 233, № 5317, p. 239—241.
6. *Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Попытняков С.И.* Физика горения и взрыва, 1983, №2.
7. *Манелис Г.Б.* Природа, 1996, №. 3—4, с. 4—9.
8. *Берлин А.А., Штейнберг А.С., Фролов С.М., Беляев А.А., Посвянский В.С., Басевич В.Я.* Докл. АН, 2006, т. 406, № 6, с. 770—775.
9. *Зельдович Я.Б.* Журнал технической физики, 1940, т. 10, вып. 17, с. 1453.
10. *Фролов С. М.* Тяжелое машиностроение, 2003, № 9, с. 18.
11. *Фролов С.М.* Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус пресс, 2006, 592 с.
12. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А.* Докл. АН, 2004, т. 394, № 2, с. 222.
13. *Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А.* Там же, 2004, т. 394, № 4, с. 503.
14. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я.* Там же, 2005, т. 401, № 2, с. 201.
15. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я.* Там же, 2005, т. 402, № 4, с. 500.
16. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я.* Там же, 2006, т. 410, № 1, с. 70.
17. *Фролов С.М., Семенов И.В., Комиссаров П.В., Уткин П.С., Марков В.В.* Там же, 2007, т. 415, № 4, с. 509.
18. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О.* Там же, 2007, т. 414, № 6, с. 22.
19. *Фролов С.М., Аксенов В.С.* Там же, 2007, т. 416, № 3, с. 356.