

ГОРЕНИЕ ПРЕССОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННОЙ ОСЕВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

В. Ф. Проскудин, Е. Н. Беляев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, proskudin@dep19.vniief.ru

На примере гетерогенной системы $Ti + C + 20\% TiC$ изучена динамика роста высоты прессованных образцов при горении в условиях воздействия на торцы образцов сжимающего усилия постоянной величины. Получено, что в исследованном диапазоне сжимающих усилий $0.1 \div 2 \text{ кг/см}^2$ рост высоты горящих образцов во времени подчиняется линейному закону, причем при воздействии сжимающего усилия $\approx 0.1 \text{ кг/см}^2$ рост высоты образца составляет $\approx 100\%$, а при воздействии усилия $\approx 2 \text{ кг/см}^2$ — около 25% . При этом использованный метод измерения динамики роста высоты образцов при горении оказался полезным инструментом для экспериментального определения как времени горения образцов, так и времени задержки передачи горения через преграду.

Ключевые слова: горение, удлинение образцов, скорость горения, передача горения через преграду.

Известно, что твердопламенное горение часто сопровождается перемещением вещества в горящем образце. При отсутствии жесткой оболочки изменение размеров образца при горении можно отнести к одному из двух типов (II или III), описанных в монографии [1]. Тип II характеризуется сохранением формы горящего образца при сильном изменении его размеров, в частности длины, при сохранении диаметра (впервые перемещение вещества типа II обнаружено при изучении горения системы $Ti + 2B$ [2–4]). Тип III характеризуется изменением не только размеров, но и формы горящего образца.

При сжигании образцов в жесткой полужамкнутой оболочке возможна ситуация, когда размеры и форма образца при горении не меняются (тип I [1]), а перемещение вещества происходит только внутри горящего образца [5]. Причем перемещение может наблюдаться как во фронте горения, так и за фронтом и перед ним [6–10].

Перемещение (деформация) вещества в горящем образце приводит к изменениям не только параметров горения, в частности скорости горения [2–4], но и параметров передачи горения через преграду [7, 9, 10], что необходимо учитывать в экспериментах. Деформация в горящем веществе учитывается также и в расчетно-теоретических работах, посвящен-

ных изучению горения гетерогенных систем [11–16].

Экспериментальное изучение динамики перемещения вещества при горении образцов, находящихся в жесткой оболочке, удобно проводить методом импульсного рентгеновского просвечивания [7, 8], а образцов, горящих без жесткой оболочки, — путем регистрации изменения высоты образцов Δl во времени механическим датчиком. Именно этот метод был применен в настоящей работе. В качестве гетерогенной системы использовали смесь $Ti + C + 20\% TiC$, приготовленную в шаровой мельнице [6]. Из этой смеси прессовали образцы диаметром 8 мм и высотой l , равной 4 или 7 мм, по технологии, описанной в [17], т. е. с формированием в процессе прессования бумажной (из обеззоленной фильтровальной бумаги марки «синяя лента») оболочки на цилиндрической поверхности образцов. При этом торцы образцов оставались открытыми. Образцы прессовали, подавая на пуансон усилие в 1 т (т. е. давление прессования составляло $\approx 2 \cdot 10^2 \text{ МПа}$). В результате получались образцы с относительной плотностью 0.67.

Опыты проводили на лабораторной установке, позволяющей непрерывно регистрировать увеличение высоты образца при горении и время горения (рис. 1). Узлы установки закрепляли на лабораторном штативе. Для зажи-

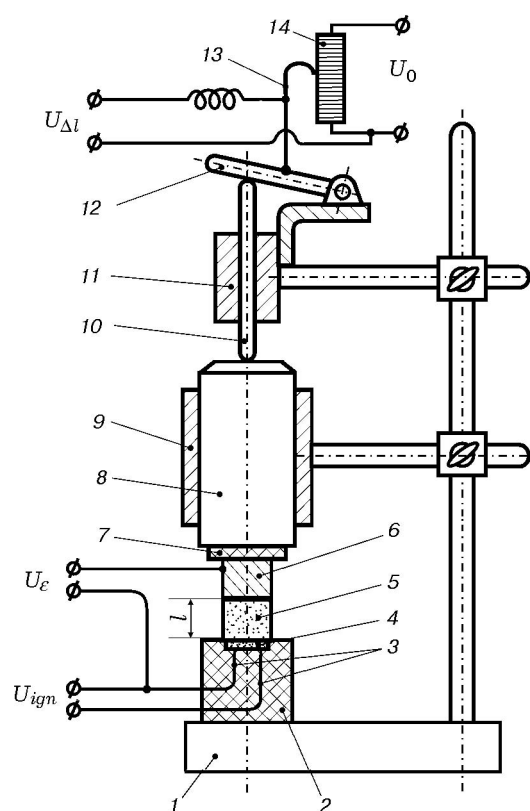


Рис. 1. Схема установки:

1 — лабораторный штатив; 2 — корпус электровоспламенителя; 3 — электроды воспламенителя; 4 — воспламенительные составы; 5 — образец из смеси $Ti + C + 20\% TiC$; 6 — стальной электрод-вставка; 7 — электроизоляционная прокладка; 8 — шток; 9 — втулка; 10 — толкатель; 11 — втулка; 12 — рычаг; 13 — подвижный контакт; 14 — потенциометр (микрореостат); U_{ign} — напряжение, подаваемое на мостик накаливания электровоспламенителя для задействования воспламенительных составов; U_{ε} — напряжение, возникающее при горении воспламенительных составов и образца; U_0 — опорное напряжение, подаваемое на потенциометр; $U_{\Delta l}$ — напряжение, снимаемое с подвижного контакта потенциометра; l — высота образца в исходном состоянии

горения образца использовали электровоспламенитель, представляющий собой пластмассовый корпус диаметром 7 мм и глубиной 1.5 мм, в котором находятся два электрода с присоединенным к ним нихромовым мостиком накаливания. Полость между электродами заполняли воспламенительным составом $3Zr + 2WO_3$. Его запрессовывали в полость корпуса до уровня торцевой поверхности корпуса, относительная плотность запрессовки смеси 0.65. Для облегчения зажигания воспламенительного состава на мостик накаливания помещали небольшое ко-

личество другого состава, более чувствительного к тепловому воздействию нагретого мостика, приготовленного на основе смеси порошков циркония и свинцового сурика [18].

Образец устанавливали на верхнем торце электровоспламенителя соосно прессовке воспламенительного состава и сверху на образец соосно ему помещали стальную вставку в виде цилиндра диаметром 8 мм и высотой 7 мм. На вставку опускали стальной шток, свободно перемещающийся во втулке. На нижнем торце штока находилась электроизоляционная прокладка. Изменяя размеры (а соответственно и массу) штока, можно было варьировать усилие, действующее на образец в осевом направлении. В наших опытах осевое усилие изменялось в диапазоне $0.04 \div 1$ кг.

Верхняя часть штока находилась в контакте с толкателем, предназначенным для приведения в действие механизма регистрации перемещения штока. Этот механизм представлял собой агрегат (содержащий потенциометр, подвижный контакт, рычаг и т. д.), извлеченный из серийно выпускаемого датчика давления типа МД и присоединенный к втулке. На потенциометр подавалось постоянное напряжение U_0 , а с подвижного контакта снималось напряжение $U_{\Delta l}$, пропорциональное величине перемещения штока, т. е. пропорциональное значению Δl .

Регистрацию времени горения образца τ_c проводили, фиксируя ЭДС горения [19] между двумя электрическими контактами, одним из которых являлся один из электродов электровоспламенителя, а вторым — стальная вставка. С этих контактов снимали напряжение U_{ε} , складывающееся из суммы паразитных сигналов термоЭДС (включая ЭДС горения воспламенительных составов) и полезного сигнала — ЭДС горения смеси $Ti + C + 20\% TiC$ [17]. Время, в течение которого наблюдалась ЭДС горения этой смеси, можно было считать временем горения образца τ_c .

При подаче напряжения U_{ign} на мостик накаливания электровоспламенителя воспламенительные составы загораются и инициируют горение образца. При этом появляется напряжение U_{ε} и начинает изменяться напряжение $U_{\Delta l}$. Регистрацию напряжений U_{ε} и $U_{\Delta l}$ проводили шлейфовым осциллографом Н-117. Типичная осциллограмма показана на рис. 2. Горение воспламенительных составов в электровоспламенителе дает на осциллограм-

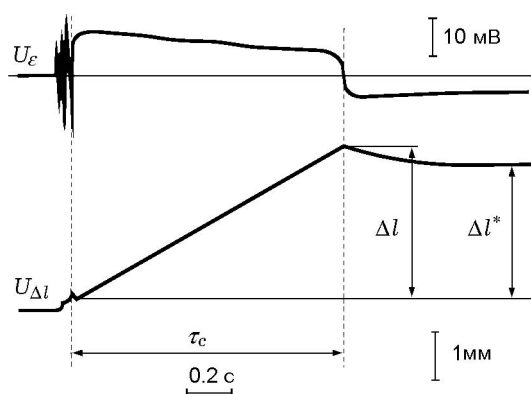


Рис. 2. Типичная осциллограмма:

τ_c — время горения образца; Δl — прирост высоты образца в момент его сгорания; Δl^* — прирост высоты образца, сохраняющийся в течение длительного времени после сгорания образца; U_ε , $U_{\Delta l}$ — см. подпись к рис. 1; $l = 7$ мм; $P = 0.7$ кг/см²

мах небольшой всплеск значения $U_{\Delta l}$, отвечающий расширению шлаков этих составов и их «выпучиванию» из полости электровоспламенителя, и хаотическое колебание напряжения U_ε , отвечающее появлению их ЭДС горения. Затем по мере горения образца напряжение $U_{\Delta l}$ практически линейно возрастает во времени, что соответствует линейному росту высоты образца, который прекращается в момент окончания горения, что видно по характерным осциллограммам ЭДС горения системы Ti + C + 20 % TiC, аналогичным полученным ранее для этой системы [17]. Обращает на себя внимание небольшое уменьшение высоты сгоревшего образца, происходящее в течение примерно 0.5 ÷ 0.7 с после окончания горения и связанное, скорее всего, с остыванием шлаков и их усадкой. Для оценки эффектов, вызванных удлинением образцов при горении, более правильным, по всей видимости, будет рассматривать удлинение, реализующееся именно в момент горения образца, а не то удлинение, которое можно измерить после остывания шлаков. Хотя этим уточнением при рассмотрении процессов деформации при горении гетерогенных систем можно, по-видимому, и пренебречь, ввиду малости эффекта уменьшения высоты сгоревшего образца с течением времени. Этот эффект, характеризуемый соотношением $(\Delta l - \Delta l^*) / (l + \Delta l)$, где Δl и Δl^* — изменение высоты образца l , реализующееся соответственно в момент окончания горения и спу-

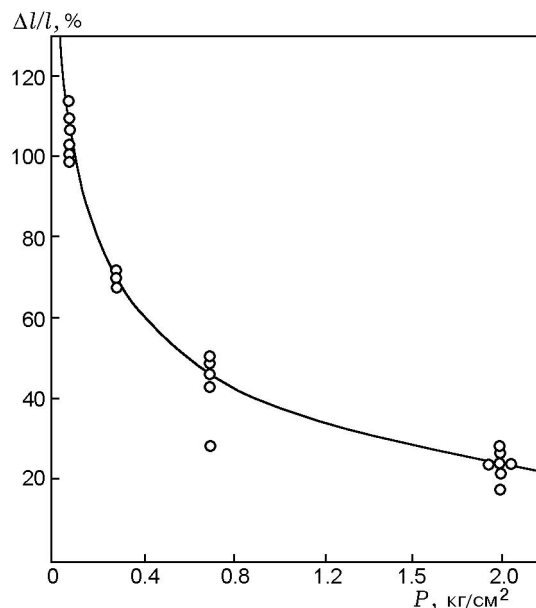


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения образцов из смеси Ti + C + 20 % TiC при горении от удельного осевого сжимающего усилия

стя определенное время после его сгорания (см. рис. 2), оценивается по нашим экспериментальным данным величиной примерно 3 ÷ 6 %. Причем заметную долю в это значение вносит составляющая, обусловленная охлаждением шлака после сгорания образца. Так, при коэффициенте линейного расширения, равном для карбида титана $\approx 7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ [20], высота сгоревшего образца только за счет его остывания от ≈ 2500 К до комнатной температуры должна уменьшиться на ≈ 2 %. Измерения диаметров образцов после сжигания показали, что с учетом сгоревшей бумажной обечайки диаметр их после сгорания, сопровождающегося увеличением высоты на $\approx 20 \div 120$ %, практически не изменяется.

Получаемые осциллограммы позволяют определить время горения образца τ_c и увеличение его высоты Δl к моменту окончания горения при известных значениях начальной высоты образца l и усилия осевого сжатия F , определяемого массой груза, действующего на верхний торец образца в процессе его горения. На основании этих данных построена зависимость относительного удлинения образца $\Delta l/l$ от удельной осевой нагрузки $P = F/S$ (где S — площадь поперечного сечения образца), действующей на образец при горении (рис. 3). Из найденной зависимости следует, что значе-

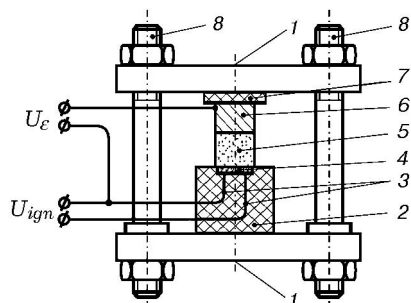


Рис. 4. Лабораторная сборка для определения времени горения образцов с зажатыми торцами:

1 — фланец; 2-7 — см. подписи к рис. 1; 8 — шпилька

ние $\Delta l/l$ резко снижается с ≈ 100 до ≈ 25 % при воздействии сжимающих удельных осевых нагрузок от ≈ 0.1 до ≈ 2 кг/см². Следует указать, что эти нагрузки довольно небольшие по сравнению с осевыми усилиями, которые развиваются при горении системы Ti + C + 20 % TiC в полузамкнутой жесткой оболочке (т. е. фактически для образца «с зажатыми торцами») и составляют порядка 100 кг/см² (9 ÷ 13 МПа [21]).

Определить удлинение образцов, горящих в свободном состоянии, экспериментально не удалось из-за того, что после сгорания образца образующийся шлак представлял собой рассыпавшиеся отдельные фрагменты, состоящие из конгломерата тонких непрочных рыхлых «лешек».

Время горения образцов τ_c при воздействии на них постоянного механического усилия F определялось по осциллограмме двумя методами: по времени наличия ЭДС горения образца на фоне других ЭДС, возникающих в измерительной цепи, и по длительности процесса линейного роста высоты образца (см. рис. 2). Для определения времени горения образцов «с зажатыми торцами» использовали лабораторную сборку (рис. 4), в которой это время оценивали только по ЭДС горения образца. Но в этих опытах из-за развития в горящих образцах довольно большого внутреннего давления размеры образцов после сгорания увеличивались: диаметр в нижней части образца со стороны зажигания увеличивался до ≈ 9 мм при сохранении диаметра ≈ 8 мм в верхней его части, а высота — на ≈ 0.5 мм при началь-

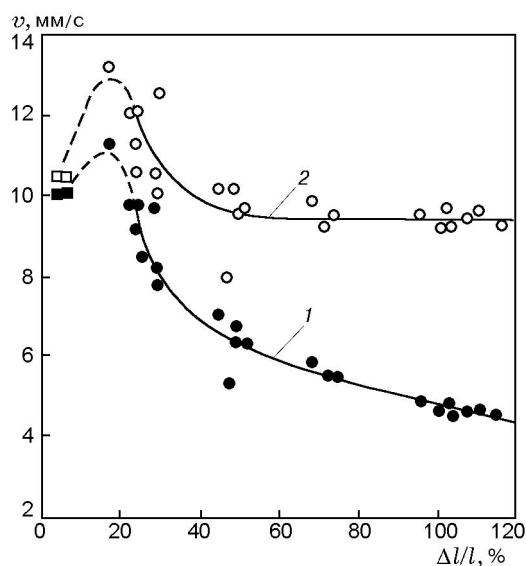


Рис. 5. Зависимость средней скорости горения образцов из смеси Ti + C + 20 % TiC от их относительного удлинения:

1 — наблюдаемая скорость горения v_{ap} ; 2 — истинная скорость горения v_{real} ; ■, □ — соответственно значения наблюдаемой и истинной скоростей горения образца «с зажатыми торцами»; ●, ○ — то же самое в условиях воздействия постоянной осевой механической нагрузки

ной высоте 7 мм за счет вдавливания его шлаков в полость корпуса электровоспламенителя и сжатия в этой полости шлаков воспламенительных составов. Поэтому считать, что указанные образцы сжигались в условиях «с зажатыми торцами», можно только с определенными допущениями.

Полученные оценки времени горения образцов позволяют, рассчитав средние значения наблюдаемой (v_{ap}) и истинной (v_{real}) скоростей горения [3] по формулам

$$v_{ap} = l/\tau_c, \quad v_{real} = (l + \Delta l)/\tau_c,$$

построить зависимости скорости горения v от относительного удлинения образцов $\Delta l/l$ при горении (рис. 5).

Скорость горения образцов «с зажатыми торцами», составляющая ≈ 10 мм/с, в два раза меньше скорости, полученной при горении этой же системы в полузамкнутой жесткой оболочке в условиях, примерно соответствующих горению «с зажатыми торцами» [21]. Это можно объяснить как сильным различием исходных диаметров образцов (в работе [21] диаметр образцов 25 мм, а в настоящей работе ≈ 8 мм), так

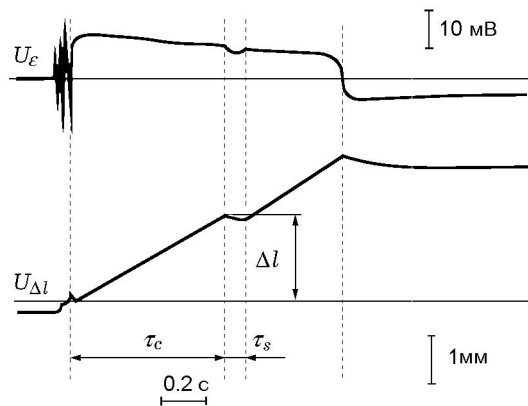


Рис. 6. Типичная осциллограмма в опытах с горением двух образцов, разделенных преградой:

$l = 4$ мм; толщина преграды из тантала 0.02 мм; $P = 0.7$ кг/см², τ_s — время задержки передачи горения через преграду; остальные обозначения см. в подписи к рис. 2

и тем, что при наличии полужамкнутой жесткой оболочки внешние размеры горящих образцов практически не изменялись, чего нельзя сказать в отношении образцов, сгорающих «с зажатыми торцами» без жесткой оболочки.

На зависимости скорости горения v от относительного удлинения образцов $\Delta l/l$ (см. рис. 5) прослеживается тенденция к повышению скорости горения системы Ti + C + 20 % TiC с ростом относительного удлинения образцов от 0 до ≈ 20 %, после чего можно видеть устойчивое и ожидаемое снижение наблюдаемой скорости горения и стабилизацию после небольшого уменьшения истинной скорости горения на уровне ≈ 9.5 мм/с, близком к скорости горения образцов «с зажатыми торцами». Экстремальный характер зависимости скорости горения образцов от относительного удлинения хорошо согласуется с ранее полученным результатом — увеличением скорости горения в диапазоне $\Delta l/l = 0 \div 25$ % с последующим снижением при $\Delta l/l > 25$ % в опытах, в которых образцы из той же смеси сжигались в полужамкнутой жесткой оболочке с использованием «толстой» поджигающей таблетки с «податливыми» шлаками [6]. Этот результат, как уже указывалось в [6], согласуется с зависимостью скорости горения системы Ti + C от относительной плотности образцов, полученной в работе [22]: имеется в виду, что относительная плотность образца в зоне

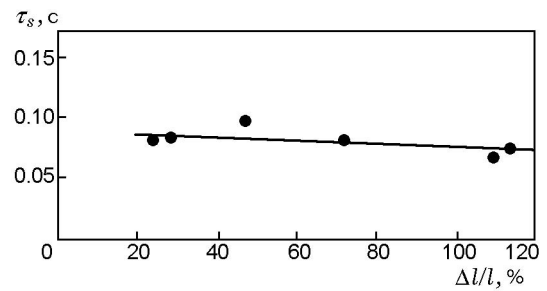


Рис. 7. Зависимость времени задержки передачи горения в системе Ti + C + 20 % TiC через танталовую преграду толщиной 0.02 мм

горения в наших опытах изменяется в первом приближении пропорционально относительному изменению длины образца (при неизменном значении диаметра).

На скорость горения образцов влияет множество факторов, среди которых существенную роль играет процесс переноса тепла в волне горения от шлаков в еще не сгоревшую исходную смесь. Из общих соображений следует, что с увеличением относительного удлинения образцов, т. е. по мере снижения относительной плотности в зоне волны горения, поток тепла в сторону еще не сгоревшей смеси должен снижаться. Это предположение легко проверить путем оценки времени задержки передачи горения через преграду. Опыты проводили на установке (см. рис. 1), в которой вместо одного использовали два образца из смеси Ti + C + 20 % TiC высотой 4 мм каждый. Образцы устанавливали друг над другом, между ними располагалась танталовая преграда диаметром 9 мм и толщиной 20 мкм. Осциллограммы (рис. 6) позволяли получить как характеристику удлинения Δl первого образца, так и время задержки τ_s передачи горения от первого образца ко второму. Следует отметить, что время задержки адекватно отражается и на осциллограмме ЭДС горения.

В результате проведения серии экспериментов с танталовой преградой было получено, что в диапазоне относительных удлинений образцов $\approx 25 \div 115$ % время задержки остается практически неизменным и для танталовой преграды толщиной 20 мкм составляет ≈ 0.08 с (рис. 7). Это, по-видимому, говорит о том, что изменение относительной плотности вещества в волне горения происходит в зоне, где в результате химической реакции образуются вещества, теплопроводность которых намного

больше теплопроводности исходной прессовки, и тепловой поток из этой зоны реакции в исходную смесь, лимитируемый ее низкой теплопроводностью, слабо зависит от предполагаемых больших изменений (связанных со значительными изменениями относительной плотности) теплопроводности вещества во фронте горения, которая при этом остается достаточно высокой. Это косвенно подтверждается и тем, что истинная скорость горения в диапазоне относительных удлинений образцов $\approx 30 \div 115$ % также практически не изменяется. Появление больших значений времени задержки передачи горения [9], связанных с перемещением вещества в горящей смеси $Ti + C + 20$ % TiC перед преградой (которые были зафиксированы ранее в работе [9]), обусловлены, вероятно, не снижением плотности «рыхлого слоя», а наличием в нем поперечных расслоений (зазоров), приводящих к резкому снижению эффективной теплопроводности в этой зоне. Чтобы избежать влияния таких зазоров (поперечных трещин) на горение образцов и передачу горения через преграду, обеспечив кондуктивный контакт расслаивающихся шлаков в горящем образце, достаточно приложить к горящему в свободном состоянии образцу небольшое осевое усилие порядка $0.1 \div 1$ кг/см², как это было рекомендовано, например, в работе [23].

Следует отметить, что путем регистрации динамики удлинения горящих образцов можно наряду с другими известными способами достаточно просто определять время горения этих образцов с одновременным непрерывным наблюдением за возможными особенностями движения фронта горения (ускорением, замедлением или кратковременными остановками волны горения, например, вследствие растрескивания горящего образца). Кроме того, этим методом удобно определять и время задержки передачи горения через преграду, особенно если образцы неэлектропроводны и к ним неприменим способ, описанный в [24].

Авторы выражают благодарность сотрудникам РФЯЦ-ВНИИЭФ: В. Н. Тараканову — за помощь в проведении экспериментов, А. Г. Лещинской — за помощь в оформлении рукописи статьи, П. Г. Бережко — за постоянное внимание и поддержку этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Твердопламенное горение. Черногловка: Изд-во ИСМАН, 2000. С. 42–43.
2. Merzhanov A. G. Regularities and mechanism of combustion of pyrotechnic titanium-boron mixtures // Proc. 4th Symp. on Chemical Problems Connected with the Stability of Explosives, Molle, Sweden, 1976. P. 381–401.
3. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора. Черногловка, 1978. (Препр. / АН СССР. Отделение ИХФ).
4. Вершинников В. И., Филоненко А. К. О зависимости скорости безгазового режима горения от давления // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 42–47.
5. Проскудин В. Ф. Баллистика горения пиротехнических зарядов, образующих твердые продукты сгорания // Международная науч.-практ. конф. «Третьи Окуневские чтения». Санкт-Петербург, 24–29 июня 2002 г.: Тр. конф. Т. 2: Внутренняя баллистика. СПб.: Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех», 2003. С. 79–85.
6. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф. и др. О перемещении вещества воспламенителя и образца при горении безгазовых систем в жесткой оболочке // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 94–97.
7. Голубев В. А., Проскудин В. Ф., Бережко П. Г. и др. О влиянии усадки шлаков поджигающей таблетки на параметры зажигания // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 41–44.
8. Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г. О деформациях внутри горящих образцов // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 4. С. 78–83.
9. Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г. и др. Особенности прохождения волны горения через инертную преграду в реальных конденсированных системах // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 43–47.
10. Проскудин В. Ф. Деформации в горящем образце и их влияние на теплопередачу через преграду // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 6. С. 71–76.
11. Смоляков В. К., Некрасов Е. А., Максимов Ю. М. Моделирование безгазового горения с фазовыми превращениями // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 63–73.
12. Смоляков В. К. К теории горения безгазовых систем в условиях действия постоянной нагрузки // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 69–74.
13. Князева А. Г. Скорость фронта простейшей твердофазной химической реакции и внутренние механические напряжения // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 44–54.
14. Тимохин А. М., Князева А. Г. Режимы распространения фронта реакции в связанной термомеханической модели твердофазного горения // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 10. С. 85–100.

15. **Стельмах Л. С., Столин А. М.** Тепловые режимы уплотнения при горении порошкового материала // Докл. АН. 2000. Т. 373, № 2. С. 206–209.
16. **Браверман Б. Ш., Зиатдинов М. Х., Максимов Ю. М.** О нетепловой природе нестационарности при горении хрома в азоте // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 1. С. 43–46.
17. **Проскудин В. Ф.** Оценка величины ЭДС в волне горения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 2. С. 56–61.
18. **Лашков В. Н., Лобанов В. Н.** Взрывчатые составы первичного заряда детонаторов и воспламенителей // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. науч. конф. Волжского регион. центра Российской акад. ракетно-артиллерийских наук. Саров: ВНИИЭФ, 2000. С. 391–394.
19. **Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Нерсибян М. Д., Мержанов А. Г.** Электрохимические явления в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. АН. 1996. Т. 351, № 6. С. 780–782.
20. **Тепловые свойства веществ:** Справочная таблица. М.: ЦНИИАтоминформ, 1979. С. 61.
21. **Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г.** Измерение давления во фронте горения безгазовых пиротехнических систем с низкой газопроницаемостью // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 76–80.
22. **Шкиро В. М., Боровинская И. П.** Исследование закономерностей горения смесей титана с углеродом // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка: Отд-ние ИХФ АН СССР, 1975. С. 253–258.
23. **Проскудин В. Ф., Беляев Е. Н., Тараканов В. Н. и др.** Применение осевого сжатия горячей системы для стабилизации условий теплопередачи через преграду в конденсированных системах // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. II науч. конф. Волжского регион. центра Российской академии ракетно-артиллерийских наук. Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 291–294.
24. **Проскудин В. Ф., Беляев Е. Н., Тараканов В. Н. и др.** Использование ЭДС горения конденсированных систем для оценки параметров теплопередачи через преграду // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 4. С. 87–94.

Поступила в редакцию 7/II 2006 г.
