

ДЕФОРМАЦИИ В ГОРЯЩЕМ ОБРАЗЦЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ ЧЕРЕЗ ПРЕГРАДУ

В. Ф. Проскудин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров

На примере конденсированной системы $3Zr + 2WO_3$ показано, что перед фронтом горения образца, запрессованного в жесткую полузамкнутую неразрушаемую оболочку, наблюдается распространение слабой волны разгрузки. При достаточно большой высоте образца (≈ 9 мм) эта волна еще до прихода туда волны горения вызывает появление вблизи торца заметных деформаций.

Известно, что для горения конденсированных систем (с образованием твердых продуктов реакции) в виде образцов с зажатými торцами в жесткой полузамкнутой неразрушаемой оболочке (совместно с толстой поджигающей таблеткой с податливыми шлаками [1] или без таковой [2]) характерно появление за фронтом горения волны разгрузки — волны перемещения частиц образца. Перемещение вещества может достигать нескольких миллиметров, что хорошо видно, например, на рентгеновских снимках горящих образцов [1, 2]. Эта волна движется вместе с волной горения и приводит к появлению за фронтом горения «рыхлого слоя» сгоревшей смеси (шлаков), который, приближаясь к инертной преграде вслед за волной горения, существенно ухудшает условия передачи тепловой волны через преграду [3]. Одновременно с возникновением за фронтом горения сильной волны разгрузки следует ожидать появления волны разгрузки и перед фронтом горения.

Насколько нам известно, впервые на возможность протекания процессов разгрузки перед фронтом горения в конденсированных системах обратил внимание А. Г. Мержанов. В работе [4] снижение скорости горения образцов, сгорающих с незажатыми торцами, было объяснено тем, что перед фронтом горения из-за выделения в зоне прогрева примесных газов происходит местное разрыхление (расширение) прессовки образца, и из-за этого фронт горения вынужден проходить более длинный путь, чем в случае сгорания образца с зажатыми торцами. Но поскольку толщина зоны прогрева перед фронтом горения невелика (доли

миллиметра), то и волна разгрузки такой природы может возникать только на примерно таком же небольшом расстоянии перед фронтом горения. Вместе с тем не исключено и более дальнее распространение волн разгрузки перед фронтом горения. Происхождение таких волн разгрузки в еще не сгоревшей части образца может быть связано, например, с постепенным (по мере продвижения фронта горения) снятием предварительно-напряженного состояния прессованных частиц образца; с «раздвигающим» воздействием давления примесного газа, поступающего под достаточно большим давлением [5] в открытые поры несгоревшей части образца из зоны фронта горения; с растягивающим воздействием сжимающейся из-за усадки [6] сгоревшей части образца на еще не сгоревшую часть и т. д. И хотя такие волны разгрузки должны быть весьма слабыми, поскольку прессованные образцы в исходном состоянии обычно обладают довольно высокой механической прочностью, а перечисленные выше воздействия в основном слабые, их влияние на горение системы в целом может оказаться достаточно существенным. Особенно заметным такое влияние может быть при прохождении волны горения через инертную преграду или через поверхности стыковки нескольких образцов, т. е. в тех местах, где прочность механической связи образцов и других элементов горящей системы друг с другом близка к нулю и где возможно образование зазоров вследствие прихода волн разгрузки в эти зоны как раз перед тем, как туда придет волна горения. Появление зазоров резко ухудшает условия теплопередачи, что может привести к увеличению времени задержки горения и к снижению надежности передачи горения от одного образца (заряда) к другому. Вследствие этого изуче-

Результаты данной работы были частично доложены автором на Международной конференции «Вторые окуневские чтения», С.-Петербург, 2–7 октября 2000 г.

ние параметров волн разгрузки, возникающих перед фронтом горения, и закономерностей их распространения представляется весьма актуальной задачей для более глубокого понимания процессов горения конденсированных систем и оценки условий, при которых параметры таких волн разгрузки начинают выходить за пределы, еще допустимые с точки зрения нормального функционирования того или иного пиротехнического устройства.

Удобным способом регистрации слабых волн разгрузки может быть непрерывное измерение электрического сопротивления вблизи того торца образца (далее по тексту — просто торца), к которому в момент окончания горения системы приходит волна горения. Как известно, изменение механических усилий в зонах контакта как между самими частицами пресованного образца, так и между частицами образца и электродами, приводит к соответствующему изменению электрического сопротивления R всей этой системы [7]. Поэтому по изменению величины R можно судить об изменении механических напряжений в еще не сгоревшей части образца, которые будут происходить вследствие распространения слабых волн разгрузки перед движущимся фронтом горения.

Для опытов использовали лабораторную сборку, представляющую собой толстостенный стальной стакан, в который запрессовывали стехиометрическую смесь порошков циркония и вольфрамового ангидрида [6] до относительной плотности 0,6, получая тем самым образец диаметром 25 мм и высотой h (рис. 1, *a*). В днище стакана размещалась втулка из пресматериала АГ-4 диаметром 7 мм, в которой симметрично оси образца были расположены два стальных электрода диаметром 1 мм каждый с плоскими торцами, выполненными «заподлицо» с торцом втулки, обращенным к смеси $3Zr+2WO_3$. Расстояние между осями электродов 4 мм. При таких значениях диаметров втулки и электродов и межэлектродного расстояния начальное электрическое сопротивление R_0 между электродами в полностью собранной лабораторной сборке с затянутой гайкой не превышало 0,1 кОм. Остальные детали лабораторной сборки описаны в работе [8].

Непрерывную регистрацию значений электрического сопротивления R между электродами лабораторной сборки, реализующихся при горении образца, осуществляли с помощью гальванометра (с собственной

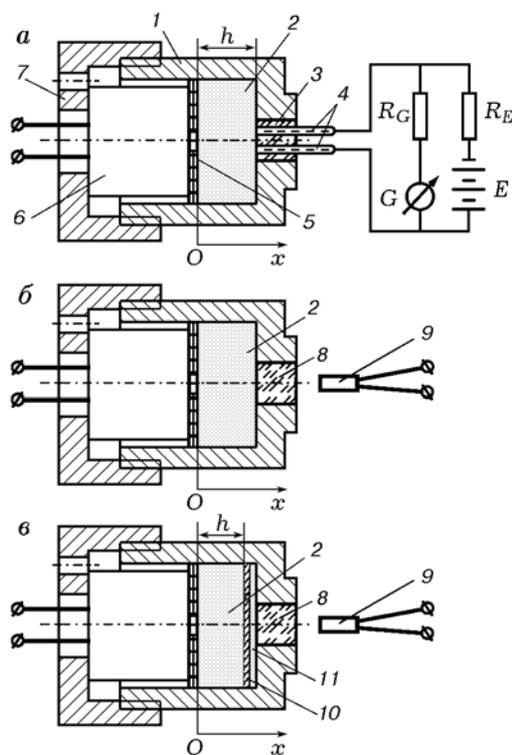


Рис. 1. Схемы лабораторных сборок:

1 — корпус, 2 — образец, 3 — втулка, 4 — электроды, 5 — стальная сетка, 6 — вставка с электровоспламенителем, 7 — гайка, 8 — втулка, 9 — фотодиод ФД-3; 10 — танталовая преграда, 11 — прессованный слой смеси толщиной 2 мм, G — гальванометр; E — источник напряжения 20 В; R_G , R_E — резисторы номиналом 0,5 и 1,6 кОм соответственно

частотой колебаний 1,2 кГц) осциллографа Н-117 с использованием электрической схемы, показанной на рис. 1, *a*. Достоинством такой схемы помимо простоты исполнения является то, что она позволяет работать во всем ожидаемом диапазоне изменения электрического сопротивления, реализующегося вблизи торца образца при его горении (реальный диапазон регистрации R в данной схеме — от нуля до ≈ 20 кОм; см., например, тарировочный график зависимости отклонения l луча гальванометра на экране осциллографа от величины R , приведенный на рис. 2, *a*).

Электрическое сопротивление в процессе горения образца может изменяться в большую или меньшую сторону в зависимости от того, какой из двух ожидаемых сценариев распространения волны горения во времени в действительности реализуется в эксперименте: с отсутствием волны разгрузки перед фронтом

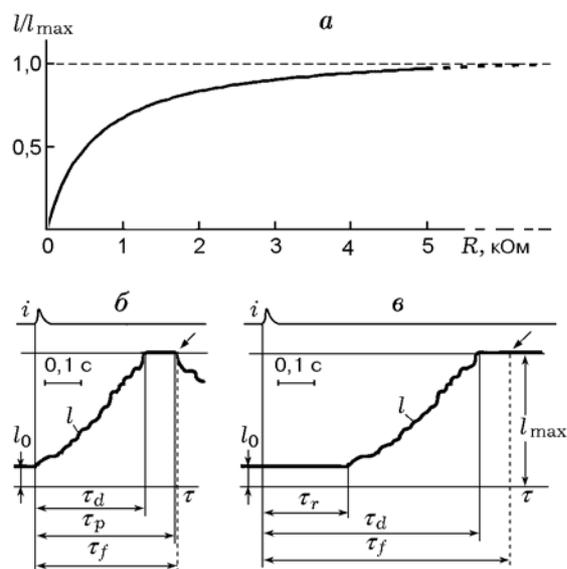


Рис. 2. Тарировочный график измерения электрического сопротивления по отклонению луча на экране осциллографа (а) и осциллограммы процесса распространения волны разгрузки перед фронтом горения при высоте образца 9 мм (б) и 17,7 мм (в):

l_0 — начальное отклонение луча на экране осциллографа, соответствующее значению R_0 ; l_{\max} — максимальное отклонение луча на экране осциллографа, соответствующее значению R , близкому к «бесконечности»; i — сигнал подачи тока на электровоспламенитель лабораторной сборки; стрелкой показано примерное положение момента времени прихода волны горения на торец образца, полученное по $x - \tau$ -диаграмме распространения волны горения по образцу (см. рис. 3, кривую 3)

горения или с наличием таковой.

Если в еще не сгоревшей части образца не происходит никаких механических изменений, то значение R по мере приближения фронта горения к торцу образца должно монотонно уменьшаться, так как все большую часть образца занимают высокоэлектропроводные шлаки. В момент окончания горения, когда фронт горения достигнет торцов электродов, должно наблюдаться короткое замыкание, поскольку электрическое сопротивление в зоне фронта горения близко к нулю. Этот сценарий отвечает отсутствию волны разгрузки перед фронтом горения (сценарий № 1).

И наоборот, если в еще не сгоревшей части образца протекают разгрузочные процессы, приводящие к ослаблению контактов как между частицами образца, так и между торцом образца и торцами электродов, то по ме-

ре приближения фронта горения к торцу образца величина R должна преимущественно увеличиваться вплоть до окончания горения или до момента разрыва электрической цепи в случае образования зазора между торцом образца и торцами электродов. В момент достижения фронтом горения торца образца (окончание горения) величина R должна резко снизиться, если к этому времени в результате воздействия волны разгрузки перед фронтом горения торец образца не отошел от электродов на заметное расстояние. Если же торец образца отошел от электродов, то значение R будет оставаться близким к «бесконечности» даже в момент окончания горения образца. Этот сценарий отвечает наличию волны разгрузки перед фронтом горения (сценарий № 2).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что при высоте образца $h = 2 \div 21$ мм процесс горения системы $3Zr + 2WO_3$ в полузамкнутой жесткой неразрушаемой оболочке (см. рис. 1, а) протекает в достаточно близком соответствии со сценарием № 2, а именно: во всех опытах горение образца сопровождается увеличением значения R (см. рис. 2, б, в). Причем при $h = 2 \div 9$ мм (см. рис. 2, б) изменение (увеличение) R начинается сразу же после начала горения образца, т. е. передний фронт волны разгрузки обнаруживает себя на торце образца уже вначале горения. В течение времени τ_d значения R возрастают, что говорит о непрерывно увеличивающейся интенсивности волны разгрузки, приводящей к ослаблению контактных усилий частиц образца как между собой, так и с поверхностью торцов электродов в зоне торца образца. В момент времени $\tau = \tau_d$ интенсивность волны разгрузки перед фронтом горения становится настолько сильной, что это приводит к полному нарушению контакта торца образца с электродами, вследствие чего R стремится к «бесконечности».

По истечении времени τ_p фронт горения достигает торца образца и в результате химической реакции делает его электропроводным, но из-за плохого контакта с электродами это не приводит к резкому снижению R до нуля, а лишь понижает уровень R до нескольких килоом, соответствующих условиям неплотного контакта в системе «электроды — высокоэлектропроводный торец сгоревшего образца».

При большей высоте образца ($h = 10 \div 21$ мм) картина процесса разгрузки в зоне тор-

ца горящего образца несколько меняется (см. рис. 2, в). Внутри интервала времени τ_d появляется отрезок времени τ_r , в течение которого электрическое сопротивление практически не изменяется, оставаясь примерно на уровне начального значения. Это говорит о том, что передний фронт волны разгрузки приходит в этом случае на торец образца не сразу после воспламенения образца, а спустя определенный период времени, равный τ_r . Помимо этого наблюдается еще одно отличие: после прихода фронта горения на торец образца значение R не уменьшается, оно остается близким к «бесконечности» как непосредственно перед приходом фронта горения на торец образца, так и в последующие моменты времени. Это говорит о том, что при $h > 9$ мм вблизи торца образца перед приходом туда волны горения образуется настолько большой зазор, что даже слабое замыкание электродов высокоэлектропроводными шлаками сгоревшего образца невозможно.

Необходимую для интерпретации получаемых результатов $x - \tau$ -диаграмму движения фронта горения в образце $3Zr + 2WO_3$ получали в серии экспериментов с использованием лабораторной сборки, показанной на рис. 1, б. Втулка в днище стакана в этих опытах была изготовлена из оргстекла, что позволяло с помощью фотодиода регистрировать на осциллографе Н-117 момент прихода волны горения на торец образца. При этом время горения образца τ_f определялось как разность между временем подачи тока на электровоспламенитель и временем появления сигнала с фотодиода.

Результаты измерения параметров τ_r , τ_d , τ_p и τ_f приведены на рис. 3. Анализ этих данных показывает, что во всем изученном диапазоне высот образцов присутствует волна разгрузки, распространяющаяся перед фронтом горения. При этом ее передний фронт достигает противоположного торца образца либо практически одновременно с началом горения (при $h = 2 \div 9$ мм), либо через определенный интервал времени τ_r (при $h = 10 \div 21$ мм), возрастающий по мере роста h . Интенсивность волны разгрузки, соответствующая отходу (отслоению) торца образца от дна стакана (т. е. значениям R , близким к «бесконечности»), достигается за $50 \div 100$ мс до прихода волны горения на этот торец, т. е. когда фронт горения, двигающийся со скоростью ≈ 25 мм/с, находится еще на расстоянии $1,2 \div 2,5$ мм от торца и

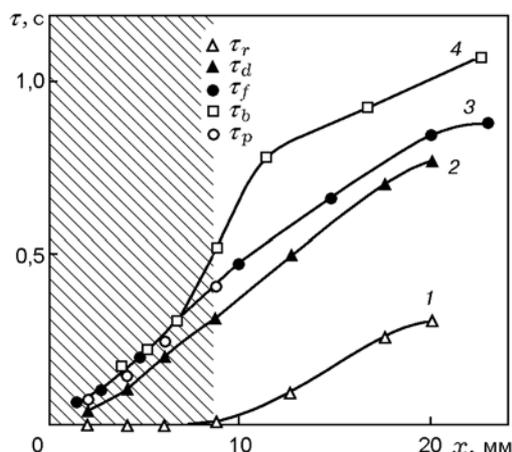


Рис. 3. Значения характерных времен процесса разгрузки перед фронтом горения образца из смеси $3Zr + 2WO_3$ (1, 2), времени горения образца (3) и суммарного времени прохождения волны горения по образцу, преграде и пресованному слою смеси толщиной 2 мм (4) от координаты x :

1–3 — $x = h$, 4 — $x = h + 2$ мм, заштрихованная область — значения высоты образца, при которых восстанавливается контакт торца образца с электродами в момент прихода туда волны горения

это расстояние заметно больше ширины зоны прогрева фронта горения. Таким образом, отслоение происходит заведомо до того момента, когда могло бы начаться резко нарастающее тепловое воздействие кондуктивного характера на дно стакана от выходящей на торец образца волны горения. Однако при достаточно малой высоте образца ($h < 9$ мм) в момент выхода волны горения на его торец снова происходит замыкание электродов, хотя и довольно слабое. Тем самым восстанавливается кондуктивный механизм передачи тепла от торца сгоревшего образца в сторону дна стакана. Такое повторное замыкание электродов можно объяснить местным расширением (разрыхлением) прессовки перед фронтом горения из-за выделяющихся (по А. Г. Мержанову [4]) примесных газов в зоне прогрева. И, видимо, при $h < 9$ мм величина такого местного расширения прессовки превышает величину отслоения торца образца от дна стакана. А при $h > 9$ мм отслоение становится настолько большим, что начинает превышать величину местного расширения прессовки; и поэтому выходящий на торец образца фронт горения не в состоянии восстановить контакт шлаков образца с электродами, о чем свидетельствует большое зна-

чение электрического сопротивления R , близкое к «бесконечности».

Таким образом, выявлено существование некоторого критического значения высоты образца h_{cr} , при которой величина отслоения торца образца вследствие прихода волны разгрузки, движущейся перед фронтом горения, и величина местного расширения прессовки от выделяющихся примесных газов становятся примерно одинаковыми.

Если образец рассматривать, например, как инициирующую часть системы, в которой осуществляется передача тепловой волны через инертную преграду, то можно ожидать, что при небольшой высоте образца ($h < h_{cr}$) вследствие возобновления хотя бы и слабого контакта торца образца с преградой в момент прихода туда волны горения условия теплопередачи будут существенно лучше, чем при достаточно большой высоте образца ($h > h_{cr}$), когда такого контакта не возникает, а из-за усадки шлаков образца [6] условия теплопередачи с каждым последующим моментом катастрофически ухудшаются. Это должно проявиться в том, что при тонкой инертной преграде, изготовленной из высокотеплопроводного материала, время задержки прохождения волны горения через преграду при $h < h_{cr}$ должно быть очень мало*, в то время как при $h > h_{cr}$ следует ожидать резкого возрастания значений времени задержки прохождения волны горения через преграду (τ_s).

Для опытов была выбрана танталовая преграда толщиной 0,1 мм. Тантал — достаточно теплопроводный материал (теплопроводность 63 Вт/(м·К), температуропроводность $2,73 \cdot 10^{-5}$ м²/с [9]). Время прогрева преграды толщиной 0,1 мм, оцениваемое по критерию Фурье, менее 1 мс. Таким образом, при наличии контакта горячих шлаков инициирующего образца с такой преградой значение τ_s должно быть весьма мало по сравнению с временем задержки, когда такого контакта нет. В случае отсутствия контакта значение τ_s будет определяться в основном временем передачи тепла излучением через зазор между шлаками образца и преградой, что менее эффективно для прохо-

ждения волны горения через преграду.

Схема лабораторной сборки для экспериментальной оценки τ_s при разных значениях высоты образца показана на рис. 1, в. В стакан сначала запрессовывали навеску смеси $3Zr + 2WO_3$, обеспечивающую при ее запрессовке образование на дне стакана слоя смеси относительной плотностью 0,6 и толщиной 2 мм. Затем на этот слой смеси устанавливали танталовую преграду без зазора с боковыми стенками стакана. На преграду засыпали следующую порцию смеси, образующую после прессования образец высотой h с относительной плотностью 0,6. В остальном эта лабораторная сборка не отличается от показанной на рис. 1, б.

Получаемое на такой лабораторной сборке значение времени τ_b , регистрируемое от момента срабатывания электровоспламенителя до появления сигнала от фотодиода, представляет собой сумму времени горения образца, времени задержки прохождения тепловой волны через преграду и времени горения слоя смеси толщиной 2 мм.

Значения времен горения образца и времени горения слоя смеси толщиной 2 мм легко оценить по имеющейся $x - \tau$ -диаграмме распространения волны горения в системе $3Zr + 2WO_3$ (кривая 3 на рис. 3), а вычитая их сумму из экспериментальных значений τ_b , можно определить в первом приближении значения времени τ_s прохождения волны горения через танталовую преграду для соответствующих значений h .

Экспериментальные значения τ_b приведены на рис. 3 (линия 4), а значения τ_s , оцененные указанным выше способом, — на рис. 4. Они хорошо согласуются с результатами измерения характеристик волны разгрузки по параметру R , определяя критическое значение высоты образца (≈ 9 мм), при котором время задержки прохождения волны горения через преграду максимальное (см. рис. 4). Некоторое снижение значений τ_s при $h > 9$ мм можно объяснить тем, что с увеличением h несколько снижается теплоотвод от шлака во вставку, содержащую электровоспламенитель. А поскольку при наличии зазора между шлаками образца и преградой основной путь передачи тепла — это излучение, мощность которого пропорциональна температуре в четвертой степени, то даже незначительное сокращение теплопотерь раскаленными шлаками образца может существенно повысить эффективность переда-

* Здесь не рассматривается частный случай очень малой высоты образца, когда из-за больших теплопотерь при увеличении высоты образца от нуля до некоторой величины сначала прекратятся отказы в передаче горения через инертную преграду, а затем начнется снижение τ_s до некоторого минимального значения, о котором и идет речь в данном абзаце.

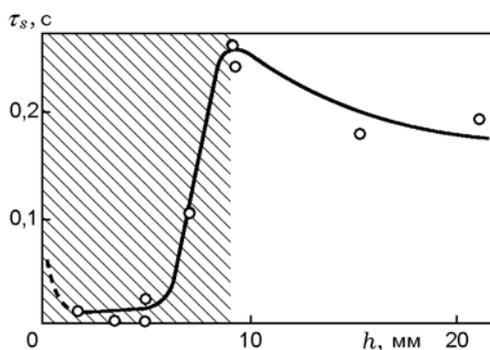


Рис. 4. Зависимость времени задержки прохождения волны горения через танталовую преграду толщиной 0,1 мм от высоты образца из смеси $3Zr + 2WO_3$, расположенного перед преградой:

заштрихованная область — значения высоты образца, при которых восстанавливается контакт торца образца с электродами в момент прихода туда волны горения

чи тепла, снижая значение τ_s по мере увеличения h .

Итак, в работе установлено, что слабая волна разгрузки, распространяющаяся перед фронтом горения конденсированной системы, может существенно изменять условия теплопередачи в местах стыковки образцов, в том числе и содержащих инертную преграду. Например, она приводит к резкому возрастанию времени задержки прохождения волны горения через преграду при превышении высотой находящегося перед преградой образца некоторого критического значения и сохранения относительной плотности запрессовки образца в полужамкнутую жесткую оболочку.

Автор выражает благодарность сотрудникам ВНИИ экспериментальной физики Е. Н. Беляеву, Л. А. Журавлевой, А. Г. Лецинской, В. Н. Тараканову и С. А. Другову за

помощь в проведении экспериментов, В. В. Мокрушину и В. Е. Бутусову — за выполнение компьютерной графики, а П. Г. Бережко — за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г. и др. Некоторые особенности прохождения волны горения через инертную преграду в реальных конденсированных системах // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 6. С. 43–47.
4. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора. Черногловка, 1978. (Препр. / АН СССР. ОИХФ).
5. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Малышев А. С. О возможности непрерывного измерения давления во фронте горения пиротехнических составов, дающих твердые продукты реакции // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 67–70.
6. Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф. и др. О влиянии усадки шлаков поджигающей таблетки на параметры зажигания // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 41–44.
7. Мокрушин В. В. Закономерность изменения обобщенной проводимости нагружаемых порошковых материалов // Докл. АН. 1997. Т. 357, № 3. С. 332–334.
8. Проскудин В. Ф. Регистрация локальных флуктуаций физико-химических параметров в волне горения конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 71–75.
9. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968.

Поступила в редакцию 29/IX 2000 г.