



VOLUME 4 SPACE CHALLENGES IN XXI CENTURY

CHEMICAL AND RADIATION PHYSICS

Edited by:
I. G. Assovskiy
A. A. Berlin
G. B. Manelis
A. G. Merzhanov

КОСМИЧЕСКИЙ ВЫЗОВ XXI ВЕКА

Том 4

Химическая и радиационная физика

Под редакцией
И. Г. Ассовского, А. А. Берлина,
Г. Б. Манелиса, А. Г. Мержанова

ББК 24.5
X 46
УДК 539.1

Рецензенты:

Бабук В. А., Бурлакова Е. Б., Зарко В. Е., Истратов А. Г., Лемперт Д. Б.,
Маршаков В. Н., Новожилов Б. В., Синдицкий В. П., Стесик Л. Н., Ягодников Д. А.

Химическая и радиационная физика. Том 4 / [Под ред. И. Г. Ассовского,
X 46 А. А. Берлина, Г. Б. Манелиса, А. Г. Мержанова] — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. —
632 с.: ил. (Космический вызов XXI века.)
ISBN 978-5-94588-108-2

Сборник содержит около 100 статей, посвященных современным проблемам химической и радиационной физики. Основу сборника составляют работы, представленные на Международной конференции «Химическая и радиационная физика», Москва, Президиум РАН, 25–29 августа 2009 г., посвященной 100-летию О. И. Лейпунского, одного из основателей ИХФ РАН, автора фундаментальных работ в различных областях химии и физики (химической физики высокого давления, горения энергоемких материалов, радиационной физики). Тематика представленных статей отражает современное состояние химической и радиационной физики, а также развитие пионерских работ О. И. Лейпунского. Авторы статей являются международными экспертами, представляющими научные и производственные организации России, стран СНГ, Европы и США.

Сборник является четвертым томом серии «Космический вызов XXI века», которая включает также: Том 1. Ракетные двигатели и проблемы освоения космического пространства; Том 2. Перспективные материалы и технологии: Наноконструкты; Том 3. Перспективные материалы и технологии для ракетно-космической техники.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов технических вузов.

ББК 24.5

ISBN 978-5-94588-108-2

© ИХФ РАН, 2011
© ТОРУС ПРЕСС, 2011

Книга издана при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований, проект РФФИ № 09-03-02004 э_д

GASES CRITICAL CONDITIONS AND INDUCTION TIME OF BURNING ON SURFACE OF CATALYST PARTICLES

V. V. Kalinchak¹, A. N. Sofronkov², A. S. Chernenko¹, A. A. Moysa¹,
and A. A. Golovko¹

¹I. I. Mechnikov Odessa National University
Odessa, Ukraine
e-mail: chernalex@ukr.net

²University Opole
Poland

КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ПЕРИОД ИНДУКЦИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ НА ЧАСТИЦАХ КАТАЛИЗАТОРА

В. В. Калинчук¹, А. Н. Софронков², А. С. Черненко¹,
А. А. Мойса¹, А. А. Головкин¹

¹Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
г. Одесса, Украина
e-mail: chernalex@ukr.net

²Университет Ополе
Польша

Critical conditions were found under which catalytic burning of gases on catalyst particles was initiated. Time dependences of catalyst particles temperature are analyzed at different values of active component concentration at catalytic reaction on its surface. The analysis of the characteristic points on these dependences allowed to divide the time necessary to achieve the high temperature oxidization mode at three stages: (i) inert heating of the catalyst; (ii) heating due to chemical heat release during the reaction both in kinetic range and (iii) in diffusive range. An analytic calculation of duration of the third stage allowed to determine the induction period as the time when catalyst reaches temperature close to the steady one.

Получены критические условия, при которых инициируется каталитическое горение газов на частицах катализатора. Проанализированы временные зависимости температуры частицы катализатора для различных значений концентрации активного компонента при протекании на его поверхности каталитической реакции. Анализ характерных точек на этих зависимостях

позволил разделить все время выхода на высокотемпературный режим окисления на три стадии: инертный прогрев катализатора, разогрев за счет химического тепловыделения при протекании реакции как в кинетической, так и в диффузионной областях. Аналитический расчет времени третьей стадии позволил определить период индукции как время достижения катализатором температуры, близкой к установившейся.

Детальная информация механизма управления устойчивыми стационарными высокотемпературными и гистерезисными режимами тепломассообмена и кинетики гетерогенно-каталитической реакции на поверхности частиц катализатора при малых содержаниях горючего компонента в воздухе необходима для разработки оптимальных режимов работы термохимических газоанализаторов и установок аэрозольного катализа [1]. Именно определение критических условий, при которых инициируется каталитическое горение, и времени выхода на высокотемпературный режим каталитического горения в зависимости от различных концентраций горючего компонента в газовой фазе стало целью данной работы. Из условия стационарности температуры катализатора получена зависимость эффективной температуры газа от стационарной температуры при постоянной концентрации аммиака в воздухе:

$$T_{gs} = T - \frac{1}{\alpha} \left[C_{av} \frac{M_a}{M_g} \frac{Q_a \rho_{gs} k_0}{1 + Se} \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4) \right]. \quad (1)$$

Здесь

$$Se = \frac{k \rho_{gs}}{\beta_a \rho_g}; \quad k = k_0 \exp \left(-\frac{E}{RT} \right); \quad \beta_a = \frac{D_a Nu}{d}; \quad \alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d};$$

$$\rho_{gs} = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*} \frac{P}{P_0}; \quad D_a = D_0 \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^{n+1} \frac{P_0}{P};$$

$$\lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^n; \quad T_* = \frac{T + T_{gs}}{2},$$

где Q_a — тепловой эффект реакции, рассчитанный на 1 кг активного компонента; C_{av} — относительная объемная концентрация активного компонента вдали от частицы; T_{gs} — эффективная температура газовой смеси; T_w — температура стенок реакционной установки; β_a и α — коэффициенты массо- и теплообмена; M_g и M_a — молярная масса газа, окружающего частицу, и активного компонента реакции; Se — диффузионно-кинетическое отношение, число Семенова. В частном случае для нити катализатора, по которой протекает электрический ток, эффективной температурой газа является $T_{gs} = T_g + q_j / \alpha$, где q_j — плотность мощности нагрева нити электрическим током.

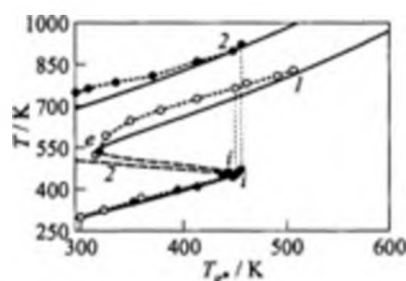


Рис. 1 Зависимость температуры катализатора от эффективной температуры газа при концентрации аммиака в воздухе: 1 — $C_{av} = 3,1\%$, 2 — $C_{av} = 5,2\%$; символы и пунктирные кривые — экспериментальные данные [2]; сплошные кривые — высоко- и низкотемпературные режимы, расчет по (1); штриховые кривые — критические условия вынужденного зажигания, расчет по (1)

Все стационарные состояния, которые образуются в результате изменения температуры газа и, следовательно, изменения температуры катализатора (рис. 1), описываются дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial q_{eff}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial T_{g*}} + \frac{\partial q_{eff}}{\partial T_{g*}} \frac{\partial T_{g*}}{\partial T} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial T_{g*}}{\partial T} = - \frac{\partial q_{eff} / \partial T}{\partial q_{eff} / \partial T_{g*}}.$$

В критических точках i и e , соответствующих каталитическому зажиганию и потуханию, выполняется условие Семенова $\partial q_{eff} / \partial T = 0$, и так как величина $\partial q_{eff} / \partial T_{g*}$ всегда положительна, то $\partial T_{g*} / \partial T = 0$. Вырождение критических и гистерезисных условий отвечает $\partial^2 T_{g*} / \partial T^2 = 0$.

При достижении температуры газа и температуры частицы катализатора критических значений (точка i , каталитическое зажигание) происходит скачкообразный переход на высокотемпературную ветвь. Дальнейшее увеличение температуры газа приводит к плавному росту температуры катализатора. Если на высокотемпературной ветви уменьшать температуру газа, то при достижении критических значений T_{g*} и T (точка e , каталитическое потухание) произойдет скачкообразный переход на низкотемпературную ветвь (см. рис. 1). Интервал $T_{g*,e} < T_{g*} < T_{g*,i}$ описывает влияние T_{g*} на критические значения начальной температуры, при которых начинается вынужденное каталитическое зажигание (гистерезисный режим) [3].

Исследование роли теплообмена излучением и диффузионно-кинетического отношения показало, что каталитическое зажигание происходит в кинетическом режиме, а горение — в диффузионном при пренебрежимо малом влиянии теплотерь излучением [4]. С учетом сказанного, применяя условие экстремума на зависимости 2, получены аналитические выражения для

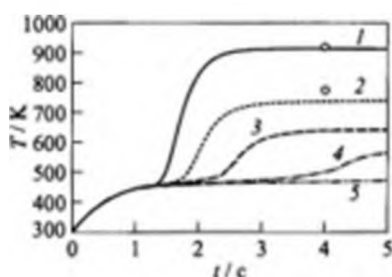


Рис. 2 Временные зависимости температуры частицы платинового катализатора при различных объемных концентрациях C_{av} для $T_{g*} = 456$ K, $T_w = 293$ K, $T_b = 293$ K: 1 — 5,2%; 2 — 3,1%; 3 — 2,0%; 4 — 1,3%; 5 — 1,0%; символы — экспериментальные данные для концентраций 3,1% и 5,2% [2]

критического условия каталитического зажигания газов на частице катализатора:

$$T_i = T_{g*} + \frac{RT_{g*}^2}{E}; \quad \alpha_{*i} = \frac{M_g}{M_a} \frac{\alpha(T_*)RT_{g*}^2}{Q_a C_{av} k(T_{g*}) \rho_g(T_{g*}) E} \Big|_i = e,$$

позволяющие провести анализ влияния размеров катализатора, температуры газовой среды и других условий вынужденного нагрева частицы и проволоки катализатора на критические значения концентрации горючего газообразного вещества, выше которого происходит его «зажигание», и на время задержки «зажигания».

Показано, что в режиме каталитического горения температура катализатора линейно увеличивается с ростом температуры газовой среды и содержания в ней горючего вещества (степень увеличения с ростом концентрации горючего связана с тепловым эффектом реакции):

$$T_m = T_{g*} + \frac{Q_a C_{av}}{c_g} \frac{M_a}{M_g}.$$

На рис. 2 приведены временные зависимости температуры катализатора (1) при каталитическом окислении аммиака для различных объемных концентраций на платиновой частице. Из рис. 2 видно, что существует такое значение концентрации активного компонента, при бесконечно малом увеличении которого наблюдается через некоторое время переход платинового катализатора на высокотемпературный режим, а при уменьшении — платиновый катализатор ведет себя, как инертный. Приведенные расчеты температуры каталитического горения дают хорошее согласование с экспериментальными данными Бубена [2] (стационарная температура 775 и 918 K при $T_{g*} = 456$ K, $C_{av} = 3,1\%$ и $5,2\%$), когда расчеты дают, соответственно, 738 и 916 K.

Полученная информация о закономерностях временных зависимостей диффузионно-кинетического отношения и температуры катализатора позволила определить аналитические выражения для времени задержки каталитического зажигания горючих газовых смесей на частицах катализатора. Установлены три характерные временные стадии.

Первая стадия характеризуется бесконечно малым химическим тепловыделением и диффузионно-кинетическим отношением. Длительность первой стадии найдена из решения дифференциального уравнения разогрева инертной частицы до температуры, отстоящей от точки срыва теплового равновесия на величину «предварительного» разогрева:

$$t_1 = \frac{V_c c_c \rho_c}{S_c \alpha(T_1)} \ln \left(\left| \frac{\theta_b}{\ln \alpha_* - 1} \right| \right); \quad \theta_b = \frac{T - T_{g*}}{RT_{g*}^2} E.$$

Следующая временная стадия характеризуется самоускорением экзотермической каталитической реакции, протекающей в кинетической области; диффузионно-кинетическое отношение увеличивается, но остается меньше единицы. Длительность этой стадии определена приближенно методом Франк-Каменецкого и стремится к бесконечности при приближении концентрации горючего компонента к критическому значению:

$$t_2 = \frac{V_c c_c \rho_c}{S_c \alpha(T_2)} \frac{C_{av,i}}{C_{av}} \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{1 - (C_{av,i}/C_{av}) - (1 - (C_{av,i}/C_{av}))^2}};$$

$$C_{av,i} = \frac{M_g}{M_a} \frac{\alpha(T_*) RT_{g*}^2}{Q_a C_{av} k(T_{g*}) \rho_g(T_{g*}) E} \frac{1}{e}.$$

Завершающая стадия характеризуется переходом реакции в глубокую диффузионную область и приближением температуры катализатора к стационарной теоретической температуре; диффузионно-кинетическое отношение становится значительно больше единицы. При точности достижения δ теоретической температуры каталитического горения T_m нами получено аналитическое выражение для длительности третьей стадии и для времени каталитического «зажигания» горючих газовых смесей на частицах катализатора:

$$t_3 = \frac{V_c c_c \rho_c}{S_c \alpha(T_3)} \ln \left(\frac{Q_a/c_g - RT_{g*}^2/E}{Q_a/c_g + T_{g*}} \frac{1}{\delta} \right).$$

Температуры T_1 , T_2 и T_3 — характерные температуры каждой из стадий.

Сумма времен первых двух стадий (время, которое обычно связывают с периодом индукции [2]) незначительно отличается от времени третьей стадии, что указывает на необходимость учета времени разогрева катализатора в диффузионной области протекания химической реакции до установившегося значения температуры для определения периода индукции.

Литература

1. Смирнов П. В., Беляев В. Д., Собижин В. А. Кинетическая модель и механизм селективного окисления СО в присутствии водорода на платиновых катализаторах // Кинетика и катализ, 2007. Т. 48. № 1. С. 100-109.
2. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. 491 с.
3. Ассовский И. Г. О зажигания, погасании и тепловом гистерезисе гетерогенной экзотермической реакции // ФГВ, 1998. Т. 34. № 34. С. 51-57.
4. Калинин В. В., Черненко А. С., Софронков А. Н. Высокотемпературные и гистерезисные режимы каталитического окисления горючих газовых смесей на твердых катализаторах // Inżynieria procesowa w ochronie środowiska. — Opole, 2008. С. 113-126.

Содержание

Физическая и химическая кинетика, фазовые превращения и неравновесные процессы, гетерогенный катализ	19
Развитие технологии сверхтвердых материалов <i>Н. В. Новиков, В. З. Туркевич</i>	21
О. И. Лейпунский — алмазная проблема и ее развитие <i>В. И. Пепекин</i>	25
Термодинамический метод определения характеристик наночастиц <i>В. А. Бабук, А. Д. Зеликов, Р. М. Салимуллин</i>	33
Исследование кинетики полиморфного превращения $\beta \rightarrow \delta$ в октогене методом изотермической калориметрии <i>В. В. Захаров, Б. Л. Корсунский</i>	42
Катализирующая роль подвижных дефектов в твердофазных цепных процессах <i>А. М. Каплан, Н. И. Чекунаев</i>	49
Исследование влияния растворенных газов на кинетику окисления дисперсного титана <i>Н. Х. Копыт, Т. П. Садмий, Л. Г. Милова, Н. Н. Копыт, В. В. Калинин, А. В. Дрозденко</i>	62
Особенности применения адиабатической калориметрии для исследования кинетики химических реакций <i>А. А. Коссои, И. Я. Шейнман</i>	72
Влияние ассоциации реагентов на кинетику реакций синтеза и разложения взрывчатых веществ <i>Т. П. Кулагина, Л. П. Смирнов</i>	78
Образование ионизированной конденсированной дисперсной фазы вокруг высокотемпературной металлической частицы <i>Л. А. Лялин, К. И. Семенов, Н. Х. Копыт</i>	89
Процесс детонации как разветвленная цепная реакция. Вычисление скорости и давления детонации в конденсированном состоянии при теоретической плотности <i>А. В. Поздняков</i>	99
Особенности свойств джозефсоновских слабых связей с ангармонической ток-фазовой зависимостью <i>Д. М. Сергеев, К. Ш. Шункеев</i>	111

Длинномерные минералокерамические изделия с наноразмерной структурой, полученные СВС-экструзией <i>П. М. Бажин, А. М. Столин</i>	121
Роль эффектов Яна–Теллера и Реннера–Теллера в кинетике и механизме реакций неперелых углеводов и их фторпроизводных <i>И. В. Билера, Ю. А. Борисов, Н. Н. Буравцев, Ю. А. Колбановский</i>	125
К описанию состояния углерода за фронтами ударных и детонационных волн <i>И. М. Воскобойников</i>	132
Механизмы влияния высокого давления на скорость мономолекулярной химической реакции <i>Ю. М. Буров</i>	137
Механизм связанных реакций и предел самовоспламенения газовой смеси <i>В. М. Гендугов, Н. Ф. Назаров, Е. В. Рябокобыленко</i>	143
Критические условия и период индукции поверхностного горения газов на частицах катализатора <i>В. В. Калинин, А. Н. Софронков, А. С. Черненко, А. А. Мойса, А. А. Головки</i>	147
Механохимическое регулирование процесса технологического горения — создание композиционных систем различного структурного уровня <i>Н. Н. Мофа, Т. А. Шабанова, В. И. Антонов, З. А. Мансуров</i>	153
Возбуждение акустических колебаний при конденсации пара на каплях жидкости в парогазовой смеси <i>В. Р. Песочин</i>	159
Электрические колебания в зоне горения пылевого пламени <i>Н. И. Полетаев</i>	164
О связанных состояниях позитрона на вакансиях и порах в металлах <i>Е. П. Прокопьев, В. И. Графутин, С. П. Тимошенко</i>	169
Колебательная неравновесность в реакции водорода с кислородом <i>О. В. Скребков</i>	174
Термохимическая кинетика гетерогенных процессов в порошковых системах различной физико-химической природы <i>В. П. Солнцев, В. В. Скороход, Т. А. Солнцева</i>	180
Кинетическая модель окисления бензола <i>Н. С. Титова, С. А. Торохов, А. М. Старик</i>	185
Инициирование и распространение волн в реагирующих системах	191
Поперечные волны при детонации <i>С. С. Рыбанин, Ю. М. Михайлов</i>	193

Нестационарное горение газов и жидкостей в объемах с ограниченной вентиляцией	
<i>Г. М. Махвиладзе, С. Е. Якуш</i>	198
Газодинамические эффекты взрыва в помещении	
<i>А. Г. Гирин, Н. Х. Копыт</i>	204
Горение азидоэтанола, загущенного полимерами	
<i>В. В. Головкин, А. К. Копейка, А. В. Флорко</i>	214
Влияние нанодисперсного кремнезема на алюмотермическое горение оксида хрома (III) в режиме СВС	
<i>Е. Е. Дильмухамбетов, С. М. Фоменко</i>	221
Квазистационарное распространение волны горения в газовых смесях	
<i>Р. Ш. Еналеев</i>	228
Об условиях самовозбуждения пульсационного режима горения открытого факела пропан-бутановой смеси	
<i>М. Ю. Трофименко, С. К. Асланов, В. В. Калинин</i>	236
Теория горения при исследовании структуры и скорости распространения фронта полимеризации в пористой среде наполнителя	
<i>Г. В. Шкадинская, П. Е. Матковский, К. Г. Шкадинский</i>	242
Точечный взрыв в запыленном воздухе	
<i>А. Г. Гирин</i>	247
Механизм распространения фронта реакции в смеси $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 30\% \text{Al}_2\text{O}_3$	
<i>Б. С. Сеплярский, Г. Б. Брауэр, А. Г. Тарасов</i>	252
Фильтрационное и гетерогенное горение	255
Проблема Саффмана–Тэйлора в фильтрационном горении	
<i>А. П. Алдушин, Б. Ш. Браверман</i>	257
Газификация пористых частиц углерода в двуокиси углерода	
<i>В. М. Гремячкин, Е. П. Мазанченко</i>	263
Устойчивость стационарного фронта фильтрационного горения пористых составов квазидвумерной геометрии	
<i>П. М. Кришеник, Н. И. Озерковская, А. Н. Фирсов, К. Г. Шкадинский</i>	268
Влияние стефановского течения на характеристики воспламенения и горения частиц тугоплавких металлов	
<i>С. Г. Орловская, Ф. Ф. Каримова, М. С. Шкоропато</i>	274
Определение времени горения частиц горючего в осесимметричном ламинарном факеле	
<i>Н. И. Полетаев</i>	281

Влияние параметров пылевого факела частиц металлов на дисперсные характеристики продуктов сгорания <i>Н. И. Полетаев, Ю. А. Дорошенко</i>	286
Нейтрализация хлора соединениями кальция непосредственно при газификации твердого топлива <i>М. В. Цветков, Е. В. Полианчик</i>	292
Перспективы использования процесса фильтрационного горения для извлечения металлосодержащих продуктов из нетрадиционного сырья <i>И. Ю. Гудкова, Д. Б. Лемперт, Г. Б. Манелис</i>	296
Область существования волны фильтрационного горения в шихте с малым содержанием горючего. Расчет и эксперимент <i>И. И. Амелин, Е. А. Салганский, Н. Н. Волкова, Е. В. Полианчик, Г. Б. Манелис</i>	300
Основные подходы к математическому моделированию физико-химических процессов, происходящих при фильтрационном горении систем, содержащих соединения металлов <i>Г. Е. Заславский, Г. Б. Манелис</i>	304
Разделение зон превращения твердых топлив при фильтрационном горении <i>Е. А. Салганский, В. М. Кислов, С. В. Глазов, Е. В. Полианчик, М. В. Салганская, Г. Б. Манелис</i>	310
Пространственная устойчивость неадиабатических волн фильтрационного горения газов <i>М. М. Кабилов</i>	314
Исследование процессов энерго- и массообмена угольной частицы в высокотемпературной окислительной среде <i>С. Г. Орловская, Л. И. Рябчук, В. В. Калинин, С. К. Протас</i>	320
Энергоемкие материалы и внутренняя баллистика	323
Исследования нестационарного горения порохов и твердых ракетных топлив и лаборатория О. И. Лейпунского <i>А. Г. Истратов, В. Н. Маршаков</i>	325
Вопросы повышения энергетики энергоемких нанокмполитов <i>И. Г. Ассовский, А. А. Берлин</i>	335
Горение фуразанов и фуруксанов <i>В. П. Синдицкий, В. Д. Хэ, М. К. Ву, В. В. Серушкин, В. Ю. Егоршев, А. Б. Шереметев, Н. Н. Махова, Н. С. Александрова, А. С. Куликов</i>	339
Горение частиц алюминия <i>В. М. Гремячкин, А. Г. Истратов</i>	344

Термодинамические аспекты возможности создания ракетных топлив с углекислым газом в качестве окислителя <i>Е. М. Дорофеев, Д. Б. Лемперт, Г. Б. Манелис</i>	349
О сохранности свойств штатных взрывчатых веществ по результатам выборочного контроля качества и безопасности заводских партий продукции с длительными сроками хранения <i>С. И. Кашаев, И. З. Ахметов, Р. Х. Габдуллин, В. П. Ильин, В. В. Судаков, Ф. Т. Хворов</i>	355
О возможности создания сверхплотных смесевых твердых ракетных топлив с плотностью выше 2,2 кг/л <i>Д. Б. Лемперт, Г. Н. Нечипоренко, Г. Б. Манелис</i>	361
Эффект раздувания в твердотопливном ракетном двигателе <i>В. Н. Маршаков, Б. В. Новожилов</i>	369
Агломерация алюминия при горении смесевых твердых ракетных топлив: от микроструктуры к горению <i>С. А. Рашковский</i>	377
Энергетические наноматериалы и энергетические конденсированные системы <i>Ю. В. Фролов, И. В. Фоменков</i>	383
Влияние каталитических добавок на характеристики горения металлизированных твердых топлив <i>В. А. Архипов, И. С. Беспалов, Т. И. Горбенко, Л. А. Савельева</i>	388
Возможность окисления алюминия в детонационной волне <i>И. М. Воскобойников</i>	394
Сравнение нано- и микрооксидов железа для катализа горения смесевых твердых ракетных топлив <i>П. Донега, А. Бандера, А. Рейна, Дж. Коломбо, Ф. Магги, Л. Т. ДеЛюка, Б. М. Косовски</i>	398
Характеристики горения частиц алюминия при широкой вариации размеров частиц <i>А. А. Зенин, Г. П. Кузнецов, В. И. Колесников</i>	402
Новые термитные смеси на основе нанопорошков алюминия <i>А. П. Ильин, Л. О. Толбанова, Ю. А. Амелькович, А. В. Мостовщиков</i>	406
Влияние образования двух оксидов на характеристики высокотемпературного тепломассообмена металлической частицы <i>В. В. Калинин, А. С. Черненко</i>	411
Организация внутрикамерных процессов в низкотемпературных газогенераторах на основе математического моделирования <i>В. В. Кириллов</i>	416

Одномерные, двумерные и пространственные модели газофазного зажигания жидких конденсированных веществ локальными источниками энергии <i>Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак</i>	419
Два основных пути повышения энергетики смесевых твердых ракетных топлив — повышение тепловыделения и оптимизация состава продуктов сгорания <i>Д. Б. Лемперт, Г. Н. Нечипоренко, Г. Б. Манелис</i>	424
О температурной чувствительности скорости горения баллистических порохов <i>В. Н. Маршаков, В. М. Пучков, С. В. Финяков</i>	431
Влияние дисперсности компонентов на горение энергетических конденсированных систем на основе октогена и алюминия <i>Н. В. Муравьев, Ю. В. Фролов, А. Н. Пивкина, К. А. Моногаров, Д. Б. Мееров, Д. А. Иванов, О. С. Орджоникидзе</i>	435
Моделирование процессов воспламенения и горения твердых топлив с учетом контактных фазовых переходов и химической кинетики в пограничном слое <i>А. В. Михайлов</i>	439
Термокинетическое моделирование процесса разложения октогена <i>А. Н. Пивкина, Ю. В. Фролов, О. С. Орджоникидзе</i>	443
Математическое моделирование разложения взрывчатых веществ <i>Л. П. Смирнов, Т. П. Кулагина</i>	447
Взаимодействие излучения с веществом	453
Развитие работ по спектрометрии реакторных нейтронов <i>В. А. Камнев, Е. А. Крамер-Агеев, В. С. Трошин</i>	455
Интегрально-кодированные системы измерений с кодирующими коллиматорами на основе расширенных псевдослучайных последовательностей <i>Г. А. Федоров, С. А. Терещенко, М. А. Антаков</i>	459
Радиационная стойкость полевого датчика Холла <i>А. Д. Мокрушин, В. Н. Мордкович</i>	469
Лазерное инициирование взрывного разложения смеси тетранитропентаэритрита и наночастиц Ni–C <i>Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, А. В. Пузынин</i>	479
Моделирование взаимодействия электроразрядной плазмы с конденсированным реакционноспособным веществом <i>В. В. Буржин, Р. С. Буркина</i>	488
Инициирование взрывного разложения кристаллов тетранитропентаэритрита электронным пучком <i>Б. П. Адуев, Г. М. Белокуров, С. С. Гречин, А. В. Пузынин</i>	494

Снижение точки плавления веществ в потоке высокоэнергетических электронов	
<i>Г. Т. Афанасьев, В. Г. Кириленко, В. И. Пепкин, Ю. Ф. Томащук</i>	503
Влияние зависимости коэффициента поглощения от температуры на условие зажигания конденсированного взрывчатого вещества лазерным импульсом	
<i>Е. В. Дугинов, А. В. Ханефт</i>	507
Исследование условий искрового зажигания промышленного порошка алюминия в трубопроводе с внезапным расширением	
<i>А. Г. Егоров, А. И. Сафронов, В. И. Зоткин, С. В. Иванов</i>	511
Зажигание смеси (нанопорошок алюминия + оксид железа) импульсным лазерным излучением	
<i>В. В. Медведев, А. П. Ильин, Г. Кутюрье, А. В. Мостовицков, Л. О. Толбанова</i>	515
Влияние концентрации кислорода в окружающей атмосфере на пороги зажигания баллистического топлива при воздействии импульсного лазерного излучения	
<i>В. В. Медведев</i>	519
Гетерогенный механизм разложения и низкопорогового инициирования азидов тяжелых металлов лазерным импульсом	
<i>А. В. Ханефт</i>	522
Модель влияния подложки на инициирование PETN лазерным импульсом	
<i>А. В. Ханефт, Е. В. Дугинов</i>	528
Воздействие излучения на человека, дозиметрия и защита от излучения	533
Изменения в генетическом аппарате клеток при действии ионизирующей радиации в малых дозах	
<i>Т. М. Заварыкина, Г. П. Жижина, Е. Б. Бурлакова</i>	535
Использование термолюминесцентных детекторов для изучения распределения поглощенных доз при проведении рентгенорадиологических исследований пациентов	
<i>Н. Л. Алужер, Е. В. Ягодина</i>	544
Прогнозирование теплового поражения человека при высокоинтенсивном нагреве	
<i>Р. Ш. Еналеев, Э. Ш. Теляков, Г. М. Закиров, В. А. Качалкин</i>	551
Математическая модель поражения человека тепловым излучением	
<i>Р. Ш. Еналеев, Э. Ш. Теляков, А. М. Закиров, Г. М. Закиров, В. А. Качалкин</i>	557

Прочность и долговечность материалов, радиационные проблемы материаловедения	563
О прочности и долговечности элементов энергоемких материалов <i>И. Г. Ассовский, А. Г. Истратов, О. А. Кудрявцев</i>	565
Электронно-микроскопическое исследование возникновения трещин на границе раздела связующее–волокно <i>Ю. А. Горбаткина, А. Я. Горенберг, Д. А. Горенберг, В. Г. Иванова-Мумжиева</i>	571
Разрушение элементов строительных конструкций при высокоинтенсивном нагреве <i>Р. Ш. Еналеев, Э. Ш. Теляков, О. Ю. Харитонова, О. А. Тучкова</i>	579
Применение технологии СВС для кондиционирования отходов облученного графита с фрагментами реакторных конструкций <i>О. К. Карлина, Г. Ю. Павлова, В. Л. Климов, С. А. Дмитриев, Б. Г. Трусов</i>	584
Моделирование формирования интерметаллидных фаз в поверхностном слое при ионной имплантации <i>А. Г. Князева</i>	590
Влияние подвижных дефектов на прочность полимерсодержащих материалов и на инициирование безгазового цепного пламени <i>А. М. Каплан, Н. И. Чекунаев</i>	596
Механические свойства синтетического кальциевого алюмосиликатного монолита <i>А. Д. Червонный, Н. А. Червонная, Н. П. Кобелев</i>	602
Термодинамическое моделирование горения радиоактивного графита <i>Н. М. Барбин, Д. И. Терентьев, С. Г. Алексеев</i>	609
Учет внутренних механических напряжений и неравновесной активации сплавов при их модификации электронным пучком <i>А. Г. Князева, А. В. Тяп</i>	612
Методы и критерии оценки безопасной утилизации топливных элементов энергетических установок <i>А. В. Поздняков, С. Н. Вагичев, А. В. Литвинов</i>	617
Author Index	621