



POLITECNICO di MILANO  
DIPARTIMENTO di ENERGETICA

**International Workshop on  
ERRORS AND NOISE IN ENERGETIC MATERIAL  
COMBUSTION EXPERIMENTS**

**15–16 March 1999, Milan**

**Chairman:** Prof. Luigi De Luca, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano

**International Advisory Committee:**

Prof. F. E. C. Culick, California Institute of Technology, Pasadena, USA

Prof. B. V. Novozhilov, Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia

Dr. R. Pein, DLR German Aerospace Center, Hardthausen, Germany

Prof. V. E. Zarko, Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Novosibirsk, Russia

**Международный семинар  
«ОШИБКИ И ШУМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ГОРЕНИЮ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ»**

**15–16 марта 1999 г., Милан**

Миланский технический университет, Отдел энергетики

**Председатель:** проф. Л. Т. Де Лука

**Международный оргкомитет:**

проф. Ф. Е. К. Кулик (США), проф. Б. В. Новожилов (Россия),

докт. Р. Пайн (Германия), проф. В. Е. Зарко (Россия)

Настоящий выпуск журнала ФГВ посвящен в основном материалам международного семинара «Ошибки и шумы в экспериментах по горению энергетических материалов», состоявшегося 15–16 марта 1999 г. в Миланском техническом университете. Это был третий семинар в серии, посвященной вопросам диагностики горения современных энергетических материалов («Нестабильность горения твердых топлив» 1997 г., «Измерение теплофизических и баллистических характеристик энергетических материалов» 1998 г.).

Международные семинары по горению твердых топлив и реактивному движению регулярно проводятся в Милане под руководством проф. Л. Т. Де Луки в течение ряда последних лет, начиная со второй половины 80-х годов. Удобное географическое положение и обширные научные связи итальянских исследователей обеспечили условия для выбора Милана в качестве места для работы своеобразного клуба специалистов в данной области науки о горении. Необходимо отдать должное хозяевам семинара, которые даже в трудные времена глобального противостояния оказались в состоянии эффективно поддерживать сотрудничество и научное общение между западными и российскими учеными. Характерной приметой Миланских семинаров стала свободная и непринужденная атмосфера научных дискуссий, высокий профессиональный уровень которых обусловлен тщательным подбором участников по критериям научной компетентности и творческой активности. Вместе с тем затраты на проведение семинаров сведены к минимуму, чтобы обеспечить более полное представительство специалистов из разных стран. Участники семинара с энтузиазмом откликнулись на предложение редколлегии журнала «Физика горения и взрыва» издать специальный выпуск, основанный на материалах докладов, представленных в 1998–1999 гг. (Отметим, что материалы семинара 1997 г. частично опубликованы в специальном выпуске журнала “Propulsion and Power”, № 6 за 1999 г., посвященном памяти проф. М. Саммерфилда).

Цель семинара 1999 г. состояла в обсуждении проблем регистрации и анализа результатов при измерениях параметров горения энергетических материалов. Специальное внимание было уделено формулировке методических приемов, позволяющих избежать или минимизировать погрешности измерений различными способами. Предыдущие семинары, в частности семинар 1998 г., показали, что даже в относительно простых методиках измерений имеются источники шумов и погрешностей за счет электрических, акустических, структурных и феноменологических факторов. Вместе с тем существуют настоятельные теоретические и практические потребности в точном знании теплофизических и баллистических свойств как известных, так и, особенно, вновь разрабатываемых энергетических материалов и твердых топлив на их основе.

В этом номере журнала публикуются 16 статей, посвященных различным проблемам исследования свойств энергетических материалов. Теоретический анализ чувствительности расчетных критериев стабильности горения твердых топлив к экспериментальным погрешностям дан в статье Б. В. Новожилова. Результаты расчетов таких критериев на основе данных, полученных термодинамической методикой, представлены в статье А. А. Зенина и С. В. Финякова. Оценка погрешностей контактных методов измерения концентрации и температуры сделана в статье Р. Пайна.

Детальный анализ особенностей метода измерения реактивной силы в применении к оценке чувствительности скорости горения к возмущениям внешнего потока излучения дан в статье Ф. Коцци с соавторами и в двух статьях А. Б. Кискина с соавторами. Отмечены трудности прямого перевода величины сигнала реактивной силы в значения нестационарной скорости горения, намечены пути повышения точности инструментальной методики.

Методам измерения квазистационарной скорости горения посвящены работы Ф. Коти, Ч. Ерейдеса (ультразвуковая методика), В. Е. Зарко с соавторами и А. С. Жаркова с соавторами (микроволновая методика). Обращено внимание на необходимость тщательного изучения влияния давления и температуры на микрофизические характеристики исследуемых материалов, от которых зависят скорости распространения звуковой и электромагнитной волн по веществу.

Подробное обоснование способа определения скорости горения твердого топлива по записям давления в модельных и натурных двигателях дано в двух статьях Р. Хесслера и Р. Глика. Проблема конвективного зажигания твердого топлива анализируется в статье Л. Галфетти с соавторами.

Вопросам исследования особенностей горения индивидуальных компонентов твердых топлив посвящены четыре работы. Химическим аспектам горения и разложения динитрамида аммония посвящена статья А. Л. Рамасвами, перхлората аммония — статья В. Вейше и Дж. Венограда, нитрата гидроксиламмония — статья Б. Н. Кондрикова с соавторами. Методические аспекты исследования агломерации порошкообразного алюминия при горении смесевых твердых топлив анализируются в статье О. Г. Глотова с соавторами. Из-за ограниченности объема журнала и в связи с различной степенью подготовленности материалов для печати тематика публикуемых статей не столь широка, как это было представлено на семинаре. Тем не менее можно надеяться, что опубликованные материалы окажутся полезными для широкого круга специалистов по горению. Следует подчеркнуть, что потребность в дальнейшем развитии экспериментальных методов исследования свойств энергетических материалов остается актуальной и в настоящее время. Решение этой задачи требует объединения усилий специалистов различного профиля и соответствующих ресурсов.

В заключение необходимо выразить благодарность спонсорам семинаров — исследовательским отделам Министерства обороны США в Лондоне (ERO, EOARD, ONR), Итальянскому научному фонду Карипло (Landau Network Centro Volta) и Техническому университету Милана (Dipartimento di Energetica).

Редакторы выпуска В. Е. Зарко и Л. Т. Де Лука

## ОБ АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАНСЕ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХОВ

Б. В. Новожилов

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

Обсуждается влияние ошибок исходных данных, необходимых для предсказания условий устойчивости работы твердотопливного ракетного двигателя, на точность прогноза границы устойчивости. Показано, что в связи с резонансной зависимостью отклика нестационарного горения от частоты гармонически меняющегося давления малые вариации характеристик стационарного режима горения пороха приводят к большим изменениям нестационарного отклика. На примере простейшей задачи акустической неустойчивости двигателя исследована связь ошибок измерения исходных данных с точностью прогноза устойчивости. Подчеркивается, что при современной точности измерений параметров стационарного режима горения пороха прогноз устойчивости двигателя при некоторых реальных условиях его работы практически невозможен.

### ВВЕДЕНИЕ

Теория нестационарного горения пороха, как и любая другая физико-химическая теория, предполагает наличие входных экспериментальных данных. В современном варианте нестационарная теория (известная как теория Зельдовича — Новожилова [1–3]) требует достаточно детальной информации о свойствах стационарного режима горения пороха. Необходимы, в частности, зависимости скорости горения и температуры поверхности от давления и начальной температуры. И вполне естественно, что точность результатов, вытекающих из нестационарной теории, непосредственно связана с погрешностью измерения исходных экспериментальных данных, относящихся к стационарному режиму горения.

В большинстве случаев, как и в других областях науки, точность результатов теории по порядку величины совпадает с точностью величин, являющихся исходными для теории. Однако, если существует сильная функциональная зависимость между исходными и конечными величинами, ошибка результата теории может во много раз превышать ошибку исходной величины. Простейшим примером может служить аррениусовская зависимость скорости химической реакции от температуры

$$W \sim \exp(-E/RT),$$

где  $E$  — энергия активации,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура. В случае сильно активированной реакции, когда  $E/RT \gg 1$ , относительная погрешность скоро-

сти реакции во много раз превышает погрешность определения энергии активации:

$$\frac{\Delta W}{W} \sim \frac{E}{RT} \frac{\Delta E}{E}.$$

При исследовании горения пороха при гармонически меняющемся давлении [4, 5] оказалось, что амплитуда скорости горения пороха резонансным образом зависит от частоты изменения давления. Это связано с тем, что горящий при постоянном давлении порох представляет собой колебательную систему с определенной собственной частотой. Воздействие вынуждающей силы (меняющееся давление) с частотой, близкой к собственной частоте пороха, естественно, приводит к резонансу. Многочисленные экспериментальные исследования (см., например, обзоры [6, 7]) показывают, что акустический резонанс выражен довольно ярко. Следствием этого является сильное изменение нестационарного отклика скорости горения на осциллирующее давление при небольшом изменении характеристик стационарного режима горения пороха. Очевидно, что погрешности измерения этих величин будут существенно сказываться на точности расчета нестационарных явлений вблизи резонанса.

Настоящая работа состоит из двух частей. В первой части напоминаются теоретические результаты для функций линейного отклика скорости горения пороха, температуры и скорости его продуктов горения на гармонически меняющееся давление. Приведена связь этих функций друг с другом. Показана сильная зависимость резонансных характеристик от па-