

УДК 662.311.1+662.215.1+623.52

А. И. ЛЕСНИКОВИЧ

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЕМ И КОЭФФИЦИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ В ЗАКОНЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

Показатель ( $v$ ) и коэффициент ( $\beta$ ) давления ( $p$ ), входящие в аппроксимационный закон скорости ( $u$ ) горения

$$u = \beta p^v, \quad (1)$$

характеризуют устойчивость горения и некоторые другие важные эксплуатационные свойства твердых топлив [1—3], в связи с чем проблеме регулирования  $\beta$  и  $v^*$  уделяется много внимания [1—4]. В этом аспекте представляет интерес и отрицательная линейная корреляция между  $\lg \beta$  и  $v$ :

$$\lg \beta = a - bv, \quad (2)$$

которая установлена путем статистического анализа экспериментальных данных по зависимости скорости горения от давления для различных ВВ и смесей [5, 6].

В настоящей работе дана интерпретация соотношения (2) с учетом корреляционного характера его и в общем виде рассмотрено решение с помощью этого соотношения некоторых задач из области регулирования скорости горения и показателя давления. Целесообразность использования для этих целей корреляционных соотношений определяется сложностью явления горения конденсированных систем, разнообразием влияния многочисленных факторов на этот процесс, охватить которые в рамках единой строгой теории не удается.

Простыми приемами аналитической геометрии и элементарными преобразованиями можно показать, что условие (2) требует, чтобы в координатах  $\lg u$  —  $\lg p$  прямые

$$\lg u = \lg \beta + v \lg p \quad (3)$$

давали пучок с центром  $\lg p = b$ ,  $\lg u = a$ . В силу корреляционного характера соотношения (2) точки пересечения прямых (3) не совпадают, однако, все эти прямые проходят через некоторую небольшую область в окрестности указанного выше центра пучка. Размеры этой области определяются предельными отклонениями величин  $a$  и  $b$ . При статистических расчетах с некоторой доверительной вероятностью можно использовать стандартные отклонения. Значения стандартных отклонений для ряда горючих конденсированных систем (ГКС) приведены в [5].

Корреляционный характер придает еще одну особенность соотношению (2) — большую, чем у аналогичной функциональной зависимости, общность, так как этим соотношением могут охватываться не только слу-

\* Коэффициент  $\beta$  численно равен экстраполированной к  $p=1$  скорости горения;  $v = \partial \ln u / \partial \ln p$ .

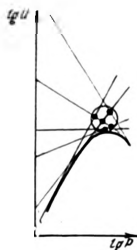


Рис. 1. Упрощенное представление центра пучка в виде круга, через который проходят все касательные к кривой, изображающей нелинейную зависимость  $\lg u = f(\lg p)$ . В пределах круга пересекается лишь часть касательных (зачерненные точки)

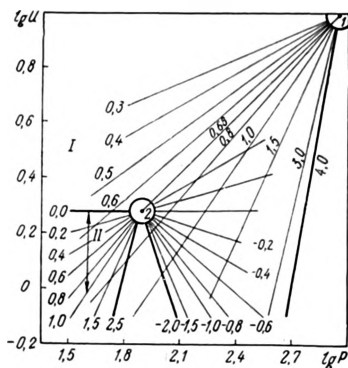


Рис. 2. Схема корреляционных пучков для ПХА и смесей на его основе:

Пучок 1 соответствует зависимости (5); 2 — (6); у прямых указаны значения  $v$ , пределы изменения которых для пучков и их областей I и II согласованы с экспериментальными данными [4]

чан, для которых соблюдается закон скорости горения (1), (3), но, как это видно из рис. 1, и случаи нелинейной зависимости  $\lg u = f(\lg p)$  или аппроксимации этой зависимости несколькими прямыми. Однако по этой же причине расчеты с применением (2) имеют не однозначный, а вероятностный характер: их точность зависит от значения коэффициента корреляции. Действительно, как легко видеть из схем, подобных приведенной на рис. 1, вследствие некоторой неопределенности положения центра пучка, точка пересечения отдельных прямых может находиться за пределами области, определяемой отклонениями величин  $a$  и  $b$ , и соответствующие этому факту изменения в характере взаимосвязи между  $u$  и  $v$  окажутся в пределах точности зависимости (2) для данной серии смесей.

В более общем виде связь между  $\beta$  и  $v$  можно представить, используя относительную (безразмерную) скорость ( $z = \frac{u}{u_0}$ ; индекс 0 относится к смеси, принятой за стандарт). Как следует из (1) и (2),

$$\lg \beta_z = b(v_0 - v), \quad (4)$$

где  $\beta_z = \frac{\beta}{\beta_0} (\beta_z^{-1} \frac{1}{v_0 - v})$  имеет размерность давления).

Очевидно, что (4) также является условием, в соответствии с которым прямые в координатах  $\lg z - \lg p$  образуют пучок, а сделанные выше замечания о точности относятся и к этому выражению.

Таким образом, выполнение для серии смесей соотношения (2), или его более общей формы (4), определенным образом ограничивает возможные значения скорости горения при некотором  $v$  (или  $\beta$ ) и заданном  $p$  и, наоборот, — значения  $v$  (или  $\beta$ ) при некоторой скорости  $u$ , в соответствии с чем эти значения могут оцениваться с помощью указанных соотношений и (1). Отмеченное ограничение состоит из двух противоположно влияющих на точность расчета частей — аналитической (2), (4) и статистической, которые можно отобразить в виде пучка спрямленных в соответствующих координатах зависимостей скоростей горения смесей от давления, центр которого стохастически размыт. Последнее обстоя-

тельство, придавая большую общность (2) и (4), ограничивает точность расчетов. Эта точность определяется при статистической обработке экспериментальных данных. Полученные интервалы изменения расчетных величин могут быть сужены, при данном коэффициенте корреляции, за счет уменьшения доверительной вероятности.

Вследствие корреляционного характера соотношений (2), (4) необходимо использование четких статистических критериев для определения результатов, отклонения которых превышают случайные ошибки. Как отмечено в работах [5, 6], такие отклонения имеют место, и они представляют особый интерес, так как указывают на специфические особенности горения соответствующих представителей данного типа смесей. В частности, при выполнении (2) изменение показателя давления можно связать с изменением относительной роли процессов, протекающих в конденсированной и газовой фазах при горении [6], в то время как отклонения от (2) или реализации этой зависимости с другими значениями  $a$  и  $b$  свидетельствуют о существовании иных причин изменения  $v$ , а следовательно, и иных путей воздействия на эту величину. Осмысленная реализация этих путей зависит от понимания физического содержания соотношений (2), (4) и констант  $a$  и  $b$ . В рамках простых известных моделей горения это содержание раскрыто в работах [5, 6], благодаря чему можно выявить факторы, существенно влияющие на  $a$  и  $b$  (энергия активации и максимальная температура реакции), а также на  $a$  через экспоненту, и предэкспоненты в уравнениях Аррениуса и Клайперона — Клаузиуса, способные изменяться на несколько порядков.

На примере смесей на основе широко применяющегося окислителя — перхлората аммония (ПХА) рассмотрим две задачи по регулированию скорости горения и показателя давления и схемы их решения (детальное решение требует отдельного рассмотрения). Задачи выбраны с учетом их значимости и возможности проиллюстрировать решение их с помощью соотношений (2), (4) для случаев, когда эти соотношения выполняются и когда имеются существенные отклонения от них.

1. Для ПХА-смесей \* в очень широком интервале изменений  $\beta$  и  $v$  выполняются две линейные зависимости [5]:

$$\lg \beta = 0,996 - 2,944v; \quad (5)$$

$$\lg \beta = 0,280 - 1,895v. \quad (6)$$

Соответственно двум различным значениям констант  $a$  и  $b$  имеются два (1 и 2) пучка прямых (3), схематично представленных на рис. 2 для выбранных значений  $v$ . В силу того, что центры пучков, как отмечалось выше, размываются (круги на рис. 1—3), каждому значению  $v'$  отвечает не одна скорость горения, а любое ее значение, заключенное в интервале  $\Delta \lg u$  (рис. 3); и, наоборот, определенному значению скорости  $u_1$  при данном давлении  $p_1$  отвечает набор  $v$ , заключенных в интервале от  $v''$  до  $v'''$ . Поэтому с помощью (1), (4) можно провести точный расчет лишь предельных значений скорости (или  $z$ ) горения или показателя давления при данных  $v$  и  $u$  (или  $z$ ) соответственно. Такой расчет дает возможность решить практически важный вопрос о достижимых уровнях скорости горения при заданном показателе давления и, наоборот, а также о предельных возможностях уменьшения ( $v=1$ ) и увеличения ( $v=0$ ) скорости горения в данной серии смесей \*\*. Схематическое (без учета размытия центров пучков) пояснение сказанному дано на рис. 2, где в представляющей для практики наибольший интерес области II пучка 2 пределы изменения скорости горения при  $p=40$  ат отмечены стрелкой. Особенность ПХА-смесей состоит в том, что область II может перекрываться с областью I корреляционной зависимости (5), которой соответ-

\* Численные значения здесь и в [5] соответствуют размерностям использованных лабораторных данных:  $[u] = \text{с/см}^2\text{с}$ ,  $[p] = \text{ат}$ .

\*\* Указанные значения  $v$  взяты в качестве предельных на том основании, что реально достижимые значения этого показателя близки к нулю, а устойчивое горение в двигателях возможно при  $v$ , не превышающем единицу [1].

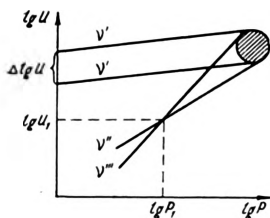


Рис. 3. Интервалы изменения  $\lg v$  при  $v = v'$  и изменения  $v$  (от  $v''$  до  $v'''$ ) при  $u = u_1$  и  $p = p_1$  в случае выполнения корреляции (2). Заштрихован размытый центр пучка

При этом будем учитывать, что переход к смесям с измененным составом окислителя сопровождается изменением кинетических констант, о которых говорилось выше, а следовательно, также  $a$  и  $b$ , или же невыполнением условия (2). При таком переходе  $v$  может уменьшаться не только с ростом скорости горения, что характерно при выполнении (2), но и без изменения или с уменьшением ее. По закону Рауля — Генри на поверхности горения давление паров окислителя, содержащего труднолетучий компонент — перхлорат калия, будет меньше по сравнению с системой, содержащей чистый ПХА, что соответствует уменьшению  $b$  за счет  $k$ -фазной составляющей скорости горения [5, 6], т. е. смещению корреляционного пучка к оси ординат (рис. 2). При приблизительно неизменном для данного внешнего давления уровне скорости горения это отвечает росту  $v$ ; увеличение скорости горения будет противодействовать росту  $v$ , а уменьшение — способствовать. Такое изменение  $v$  находится в соответствии с данными эксперимента [3].

В заключение необходимо подчеркнуть, что зависимости (2), (4) представляют интерес главным образом в силу того, что они дают определенную связь между  $\beta$  и  $v$  не только для одной смеси, но и для разных по составу смесей на основе одного и того же окислителя. Однако при значительных изменениях состава \* корреляция может существенно ухудшиться. Изменения в механизме горения, вызванные изменением внешних условий (давления), природы основных компонентов смеси (окислителя) и, в редких случаях, рассмотренных в [5, 6], природы вводимых добавок, приводят к другой конкретной форме зависимости (2). Поэтому соотношение (2) может быть основой классификации смесей на серии, в пределах которых сохраняются определенные особенности горения. Достоверность расчетов с применением (2) для таких серий, в силу неизменности механизма горения в пределах серии (при определенных внешних условиях), близости их состава, увеличивается, так как при этом зависимость (2) приближается к функциональной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов И. Д., Шур М. С. Итоги науки и техники. Сер. Авиационные и ракетные двигатели, т. 1. Ред. А. З. Чулков. — М., 1974, с. 66.
2. Паушкин Я. М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива. — М., 1978, с. 78.
3. Godai T., Shimizu M. — AIAA Paper, № 72, p. 1135.
4. Глазкова А. П. Катализ горения взрывчатых веществ. — М., 1976.
5. Леснико́вич А. И. — Физика горения и взрыва, 1979, т. 15, № 1, с. 37.
6. Леснико́вич А. И. — Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 2. хим., биол., геогр., 1979, № 2, с. 11.
7. Jaffe H. H. — Chem. Revs, 1953, v. 53, p. 191.

Поступила в редакцию  
13.09.79.

НИИ ФХП

\* При изменении состава смесей гексогена в пределах 10% коэффициент корреляции — 0,84 [5, 6], что недостаточно для удовлетворительной корреляции [7].