

УДК 536.46

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ В ЗАКОНЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С. А. Рашковский¹, Ю. М. Милёхин², А. В. Федорычев²¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва, rash@ipmnet.ru²Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский

Приведены экспериментальные данные, демонстрирующие корреляцию параметров в степенной зависимости скорости горения смесевых твердых ракетных топлив от давления. Обсуждаются причины изменения скорости горения при изменении условий перемешивания топливной смеси. Анализируется разброс давления в камере сгорания ракетного двигателя на твердом топливе с учетом корреляции параметров в законе скорости горения. Показано, что относительный разброс скорости горения зависит от давления, при котором происходит сжигание топлива, при этом для каждого топлива существует уровень давления, при котором разброс скорости теоретически равен нулю, независимо от различий составов и свойств топлива.

Ключевые слова: твердые ракетные топлива, скорость горения, чувствительность скорости горения к изменению давления, корреляция параметров в законе скорости горения.

DOI 10.15372/FGV20160406

ВВЕДЕНИЕ

Зависимость скорости горения от давления и начальной температуры $u(p, T_0)$ является основной баллистической характеристикой твердого ракетного топлива. Эта зависимость определяет внутрибаллистические и расходные характеристики ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ), а ее параметры, такие как чувствительность скорости горения к давлению $\nu = \frac{\partial \ln u}{\partial \ln p}$ и к начальной температуре $\beta = \frac{\partial \ln u}{\partial T_0}$, определяют разбросы внутрибаллистических и расходных характеристик РДТТ [1], а также его динамические свойства (в первую очередь, низкочастотную и акустическую устойчивость [2–4]). В общем случае параметры ν и β сами являются функциями давления и начальной температуры, однако для многих реальных твердых ракетных топлив они могут слабо зависеть от p и T_0 в широком диапазоне их изменения. В этом случае закон скорости горения имеет простой вид

$$u(p, T_0) = u_1 p^\nu \exp[\beta(T_0 - T_N)], \quad (1)$$

где u_1 — постоянная, T_N — «номинальная» начальная температура заряда.

Зависимость скорости горения от давления и начальной температуры определяется при сжигании образцов в установке постоянного давления (УПД). Если закон скорости горения аппроксимируется функцией (1), сжигание образцов в УПД позволяет определить параметры u_1 , ν и β .

Скорость горения смесевых твердых ракетных топлив зависит от многих факторов: — от содержания различных компонентов (как основных, так и вспомогательных, таких как катализаторы и ингибиторы горения), — от дисперсности порошкообразных компонентов, — от качества сырья: сырье от разных поставщиков и изготовителей имеет несколько отличающиеся свойства; это приводит к различию скоростей горения зарядов, изготовленных из разного сырья, более того, даже сырье одного поставщика и изготовителя может несколько отличаться по своим свойствам от партии к партии, — от технологических режимов приготовления топливной массы (интенсивности и длительности перемешивания топливной массы), — от особенностей транспортировки топливной массы от смесителя к месту формования заряда (свободное литье, подача по трубопроводу и т. п.),

— от технологии формования заряда (литье, выдавливание через фильеры и т. п.),
 — от режимов полимеризации заряда, которые также могут несколько отличаться от заряда к заряду, в пределах технологических допусков, и т. п.

Все это приводит к разбросу скорости горения. Причиной является отличие состава и свойств топлива в разных зарядах, связанное с особенностями их изготовления. Таким образом, скорости горения разных зарядов, изготовленных из одного и того же твердого топлива по одной и той же технологии, могут заметно отличаться. В большей степени это относится к смешевым топливам, в меньшей — к двухосновным.

В тех случаях, когда скорость горения может быть аппроксимирована зависимостью (1), все указанные выше технологические различия приводят к разбросу параметров u_1 , ν и β . Одной из задач, которую приходится решать разработчикам твердых ракетных топлив, является установление зависимости параметров u_1 , ν и β от состава топлива, характеристик сырья и технологических режимов изготовления топливной массы и зарядов. Данная задача является многопараметрической и в большинстве случаев решается путем построения соответствующих регрессионных зависимостей. Задача усложняется тем, что приходится иметь дело с тремя функциями u_1 , ν и β , зависящими от многих переменных.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ В ЗАКОНЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ

В работах [5, 6] на примере некоторых твердых топлив и взрывчатых веществ показано, что для данного типа топлива изменение параметров u_1 и ν происходит коррелированно и может быть описано зависимостью

$$\ln u_1 = a - b\nu, \quad (2)$$

где a и b — постоянные для данного типа топлива параметры, не изменяющиеся при небольшом варьировании состава и свойств твердого топлива, приводящем к изменению коэффициентов u_1 и ν в законе скорости горения (1).

Корреляция (2), если она имеет место, является важным свойством твердых ракетных топлив и взрывчатых веществ как с точки зрения прогнозирования их баллистических характеристик, так и с точки зрения разработки

новых составов с заданным законом скорости горения. До настоящего времени это свойство неоправданно не принималось во внимание и не учитывалось при разработке твердых ракетных топлив и РДТТ.

Чтобы проверить корреляцию (2), был обработан большой объем данных по горению реальных смешевых твердых ракетных топлив разного состава и назначения. Данные обрабатывались в координатах $(\ln u_1, \nu)$. Некоторые результаты представлены на рис. 1–6. В таблице приведены параметры корреляционной зависимости (2), а также коэффициент корреляции R^2 для данных, показанных на рис. 1–6.

Изменение скорости горения в приведенных на рисунках результатах вызвано варьированием концентрации и дисперсности компонентов твердого топлива, а также интенсивности и длительности перемешивания топливной массы.

Влияние вариаций состава смешевого топлива на скорость его горения достаточно широко освещено в литературе, поэтому остановимся подробнее на влиянии интенсивности и длительности перемешивания топливной массы на скорость горения топлива. На рис. 3 приведены скорости горения топлив, полученных

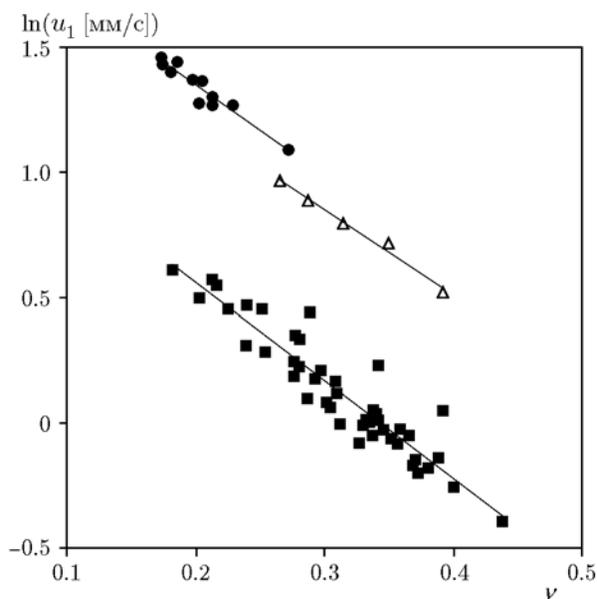


Рис. 1. Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для разных топлив:

точки — эксперимент: ■ — топливо Т-1, ● — топливо Т-2, △ — топливо Т-3 (см. таблицу); линии — линейная регрессия (2)

Параметры линейной регрессии (2) для исследованных топлив

Топливо	Основные компоненты	Варьируемые компоненты/параметры	a	b	R^2	p_B , кг/см ²
T-1	ПХА, неактивное связующее С-1	ПХА, добавки	1.34	3.90	0.87	49.4
T-2	Крупная фракция ПХА, октоген, алюминий, неактивное связующее С-1	ПХА, октоген, добавки	2.07	3.64	0.93	38.1
T-3	Мелкая фракция ПХА, октоген, алюминий, неактивное связующее С-1	ПХА, октоген, добавки	1.86	3.39	0.99	29.7
T-4	ПХА, октоген, алюминий, активное связующее АС-1	ДАФ-2, мелкая фракция ПХА, удельная поверхность ПХА	2.89	4.70	0.995	109.9
T-5	ПХА, октоген, алюминий, неактивное связующее С-2	ДАФ-2, Fe ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , время перемешивания	2.38	4.53	0.92	92.8
T-6	ПХА, октоген, дисперсный охладитель, активное связующее АС-2	Охладитель О-1	0.91	3.26	0.95	26.0
		Охладитель О-2	0.94	3.31	0.86	27.4
		Октоген	0.66	3.07	0.78	21.5
		ПХА	0.71	3.08	0.87	21.8
		Объемный смеситель	0.60	3.00	0.98	20.1
		Планетарный смеситель, в том числе домешивание	0.94	3.28	0.97	26.6
T-7	ПХА, тротил, гексоген, алюминий, неактивное связующее С-3	Без добавок, соединения Ni, соединения Рb, отдельные соединения	1.88	3.57	0.97	35.5
		Соединения Рb + Си, различное соотношение фракций ПХА	2.25	4.14	0.98	62.8

при разной длительности перемешивания топливной массы в одном и том же смесителе, а на рис. 5 — скорости горения одного и того же топлива, изготовленного в смесителях разного типа. В последнем случае рассматривались два наиболее распространенных типа смесителей: планетарный и объемный. В объемном смесителе перемешивание топливной массы происходит под действием гравитационной силы во вращающемся корпусе смесителя, в планетарном смесителе перемешивание производится вращающимися лопатками.

Исходные порошки дисперсных компонентов топлива (ПХА, алюминия, октогена и др.) всегда содержат конгломераты частиц, что связано с гигроскопичностью порошков и действием электростатических сил. Если такие конгломераты оказываются в заряде твердого топлива, в процессе горения они выступают

как единая частица. Это приводит к изменению эффективной дисперсности порошков в топливе (в том числе и к изменению эффективного распределения «частиц» по размерам) и, как следствие, к изменению его скорости горения по сравнению со случаем, когда конгломератов нет и все частицы в топливе разделены прослойками связующего. С другой стороны, при смешении порошкообразных компонентов с вязким связующим могут образовываться новые конгломераты частиц, капюлированные в полостях (пузырях) связующего. Это также изменяет эффективную дисперсность порошкообразного компонента в топливе и ведет к изменению скорости горения заряда. При перемешивании топливной массы в смесителе конгломераты разрушаются, и тем сильнее, чем интенсивнее и длительнее происходит перемешивание, т. е. чем выше сдвиговые напряжения,

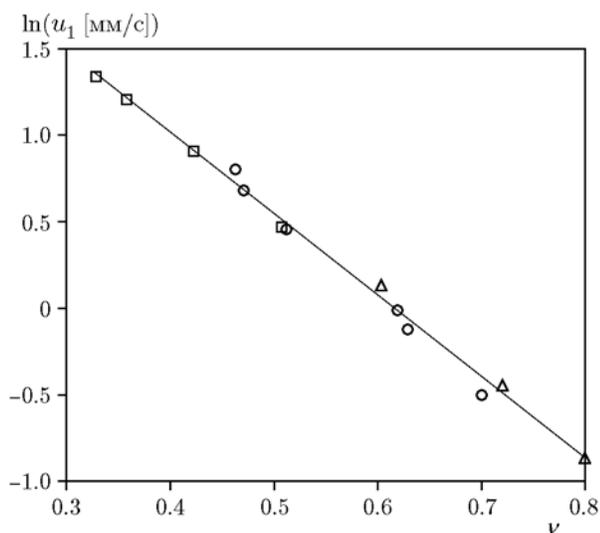


Рис. 2. Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для топлива Т-4:

точки — эксперимент: \circ — влияние катализатора горения ДАФ-2, \square — мелкой фракции ПХА, \triangle — удельной поверхности ПХА (см. таблицу); линия — линейная регрессия (2)

возникающие в топливной массе в процессе перемешивания. Из энергетических соображений следует, что чем меньше размеры конгломератов, тем большие сдвиговые напряжения нужно создать в смесителе для их разрушения. Интенсивность перемешивания в планетарном смесителе существенно выше, чем в объемном, за счет больших сдвиговых напряжений, которые возникают в топливной массе на поверхности вращающихся лопаток. Это приводит к более интенсивному разрушению конгломератов в планетарном смесителе по сравнению с объемным, в результате чего эффективная дисперсность порошкообразных компонентов в топливе (которая определяется по дисперсности отдельных частиц) приближается к ее паспортному значению для исходного порошка. Увеличение времени перемешивания также положительно влияет на дробление конгломератов различного вида за счет многократного попадания конгломератов в области смесителя с высокими сдвиговыми напряжениями. Кроме того, топливная масса после планетарного смесителя оказывается более однородной, чем после объемного, опять-таки за счет большей интенсивности перемешивания. Это снижает эффект неидеальности перемешивания, а значит, уменьшает неоднородность заряда и, как следствие, вариации скорости горения по объему

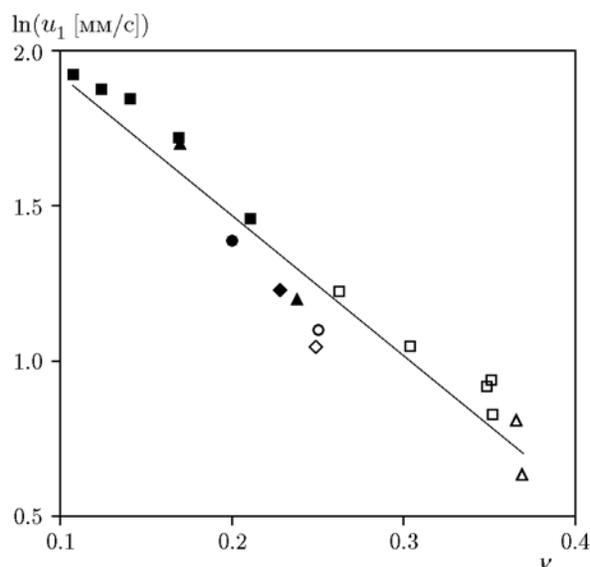


Рис. 3. Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для топлива Т-5:

точки — эксперимент: \circ , \bullet — без добавок, \square , \blacksquare — изменение содержания катализатора горения ДАФ-2, \triangle , \blacktriangle — Fe_2O_3 , \diamond , \blacklozenge — V_2O_5 ; время перемешивания топливной массы: светлые значки — 30 мин, темные — 180 мин (см. таблицу); линия — линейная регрессия (2)

заряда.

Все это приводит к отличию скоростей горения зарядов, изготовленных из одних и тех же компонентов в планетарном и объемном смесителях, а также при различной длительности перемешивания (см. рис. 3 и 5). На рис. 5 приведены данные для топлива, полученного в объемном смесителе и затем домешанного в течение 90 мин в планетарном смесителе. В силу сказанного выше, структура такого топлива соответствует структуре топлива, сразу изготовленного в планетарном смесителе, что и показывает рис. 5.

Отметим, что аналогичный эффект наблюдается при течении топливной массы вблизи твердой поверхности (при течении по трубопроводу или при продавливании через фильеры): возникают интенсивные сдвиговые напряжения, которые вызывают дробление конгломератов частиц порошкообразных компонентов вплоть до размеров исходных частиц, а затем изменение скорости горения в тех частях топливной смеси, которые прошли через зоны высоких сдвиговых напряжений. Отметим еще один эффект изменения скорости горения при течении топливной массы в зоне высоких ка-

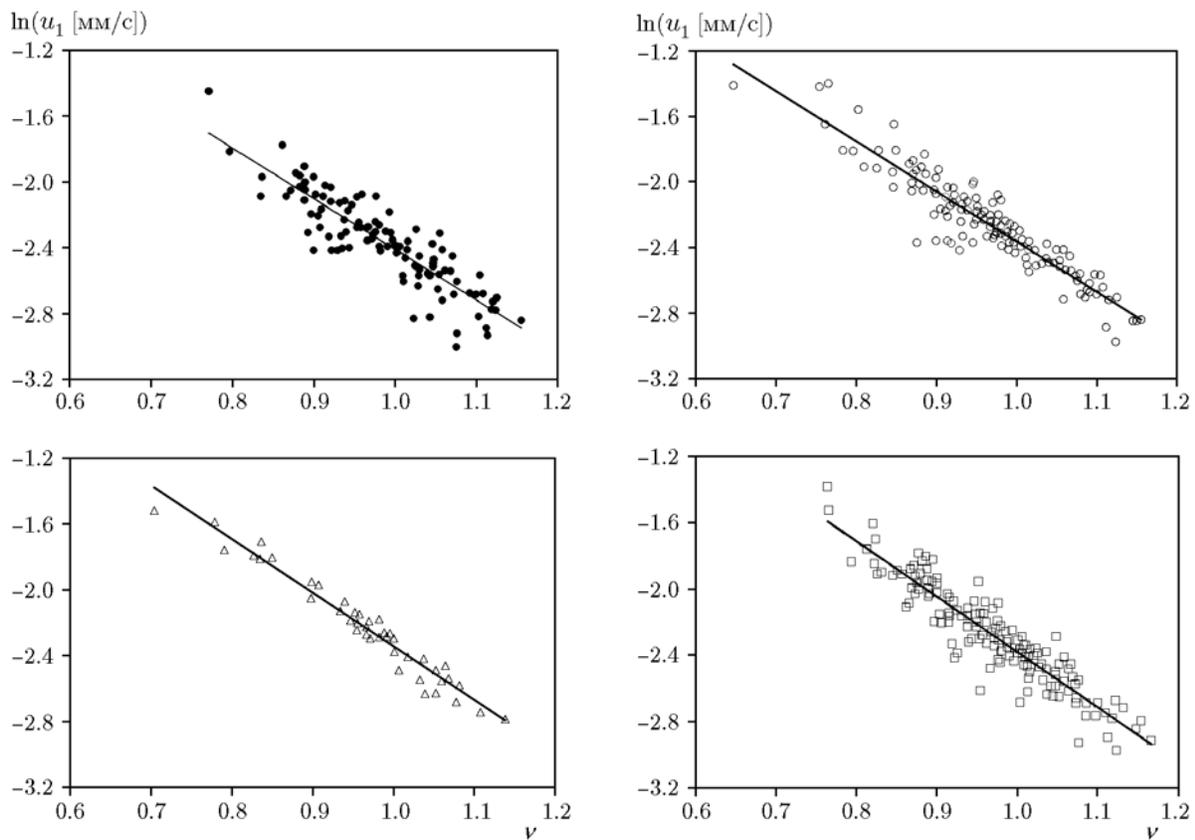


Рис. 4. Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для безметалльного топлива Т-6:

два варианта топлива отличались дисперсным охладителем О-1 или О-2; точки — эксперимент, варьируемый компонент: ● — октоген, ○ — ПХА, △ — О-1, □ — О-2 (см. таблицу); линия — линейная регрессия (2)

сательных напряжений. Частицы дисперсных компонентов никогда не бывают идеально симметричными (сферическими), они всегда имеют несколько вытянутую форму; приближенно их можно рассматривать как цилиндры, эллипсоиды, хлопья и т. п. При движении топливной массы в области повышенных сдвиговых напряжений частицы дисперсных компонентов ориентируются в направлении действия касательных напряжений. В результате, попадая в заряд, топливная масса оказывается анизотропной: в разные сечения заряда частицы попадают с разным поперечным сечением, которое и «участвует» в горении. Это приводит к анизотропии скорости горения заряда твердого топлива [7]: скорость горения одного и того же заряда в разных направлениях может отличаться на 10 %. Анизотропия скорости горения в той или иной степени наблюдается для всех зарядов, изготовленных из смесового твердого

ракетного топлива.

Как следует из рис. 1–6, случайное или целенаправленное изменение состава топлива или технологических параметров приводит к одновременному изменению параметров u_1 и ν в законе скорости горения (1), причем во многих случаях это происходит согласованно в соответствии с корреляционной зависимостью (2). Однако наблюдаются и отклонения от зависимости (2). Примеры отклонений приведены на рис. 6.

Рассмотрим простое качественное объяснение корреляционной зависимости (2).

Если считать, что над поверхностью горения устанавливается термодинамическое (фазовое) равновесие, то температура поверхности горения топлива T_s и давление будут связаны уравнением Клапейрона — Клаузиуса, которое в рабочем диапазоне давления имеет приближенное решение

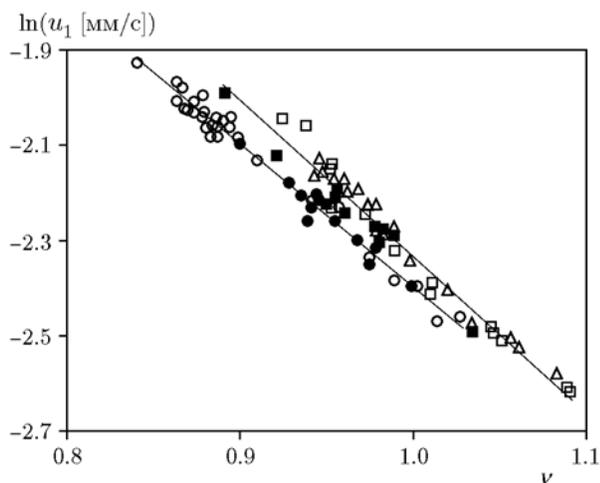


Рис. 5. Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для безметаллического топлива Т-6, изготовленного в разных смесях:

точки — эксперимент: ●, ■ — охладитель О-1; ○, □, △ — охладитель О-2; ○, ● — объемный смеситель; □, ■ — планетарный смеситель; △ — топливная масса готовилась в объемном смесителе, затем 90 мин — в планетарном; данные ●, □ относятся к одной совокупности, □, ■, △ — к другой (см. таблицу); линия — линейная регрессия (2)

$$p = p_B \exp\left(-\frac{L}{RT_s}\right), \quad (3)$$

где L — теплота испарения легколетучего компонента, p_B — предэкспонент, слабо зависящий от температуры T_s .

Скорость разложения (газификации) конденсированной фазы топлива на поверхности горения приближенно можно описать законом аррениусовского типа:

$$u = u_B \exp\left(-\frac{E}{2RT_s}\right), \quad (4)$$

где E — энергия активации реакции газификации к-фазы топлива, u_B — предэкспонент, слабо зависящий от температуры T_s .

Считая предэкспоненты u_B и p_B постоянными в некоторых диапазонах давления и температуры T_s и объединяя (3) и (4), получим

$$u = u_B(p/p_B)^{E/(2L)}. \quad (5)$$

Подобная модель впервые была рассмотрена в работе [8] применительно к горению труднотлетучих веществ. Несмотря на ограниченную область применения, она позволяет представить, каким образом может возникать корреляционная зависимость (2).

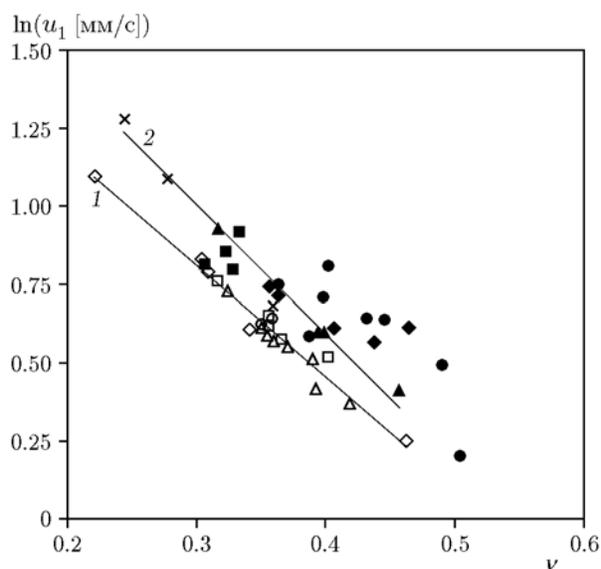


Рис. 6. Пример нарушения корреляции (2). Корреляция параметров в степенном законе скорости горения для топлива Т-7:

точки — эксперимент: ○ — без добавок, ● — соединения Fe, □ — соединения Ni, ■ — соединения Cr, △ — соединения Pb, ▲ — соединения Pb + Si, изменение содержания Fe_2O_3 , ◇ — отдельные соединения, ◆ — ДАФ-2, × — различное соотношение фракций ПХА; линия 1 объединяет данные ○, □, △, ◇, 2 — данные ▲ и ×, данные ●, ■, ◆ выпадают из регрессионной зависимости (2) (см. таблицу); линия — линейная регрессия (2)

Сравнивая с (1), находим

$$u_1 = u_B p_B^{-\nu}, \quad \nu = E/(2L). \quad (6)$$

Отсюда следует

$$\ln u_1 = \ln u_B - \nu \ln p_B.$$

В результате приходим к корреляционной зависимости (2) для параметров u_1 и ν , где

$$a = \ln u_B, \quad b = \ln p_B. \quad (7)$$

Используя (5), (6), запишем скорость горения в виде

$$u = u_B(p/p_B)^\nu, \quad (8)$$

где постоянные параметры

$$u_B = \exp a, \quad p_B = \exp b \quad (9)$$

могут быть найдены обработкой экспериментальных зависимостей $u(p)$ в координатах (2).

Существование корреляционной зависимости (2) означает, что при относительно небольших вариациях состава твердого топлива и

технологических параметров его изготовления предэкспоненты u_B и p_B остаются постоянными, при этом варьирование состава и свойств твердого топлива приводит к изменению только одного параметра ν в объединенном законе скорости горения (8).

Введем понятие базовой совокупности: это множество всех составов, отличающихся содержанием компонентов, их дисперсностью, технологическими режимами изготовления и т. п., но описываемых единой корреляционной зависимостью (2). Любые изменения топлива в пределах базовой совокупности не изменяют параметров u_B и p_B , поэтому параметры u_1 и ν в законе скорости горения (1) изменяются согласованно в соответствии с корреляционной зависимостью (2). Естественно, что при больших вариациях состава топлива и технологии его изготовления может происходить изменение базовой совокупности, а следовательно, и параметров u_B и p_B . В настоящее время не известно, при каких вариациях состава и технологии базовая совокупность может считаться неизменной, а при каких вариациях произойдет переход на новую базовую совокупность.

Отметим, что некоторые модели горения конденсированных систем (см., например, [9]) указывают на возможность корреляции параметров ν и β . Однако невысокая точность экспериментального определения температурной чувствительности β не позволяет проверить эту корреляцию. Этому мешает также изменение температур T_m и T_s при варьировании состава топлива и технологии его изготовления.

РАЗБРОС ДАВЛЕНИЯ В РДТТ

Эксперименты показывают, что скорость горения твердого ракетного топлива в камере сгорания ракетного двигателя или газогенератора всегда больше скорости горения образцов этого же топлива в УПД:

$$u(p, T_0) = K_u u_1 p^\nu \exp[\beta(T_0 - T_N)], \quad (10)$$

где $K_u > 1$ — переходный коэффициент от УПД к двигателю. Опыт отработки ракетных двигателей и газогенераторов на твердом топливе различного назначения показывает, что $K_u = 1.04 \div 1.1$ в маршевых РДТТ с канальным зарядом, в то время как в РДТТ специального назначения и в газогенераторах с зарядом торцевого горения $K_u = 1.2 \div 1.3$.

Причина возникновения коэффициента K_u , как и различие его значений для крупногабаритных и малогабаритных РДТТ, связаны с особенностями сжигания твердого топлива в УПД и в РДТТ. В УПД образец сжигается в среде холодного инертного газа (обычно азота), а при горении заряда в РДТТ камера сгорания заполнена высокотемпературными продуктами сгорания, тепловое излучение которых поступает к поверхности горения заряда, интенсифицируя процессы на поверхности горения и в к-фазе топлива под поверхностью горения. Отметим, что дополнительными факторами, изменяющими скорость горения в РДТТ по сравнению со скоростью горения в УПД, являются деформация заряда в РДТТ [10] и эрозионное горение топлива, связанное с течением горячих продуктов сгорания вдоль поверхности горения [1]. Однако анализ показывает, что эти факторы менее значимы и носят временный характер за счет выгорания заряда. Отличие значений коэффициентов K_u для крупногабаритных (маршевых) и малогабаритных РДТТ специального назначения зависит в первую очередь от типа твердого топлива: в маршевых РДТТ используются металлизированные топлива, а в малогабаритных — преимущественно безметалльные или с очень небольшим (до 5 %) содержанием металла.

Согласно теории [3] поглощение теплового излучения поверхностью горения твердого топлива влияет на скорость горения, так же как и повышение начальной температуры заряда (в отсутствие облучения) на величину

$$\Delta T_0 = \frac{J}{c\gamma u(p, T_0)}, \quad (11)$$

где c и γ — удельная теплоемкость и плотность к-фазы твердого топлива, J — плотность потока теплового излучения, поглощенного поверхностью горения.

Учитывая зависимость скорости горения от начальной температуры (1), получаем

$$K_u = \exp\left(\beta \frac{J}{c\gamma u(p, T_0)}\right). \quad (12)$$

Зависимость $K_u(p)$ может быть рассчитана, если известны плотность теплового потока J и экспериментальная зависимость $\beta(p)$ для данного топлива. На рис. 7, а показаны экспериментальные значения температурной чувствительности β для топлива Т-6 с разными дис-

персными охладителями, измеренные при различных давлениях, а также степенные аппроксимации $\beta(p) = \beta_1 p^r$ соответствующих экспериментальных данных, где β_1 и r — постоянные. Эти аппроксимации использовались при расчете зависимостей $K_u(p)$.

Так как и аппроксимационные зависимости $\beta(p)$, и закон скорости горения $u(p)$ являются степенными, соотношение (12) с учетом (10) можно переписать в виде

$$K_u = \exp\left(p^{r-\nu} \frac{\beta_1 \omega}{K_u}\right), \quad (13)$$

где $\omega = J/(c\gamma u_1)$ — параметр, который можно считать постоянным для данного топлива.

На рис. 7, б приведены экспериментальные значения коэффициента K_u , полученные при различных давлениях для топлива Т-6 с теми же дисперсными охладителями, а также зависимости, рассчитанные по уравнению (13).

Отметим, что, зная экспериментальное значение K_u , можно оценить дополнительный тепловой поток, поглощаемый поверхностью горения заряда в РДТТ, за счет теплового излучения в камере сгорания:

$$J = \frac{c\gamma u(p, T_0)}{\beta} \ln K_u. \quad (14)$$

Характеристикой стабильности работы РДТТ является разброс давления в разных испытаниях одного и того же двигателя, связанный с разбросом скорости горения разных зарядов одного и того же топлива.

Давление в камере сгорания с учетом (10) определяется из решения уравнения

$$K_u \gamma S u(p, T_0) = A_0 p \sigma, \quad (15)$$

где γ — плотность твердого топлива, S — площадь поверхности горения заряда, A_0 — коэффициент истечения, σ — площадь критического сечения сопла РДТТ. Тогда разброс давления в РДТТ будет определяться соотношением

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{1}{1-\nu} \frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)} + \frac{\beta}{1-\nu} \delta t + \frac{1}{1-\nu} \frac{\delta K_u}{K_u}, \quad (16)$$

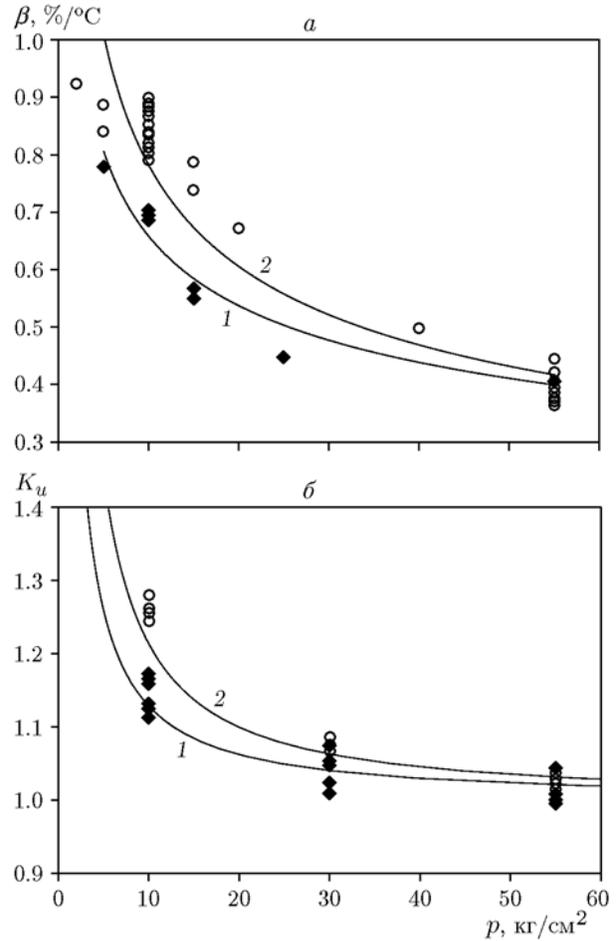


Рис. 7. Зависимости $\beta(p)$ (а) и $K_u(p)$ (б) для топлива Т-6 с разными дисперсными охладителями:

точки — эксперимент, линии — степенные аппроксимации для $\beta(p)$ и решения уравнения (13) для $K_u(p)$; линия 1 и \blacklozenge — охладитель О-1: $\beta_1 = 1.29 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, $r = -0.29$, $\omega = 1.9$, линия 2 и \circ — охладитель О-2: $\beta_1 = 1.826 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, $r = -0.37$, $\omega = 1.3$; в обоих случаях $\nu = 0.8$

где $\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)}$ — относительный разброс скорости горения заряда в УПД при постоянном давлении и «номинальной» начальной температуре, δt — разброс (вариации) начальной температуры заряда, остальные параметры неизменны. Эта формула справедлива как при постоянных, так и при переменных параметрах ν и β .

Учитывая (4), получаем

$$\frac{\delta K_u}{K_u} = -\beta \frac{J}{c\gamma u(p, T_0)} \times \left(\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)} + \nu \frac{\delta p}{p} + \beta \delta t \right). \quad (17)$$

Здесь пренебрегаем изменением β и J при изменении давления в камере сгорания и начальной температуры заряда. После подстановки (17) в (16) имеем

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{1 - \beta J / (c\gamma u(p, T_0))}{1 - \nu [1 - \beta J / (c\gamma u(p, T_0))]} \times \left(\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)} + \beta \delta t \right). \quad (18)$$

Воспользовавшись (12), перепишем (18) в более удобной форме:

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{(1 - \ln K_u)}{1 - \nu(1 - \ln K_u)} \left(\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)} + \beta \delta t \right), \quad (19)$$

где параметр K_u , в отличие от J , находится непосредственно обработкой экспериментальных результатов для данного двигателя или берется из результатов испытаний аналогичных РДТТ.

Формула (19) отличается от обычно используемой в расчетах формулы для разброса давления [1] наличием коэффициента K_u и переходит в нее при $K_u = 1$. Для сравнения на рис. 8 приведена зависимость параметра $\frac{(1 - \nu)(1 - \ln K_u)}{1 - \nu(1 - \ln K_u)}$ (который равен отношению разбросов давления при $K_u \neq 1$ и $K_u = 1$) от K_u и ν при прочих равных условиях. Видно, что пренебрежение параметром K_u может привести к двукратному завышению разброса давления в РДТТ в расчетах по сравнению с реальными.

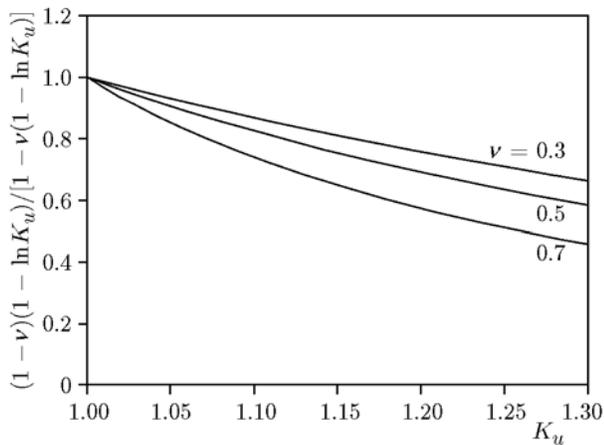


Рис. 8. Зависимость отношения разбросов давления в РДТТ при $K_u \neq 1$ и $K_u = 1$ от K_u и ν при прочих равных условиях

Основным фактором, определяющим разброс давления в РДТТ, является разброс скорости горения $\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)}$ от заряда к заряду, связанный со случайными разбросами состава топлива, его структуры и свойств. Если скорость горения аппроксимируется степенной зависимостью (1), разброс скорости горения обусловлен разбросом параметров u_1 и ν . Корреляция (2) при малых вариациях состава топлива в пределах базовой совокупности, имеющая место для всех проанализированных смесевых топлив, означает, что и разбросы параметров u_1 и ν согласованы между собой.

Воспользуемся соотношением (8). Будем учитывать, что при небольших вариациях состава твердого топлива (в пределах «базовой совокупности») в этом соотношении изменяется только показатель степени ν , в то время как параметры u_B и p_B остаются неизменными.

В результате для разброса скорости горения в УПД при постоянном давлении и начальной температуре получаем соотношение

$$\frac{\delta u(p, T_0)}{u(p, T_0)} = \delta \nu \ln \frac{p}{p_B}, \quad (20)$$

где $\delta \nu$ — разброс показателя степени ν за счет различия состава и свойств топлива, возникающих в процессе его изготовления и формования заряда. Подставляя (20) в (19), запишем

$$\frac{\delta p}{p} = \frac{1 - \ln K_u}{1 - \nu(1 - \ln K_u)} \left[\delta \nu \ln \frac{p}{p_B} + \beta \delta t \right]. \quad (21)$$

Для среднеквадратического отклонения скорости горения σ_u из (20) получаем соотношение

$$\frac{\sigma_u}{u(p, T_0)} = \sigma_\nu \left| \ln \frac{p}{p_B} \right|, \quad (22)$$

где σ_ν — среднеквадратическое отклонение показателя ν , которое не зависит от давления и является чисто технологической характеристикой заряда твердого топлива, связанной с разбросами состава и технологических параметров изготовления топливной смеси и заряда твердого топлива.

Формула (22) позволяет сделать важные практические выводы.

1. Относительный разброс скорости горения зависит от давления. Так, разбросы скорости горения в пределах одной партии зарядов, определенные при разных давлениях p_1 и p_2 , связаны соотношением

$$\frac{\sigma_{u2}}{u(p_2, T_0)} = \frac{\sigma_{u1}}{u(p_1, T_0)} \frac{|\ln(p_2/p_B)|}{|\ln(p_1/p_B)|}. \quad (23)$$

2. Если заряд сжигается при давлении $p = p_B$ (в УПД или в РДТТ), разброс его скорости горения равен нулю (это — теоретически, а на практике — будет минимальным), независимо от случайных разбросов технологических параметров состава и свойств твердого топлива. Отсюда, в частности, следует, что для правильного определения разброса скорости горения зарядов в РДТТ по результатам сжигания образцов в УПД давление, при котором образцы сжигаются в УПД, должно быть как можно ближе к рабочему давлению в камере сгорания РДТТ и при этом должно как можно больше отличаться от p_B .

На рис. 9 в качестве примера приведены разбросы скорости горения зарядов топлива Т-6, измеренной при разных давлениях в УПД. Показана также теоретическая зависимость (22).

ОБСУЖДЕНИЕ

При независимом варьировании отдельных компонентов твердого топлива или технологических параметров наблюдается корреляция параметров u_1 и ν , однако коэффициенты

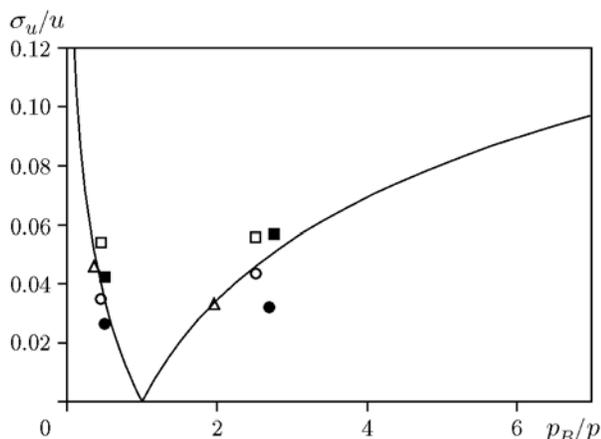


Рис. 9. Сравнение разбросов скорости горения (линия), рассчитанных по формуле (22), с экспериментальными данными (значки) для топлива Т-6 (см. данные рис. 5 и таблицу):

○, ● — охладитель О-1, □, ■, △ — охладитель О-2; ●, ■ — объемный смеситель, ○, □ — планетарный смеситель, △ — топливная масса готовилась в объемном смесителе, затем 90 мин — в планетарном; в расчетах принято $\sigma_\nu = 0.05$, значения p_B взяты из таблицы

a и b в этих корреляциях, вообще говоря, различны. Очевидно, при одновременном варьировании нескольких компонентов твердого топлива или технологических параметров, имеющих одинаковые значения параметров a и b , будет иметь место корреляция u_1 и ν с теми же значениями a и b .

Рассмотрим, что произойдет при одновременном варьировании нескольких компонентов или технологических параметров с разными значениями a и b (т. е. относящихся к разным базовым совокупностям).

Пусть x_1 и x_2 — два параметра, характеризующих состав топлива или технологию его изготовления (например, это могут быть концентрации компонентов, их дисперсности, время и интенсивность перемешивания и т. д.), вариации которых относятся к разным базовым совокупностям: при варьировании параметра x_1 изменение параметров u_1 и ν описывается корреляционной зависимостью (2) с коэффициентами a_1 и b_1 , а вариациям параметра x_2 соответствуют коэффициенты a_2 и b_2 корреляционной зависимости (2). Пусть $a_2 \neq a_1$ и $b_2 \neq b_1$. Второе из этих условий означает, что линии будут пересекаться (рис. 10).

Пусть линия 1 соответствует вариациям параметра x_2 при постоянном значении параметра $x_1 = x_1^0$, а линия 2 — вариациям параметра x_1 при постоянном значении параметра

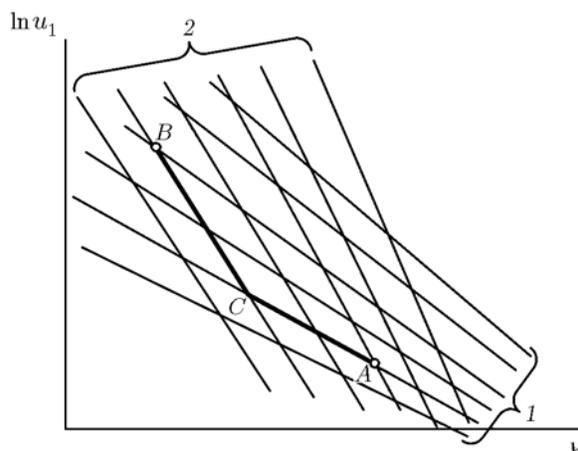


Рис. 10. Семейства корреляционных линий (2) при независимом изменении параметров топлива x_1 и x_2 :

линии семейства 1 соответствуют разным значениям $x_1 = \text{const}$, линии семейства 2 — разным $x_2 = \text{const}$

ра $x_2 = x_2^0$. В точке пересечения этих линий $x_1 = x_1^0$, $x_2 = x_2^0$ и совпадают составы, относящиеся к базовым совокупностям 1 и 2, что соответствует линиям 1 и 2.

Очевидно, при другом постоянном значении параметра x_1 и изменении параметра x_2 корреляционная зависимость сместится относительно линии $x_1 = x_1^0$. Это же произойдет с линией 2, если перейти к другому постоянному значению x_2 при изменении параметра x_1 . В результате мы приходим к выводу, что существует семейство почти параллельных линий 1, соответствующих разным постоянным значениям параметра x_1 при варьировании параметра x_2 , и семейство почти параллельных линий 2, соответствующих разным постоянным значениям параметра x_2 при варьировании параметра x_1 .

Линии 1 описываются зависимостью

$$\ln u_1(x_1, x_2) = a_1(x_1) - b_1(x_1)\nu(x_1, x_2), \quad (24)$$

линии 2 — зависимостью

$$\ln u_1(x_1, x_2) = a_2(x_2) - b_2(x_2)\nu(x_1, x_2), \quad (25)$$

где $a_1(x_1)$, $b_1(x_1)$, $a_2(x_2)$, $b_2(x_2)$ — характерные для данного топлива функции, которые могут быть установлены экспериментально.

Эти семейства линий пересекаются, образуя сетку прямых линий в координатах $(\nu, \ln u_1)$ (см. рис. 10). Такая сетка представляет собой неортогональную систему координат (x_1, x_2) . Тогда с математической точки зрения зависимости ν и $\ln u_1$ от x_1 и x_2 можно рассматривать как отображение пространства (x_1, x_2) на пространство $(\nu, \ln u_1)$.

Так как зависимости (24) и (25) имеют место во всех точках плоскости (x_1, x_2) , их можно рассматривать как систему линейных уравнений относительно ν и $\ln u_1$. Решая эту систему, получим

$$\nu(x_1, x_2) = \frac{a_1(x_1) - a_2(x_2)}{b_1(x_1) - b_2(x_2)}, \quad (26)$$

$$\ln u_1(x_1, x_2) = \frac{a_2(x_2)b_1(x_1) - a_1(x_1)b_2(x_2)}{b_1(x_1) - b_2(x_2)}. \quad (27)$$

Эти формулы показывают, как формально выглядят зависимости ν и $\ln u_1$ от параметров x_1 и x_2 , если известны функции $a_1(x_1)$, $b_1(x_1)$, $a_2(x_2)$, $b_2(x_2)$. Соотношения (26), (27) позволяют упростить на практике определение этих

зависимостей. В самом деле, определим экспериментально две корреляционные зависимости (24) семейства 1, соответствующие $x_1^{(1)} = \text{const}$ и $x_1^{(2)} = \text{const}$, и две корреляционные зависимости (25) семейства 2, соответствующие $x_2^{(1)} = \text{const}$ и $x_2^{(2)} = \text{const}$, вдоль которых установим зависимости $\nu(x_1^{(1)}, x_2)$, $\nu(x_1^{(2)}, x_2)$, $\nu(x_1, x_2^{(1)})$, $\nu(x_1, x_2^{(2)})$ и соответствующие коэффициенты корреляционных зависимостей (24), (25): $a_k^{(n)} = a_k(x_k^{(n)})$, $b_k^{(n)} = b_k(x_k^{(n)})$, где n , $k = 1, 2$. При этом зависимости $\ln u_1$ от x_1 и x_2 вдоль этих линий находятся из корреляционных соотношений (24), (25).

Используя (24) и (25), запишем очевидные соотношения:

$$\begin{aligned} a_1^{(1)} - b_1^{(1)}\nu(x_1^{(1)}, x_2) &= \\ &= a_2(x_2) - b_2(x_2)\nu(x_1^{(1)}, x_2), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} a_1^{(2)} - b_1^{(2)}\nu(x_1^{(2)}, x_2) &= \\ &= a_2(x_2) - b_2(x_2)\nu(x_1^{(2)}, x_2), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} a_2^{(1)} - b_2^{(1)}\nu(x_1, x_2^{(1)}) &= \\ &= a_1(x_1) - b_1(x_1)\nu(x_1, x_2^{(1)}), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} a_2^{(2)} - b_2^{(2)}\nu(x_1, x_2^{(2)}) &= \\ &= a_1(x_1) - b_1(x_1)\nu(x_1, x_2^{(2)}). \end{aligned} \quad (31)$$

Решая эту систему алгебраических уравнений, получим:

$$\begin{aligned} a_1(x_1) &= \frac{1}{\nu(x_1, x_2^{(2)}) - \nu(x_1, x_2^{(1)})} \times \\ &\times [a_2^{(1)}\nu(x_1, x_2^{(2)}) - a_2^{(2)}\nu(x_1, x_2^{(1)}) + \\ &+ (b_2^{(2)} - b_2^{(1)})\nu(x_1, x_2^{(1)})\nu(x_1, x_2^{(2)})], \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} b_1(x_1) &= \frac{1}{\nu(x_1, x_2^{(2)}) - \nu(x_1, x_2^{(1)})} \times \\ &\times [a_2^{(1)} - a_2^{(2)} + b_2^{(2)}\nu(x_1, x_2^{(2)}) - \end{aligned}$$

$$- b_2^{(1)} \nu(x_1, x_2^{(1)})], \quad (33)$$

$$a_2(x_2) = \frac{1}{\nu(x_1^{(2)}, x_2) - \nu(x_1^{(1)}, x_2)} \times \\ \times [a_1^{(1)} \nu(x_1^{(2)}, x_2) - a_1^{(2)} \nu(x_1^{(1)}, x_2) + \\ + (b_1^{(2)} - b_1^{(1)}) \nu(x_1^{(1)}, x_2) \nu(x_1^{(2)}, x_2)], \quad (34)$$

$$b_2(x_2) = \frac{1}{\nu(x_1^{(2)}, x_2) - \nu(x_1^{(1)}, x_2)} \times \\ \times [a_1^{(1)} - a_1^{(2)} + b_1^{(2)} \nu(x_1^{(2)}, x_2) - \\ - b_1^{(1)} \nu(x_1^{(1)}, x_2)]. \quad (35)$$

Соотношения (26) и (27) с учетом функций (32)–(35) позволяют прогнозировать параметры ν и $\ln u_1$ в широком диапазоне изменения технологических параметров x_1 и x_2 .

Рассмотрим вариации параметров ν и $\ln u_1$ при варьировании параметров x_1 и x_2 . Изменение параметров (x_1, x_2) от некоторых значений (x_1^A, x_2^A) (точка A , рис. 10) до новых значений (x_1^B, x_2^B) (точка B) можно представить как перемещение вдоль линии 1 от точки A до точки C с координатами (x_1^A, x_2^B) и последующее перемещение вдоль линии 2 от точки A до точки B . Соответственно этому перемещению будут изменяться параметры ν и $\ln u_1$. Очевидно, можно записать

$$\nu(B) = \nu(A) + \Delta\nu(A, C) + \Delta\nu(C, B), \quad (36)$$

$$\ln u_1(B) = \\ = \ln u_1(A) + \Delta \ln u_1(A, C) + \Delta \ln u_1(C, B), \quad (37)$$

где $\Delta\nu(A, C)$ и $\Delta \ln u_1(A, C)$ — изменение параметров ν и $\ln u_1$ при переходе из точки A в точку C .

Учитывая (24) и (25), получаем

$$\Delta \ln u_1(A, C) = -b_1(x_1^A) \Delta\nu(A, C),$$

$$\Delta \ln u_1(C, B) = -b_2(x_2^B) \Delta\nu(C, B).$$

Тогда соотношение (37) можно переписать в виде

$$\ln u_1(B) = \ln u_1(A) -$$

$$- b_1(x_1^A) \Delta\nu(A, C) - b_2(x_2^B) \Delta\nu(C, B). \quad (38)$$

Из (36), (38) следует, что при одновременном изменении параметров x_1, x_2 , не относящихся к одной базовой совокупности, между параметрами ν и $\ln u_1$ уже не будет однозначной корреляции: изменение $\ln u_1$ не будет однозначно определяться изменением ν , а будет зависеть от того, на каких линиях семейств 1 и 2 лежат начальная и конечная точки, т. е. будет зависеть отдельно от $\Delta\nu(A, C)$ и $\Delta\nu(C, B)$. По-видимому, этим объясняется разброс экспериментальных точек на рис. 1–6 вокруг корреляционных зависимостей (2): кроме контролируемых вариаций определенных параметров топлива в каждом эксперименте были случайные неконтролируемые вариации других параметров, которые относятся к другим базовым совокупностям, а значит, лежат на других корреляционных зависимостях (2).

Аналогичным образом можно рассмотреть изменение параметров ν и $\ln u_1$, если одновременно изменяются несколько параметров топлива x_1, x_2, \dots, x_N , не относящихся к одной базовой совокупности.

ВЫВОДЫ

Анализ экспериментальных данных по горению широкого класса твердых ракетных топлив, порохов и взрывчатых веществ, проведенный в данной работе и в работах [5, 6], показал, что корреляция параметров в степенной зависимости скорости горения от давления является, по-видимому, фундаментальной закономерностью, связанной с механизмом горения конденсированных энергетических материалов. Учет этой корреляции позволяет повысить точность прогнозирования внутрибаллистических параметров РДТТ. Анализ, основанный на корреляциях (2), может использоваться для прогнозирования закона скорости горения при разработке новых составов и корректировке существующих. Он позволяет ускорить поиск состава, имеющего заданный закон скорости горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: справочник. — М.: Машиностроение, 1988.

2. **Новожилов Б. В.** Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
3. **Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б.** Теория нестационарного горения пороха. — М.: Наука, 1975.
4. **Рашковский С. А., Милехин Ю. М., Ключников А. Н., Федорычев А. В.** Метод модельного уравнения в теории нестационарного горения твердого ракетного топлива // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 71–79.
5. **Лесникович А. И.** Корреляция параметров β и ν зависимости $u = \beta p^\nu$ и возможность оценки по ним роли газо- и ж-фазных процессов при горении // Вестн. Белорус. ун-та. — 1979. — Т. II, № 2. — С. 11–13.
6. **Лесникович А. И.** Об отрицательной корреляции параметров закона скорости горения // Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15, № 1. — С. 37–42.
7. **Хасегава Х., Фукунага М., Китагава К., Шимада Т.** Аномалия скорости горения шашки смесового топлива // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 86–96.
8. **Зельдович Я. Б.** К теории горения порохов и взрывчатых веществ // ЖЭТФ. — 1942. — Т. 12, вып. 11/12. — С. 498–524.
9. **Струнин В. А., Манелис Г. Б.** О температурном коэффициенте скорости горения конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. — 1975. — Т. 11, № 5. — С. 797–799.
10. **Рашковский С. А., Милехин Ю. М., Ключников А. Н., Федорычев А. В.** Влияние растяжения смесового топлива на скорость его горения // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 48–56.

Поступила в редакцию 16/VII 2015 г.