

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Вулис, Л. П. Ярип. Аэродинамика факела. Л., Энергия, 1978.
2. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 40.
3. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М., Наука, 1965.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННАЯ НА НЕКОТОРЫХ ФОРМАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЯХ

А. И. Лесникович, С. А. Воробьева

(Минск)

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по влиянию добавок разнообразных веществ на скорость горения u и показатель давления γ в зависимости

$$u = \beta p^\gamma \quad (1)$$

для различных гетерогенных конденсированных систем, однако общий подход к количественной оценке влияния добавок на характеристики горения еще не разработан. Это обусловлено тем, что далеко не всегда ясно, какие из свойств химических регуляторов горения влияют на горение названных систем, а также трудностями количественной характеристики этих свойств. При таком положении для оценки влияния добавок на горение гетерогенных систем целесообразно обратиться к вероятностно-статистическим методам, в которых с учетом свойств ансамбля объектов осуществляется вероятностное прогнозирование свойств нового объекта, относящегося к тому же типу объектов.

Такого рода возможность намечается на основе стохастической связи, найденной в [1], между коэффициентом давления β и γ

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

где a и b — параметры, определяющиеся природой основных компонентов системы и механизмом горения. Корреляционное по своей сущности соотношение (2), полученное из анализа данных [1—3] для ~20 серий систем, отличающихся основными компонентами, является достаточно общим. Отдельные отклонения от зависимости (2) имеют рациональное объяснение [1, 2]. Использование (2) позволяет охватить количественной связью родственные гетерогенные конденсированные системы, отличающиеся, например, природой и количеством введенных добавок. Системы, для которых выполняется соотношение (2), в дальнейшем будут называться (корреляционной) серией. Под типом смесей будут подразумеваться смеси, состоящие из одинаковых по химической природе основных компонентов (ВВ или окислителя и горючего).

Основываясь на соотношении (2), можно провести оценку значений скорости горения при различных труднореализуемых в эксперименте значениях γ и дать обобщенную картину зависимости скорости горения от давления гетерогенных систем одного и того же типа, образованных одной или несколькими корреляционными сериями. Некоторые результаты использования (2) в указанном аспекте и рассматриваются ниже.

Известно [3], что для многих типов систем значения γ можно варьировать в довольно широких пределах, однако в двигателях горение устойчиво лишь при $\gamma < 1$, а реально достигаемые для топлив минималь-

ные значения ν близки к нулю [4]. Отмеченные ограничения вместе с (2) позволяют найти предельные значения возможных скоростей горения для некоторой корреляционной серии при заданном давлении или максимальные каталитические и ингибирующие эффекты, которые могут быть достигнуты введением в эти системы добавки. Действительно, если горение системы без добавки характеризуется в каком-то интервале давлений значением $\nu = \nu_r$ ($1 > \nu_r > 0$), то, как следует из (1), предельные значения Z фактора эффективности добавки z (отношение скорости горения с добавкой к скорости горения u_r исходной системы) будут равны:

$$Z_0 = \lim_{\nu \rightarrow 0} z = \frac{\beta_0}{u_r}, \quad Z_1 = \lim_{\nu \rightarrow 1} z = \frac{p\beta_1}{u_r}$$

(индексы у β и Z равны ν). Скорость u_r легко определяется экспериментально; β_1 и β_2 находятся из (2): $\lg \beta_0 = a$; $\lg \beta_1 = a - b$. Значения a и b для ряда систем приведены в [1]. Существенным в рассмотренном подходе нахождения Z является то, что он не требует знания скоростей горения или значений β при $\nu = 1$ и 0 , определение которых опытным путем связано с большими трудностями эмпирического подбора компонентов смеси, обеспечивающих указанные ν .

Зависимость $\lg z$ от $\lg p$, как следует из (1), линейная (в пределах постоянства β и ν)

$$\lg z = \lg (\beta/\beta_r) + (\nu - \nu_r) \lg p. \quad (3)$$

Используя (2), получим

$$\lg z = (\nu_r - \nu)(b - \lg p), \quad (4)$$

$$\lg \beta_z = b(\nu_r - \nu), \quad (5)$$

где $\beta_z = \beta/\beta_r$ ($\beta_z \left(\frac{1}{\nu_r - \nu} \right)$ имеет размерность давления). Выражение (5) — это корреляция (2) в более общем виде, полученная через относительную (безразмерную) скорость z . Условие (5) стягивает прямые (3) в пучок, центр которого определяется значением¹ b .

Из формулы (4) следует, что при некоторых p и ν величина z определяется параметром b и характерной для исходной системы величиной ν_r , а между z' и z'' , которым соответствуют значения показателей давления ν' и ν'' , имеется простая связь: $(z')^{\nu_r - \nu'} = (z'')^{\nu_r - \nu''}$. Применение (2) позволяет также сделать заключение о том, можно ли в пределах серии гетерогенных систем получить смесевую композицию с заданными скоростью горения и показателем давления или о возможных скоростях при заданном ν , и наоборот.

Однако во всех рассмотренных случаях использования (2), (5) необходимо иметь в виду корреляционный характер этих соотношений. По этой причине центр пучка прямых типа (3) становится несколько размытым, а расчеты приобретают вероятностный и оценочный характер. В непосредственной близости от области, принимаемой за центр пучка, или при достаточно малых отклонениях в значениях ν , отклонения точки пересечения прямых от расчетного центра пучка могут обусловить результат, качественно противоположный ожидаемому по (2).

На рис. 1 схематично представлен центр

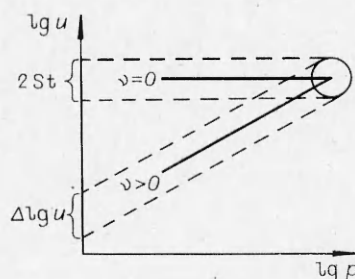


Рис. 1. К определению характера и величины отклонений от наиболее вероятных значений.

¹ Значения параметров a и b , найденные из выражений типа (4), не отражающих статистическую картину, могут отличаться от среднестатистических.

пучка в виде круга, границы которого определяются отклонениями a и b от математического ожидания этих величин. Вследствие неопределенности положения центра пучка вместо одной линии, например, с $v=0$ или некоторым $v>0$, в интервале $\Delta \lg u$ могут реализоваться любые прямые с теми же наклонами, в том числе и пересекающиеся за пределами круга при $\lg p < b$. Для последних большему v будет соответствовать большее u , что по [2] имеет место лишь при $\lg p > b$, а в точке пересечения — одному и тому же u — разные v , что не соответствует соотношению (2), если оно рассматривается как строгая функциональная связь. Важно отметить, что ошибку, появляющуюся за счет корреляционного характера (2), можно учесть: данные по стандартным отклонениям (s) для величин a и b , приведенные для ряда систем в [1], позволяют с заданной вероятностью найти предельные отклонения от центра пучка. С помощью рис. 1 получим

$$1/2 \cdot \Delta \lg u = \pm st \sqrt{1 + v^2}, \quad (6)$$

где t — коэффициент перевода стандартного отклонения в предельное (значение t определяется представительностью выборки и доверительной вероятностью).

Рассмотрим, в какой мере изложенное согласуется с экспериментом. В литературе имеется большое количество данных по влиянию добавок на горение перхлората аммония (ПХА). Многие смеси на основе этого окислителя охватываются двумя корреляционными зависимостями [1]:

$$\lg \beta = 0,996 - 2,944v, \quad (7)$$

$$\lg \beta = 0,280 - 1,895v \quad (8)$$

(размерности u ($1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$); p атм)). В связи с этим при анализе смесей с ПХА с помощью (2) и (5) необходимо различать две корреляционные серии. Особые случаи, не рассматриваемые в этой работе, отвечают области пересечения прямых (7) и (8), в которой однозначное разделение смесей на серии невозможно, и области неустойчивого горения ПХА ($p = 20-40$ МПа), в которой v_r быстро изменяется с давлением, и значения v_r фактически не известны, а сами корреляции могут вообще не

Т а б л и ц а 1

Активатор	Химическая формула	Методика синтеза	z	
			$p=0,1$ МПа	$p=4$ МПа
Ферроцен	$(C_5H_5)_2Fe$	Реактив	1,88	1,59
Пикрат феррирования	$[(C_5H_5)_2Fe]OC_6H_2(NO_2)_3$	[7]	1,78	1,51
Ванадат феррирования	$[(C_5H_5)_2Fe]V_4O_{13}$	[8]	1,33	1,32
Роль Рейнеке	$NH_4[Cr(CNS)_4(NH_3)_2]$	Реактив	1,40	1,24
Рейнекат феррирования	$(C_5H_5)_2Fe[Cr(CNS)_4(NH_3)_2]$	[7]	2,80	1,81
Сейнекат меди	$Cu[Cr(CNS)_4(NH_3)_2]$	Реактив	1,72	1,79
Полиядерный тартратный комплекс меди и хрома	$K_{16}[CuCr_2(C_4H_2O_6)_6]$	[9, 10]	—	1,07
То же	$Li_{16}[CuCr_2(C_4H_2O_6)_6]$	[9, 10]	—	1,37
Железо(III)гексатиоцианато-N-хромат(III)	$Fe[Cr(CNS)_6]$	[12]	—	1,29
Калий(I)мел(II)гексатиоцианато-N-хромат(III)	$KCu[Cr(CNS)_6]$	[12]	—	1,28
Тетрапиридинмел(II)дихромат	$[Cu(C_5H_5N)_4]Cr_2O_7$	[11]	—	1,40
Хромит меди	$CuCr_2O_4$	Реактив	1,72	1,79

² Для простоты (2) представляется регрессией $\lg \beta$ по v и берется среднее значение отклонений a и b : $s = 1/2(s_a + s_b)$.

выполняться. Примеры невыполнения (2) приводились в [1] и не рассматриваются ниже; особенности изменения z для смесей с ПХА при $p = 20 \div 40$ МПа (область FG на рис. 2) также не анализируются.

При выполнении (8) максимальный каталитический эффект для $p = 5$ МПа и 95%-ного доверительного интервала ($\pm 2s$) составляет $Z_0 \approx 1,8$ ($v_r = 0,75$). Экспериментальное значение z при этом же давлении в области плато ($v = 0$) на кривой $u(p)$, которое реализуется для ПХА с 1% салицилата натрия (смеси с содержанием этой добавки 0,05—5% удовлетворительно описываются выражением (8) в диапазоне давлений, включающих $p = 5$ МПа), равно 1,75 [3]. В цитированной работе, содержащей очень большой экспериментальный материал, имеются примеры более низкого значения Z_0 (1,3; 5% бензоата натрия), что формально объясняется размытием центра пучка; однако при $v \geq 0$ и $p = 5$ МПа значения $z > 1,8$

не получены, хотя наибольшие эффекты изменения скорости горения ПХА достигнуты именно в этой работе.

В [1] отмечалось, что смеси ПХА с бутилкаучуком характеризуются близкими к входящим в (8) значениями a и b , в связи с чем появляется возможность дальнейшей экспериментальной проверки расчетных максимальных каталитических эффектов для случая, удовлетворяющего (8), па других более сложных, чем ПХА с добавкой, системах.

В табл. 1 приведены значения z для разнообразных веществ, испытывавшихся в качестве активаторов горения смеси ПХА с бутилкаучуком. Смеси содержали 25% бутилкаучука, 3% активатора и получены по методике [5]. Основными отличительными особенностями использованных активаторов является наличие групп окислителей или двух α -элементов в их составе. Наибольшее значение u при атмосферном давлении и 4 МПа получено для рейнеката феррициния (соответственно $z = 2,8$ и 1,8). Приблизительно такую же активность при 4 МПа проявляют рейнекат и хромит меди; несколько менее активен ферроцен.

Расчет, проведенный подобно предыдущему, при $p = 4$ МПа и найденном для ПХА и бутилкаучука $v_r = 0,5$ дает $Z_0 = 1,9$. При $p = 0,1$ МПа, как и следовало ожидать по (5), Z_0 больше, однако его расчетное значение (если считать, что в этой области давлений $b = 1,895 - 1,008 = 0,887$) в несколько раз превышает максимальное экспериментальное. Последнее может быть объяснено тем, что характер зависимости эффективности активатора горения от давления может меняться. Приведенные результаты показывают, что экспериментальные и расчетные максимальные каталитические эффекты удовлетворительно согласуются, если для расчета используются значения a и b , найденные из данных по β и v , полученных в том интервале давлений, для которых проводится расчет.

В [3] для некоторых смесей ПХА с сажой, сахарозой, полиметилметакрилатом при $p = 5$ МПа получены значительно большие z , чем рас-

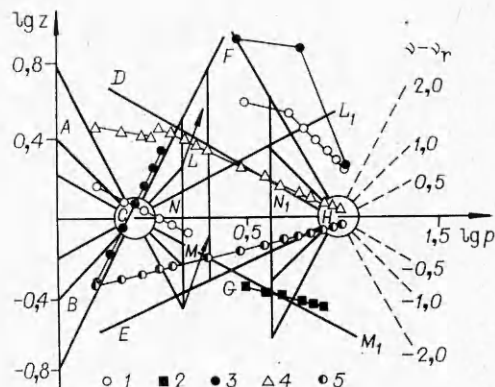


Рис. 2. Схема корреляционных пучков для ПХА и смесей на его основе. Круги радиусом $4s$ — центры пучков, стрелки указывают направление резкого изменения $\lg z$ в результате уменьшения $v_{\text{ПХА}}$ до отрицательного значения. Экспериментальные данные (β и v) по [3]:

- 1 — 0,5% салицилата натрия ($v - v_r = -0,5$ при $p = 5 \div 40$ МПа, $v - v_r = -0,45$, $p = 40 \div 100$ МПа);
- 2 — 5% фторида аммония ($v - v_r = -0,25$, $p = 20 \div 100$ МПа);
- 3 — 10% бихромата калия ($v - v_r = 2,06$, $p = 5 \div 10$ МПа, $v - v_r = -1,9$, $p = 50 \div 100$ МПа);
- 4 — ПХА + сахароза + 5% бихромата калия ($v - v_r = -0,15$, $p = 5 \div 10$ МПа; $v - v_r = -0,43$, $p = 10 \div 100$ МПа);
- 5 — ПХА + нитрогуанидин + 5% фторида аммония ($v - v_r = 0,25$, $p = 5 \div 100$ МПа).

Т а б л и ц а 2

Выполняющиеся для смесей корреляции	Характеристика значений v	Маршруты изменения $\lg z$ (рис. 2)	Отдельные примеры ПХА-смесей с горючими и с добавками по [3]
(8) при $p < 15$ атм (7) при $p > 40$ атм	$v_8 > v_{\text{ПХА}} > v_7$ $v_8 < v_{\text{ПХА}} > v_7$	$BCLFH$ $ACMFH$	10% биохромата калия 5% салицилата патрия
(7)	$v > v_r$ $v < v_r$ $v_{\text{ПХА}(p > 40)} > v > v_{\text{ПХА}(p < 15)}$ $v_{\text{ПХА}(p > 40)} \approx v > v_{\text{ПХА}(p < 15)}$	EH DH $EMFH$ $EMFN_1H$	ПХА+нитрогуанидин+5% фторида аммония ПХА+сахароза+5% бихромата калия 5% бензоата висмута 5% хлорида свинца
(8)	$v > v_{\text{ПХА}(p < 15)}$ $v < v_{\text{ПХА}(p < 15)}$ $v < v_{\text{ПХА}(p > 40)}$	BCL ACM GM_1	5% бензоата алюминия 1% хлорида натрия 5% фторида аммония

Примечание. v_7, v_8 — значения v в области выполнения (7) и (8) соответственно; $v_{\text{ПХА}} = v_r$ для чистого ПХА; в скобках при v указана область давления (МПа).

смотренные выше. Максимальное значение $z = 6$ зафиксировано для смеси ПХА с сажой, содержащей Na_2S . Все эти случаи, в отличие от предыдущих, охватываются выражением (7), в котором b (следовательно, и Z_0) больше, чем в (8). По [3] значению $z = 6$ соответствует плато на зависимости $u(p)$, поэтому интересно сравнить это значение с расчетным Z_0 для (7). Сравнение показало, что даже найденное по нижнему уровню (6) значение Z_0 на 1,7 превышает экспериментальное, т. е. последнее не входит в границы изменения Z_0 , определяющиеся размытием пучка. Отмеченное расхождение связано с тем, что в [3] лишь качественно охарактеризована как «плато» зависимость $u(p)$ в интервале давлений 5—20 МПа, так как из приведенных там же данных (см. табл. 22) следует, что при изменении p от 5 до 15 МПа u увеличивается от 4,8 до 5,9 г/(см²·с), т. е. $v > 0$. Можно полагать поэтому, что при $v = 0$ $Z_0 > 6$. Таким образом, и для серии, описывающейся выражением (7), больших расхождений расчета с данными опыта нет.

Для гетерогенных конденсированных систем на основе ПХА наиболее высокие z (до 20) наблюдаются в интервале давлений 30—60 МПа, уменьшающиеся затем в области 60—100 МПа [3]. Эту особенность, а также ход изменения z для различных ПХА-систем можно представить в обобщенном виде, если использовать корреляцию (5), в соответствии с которой прямые (3) образуют пучки, представленные для выбранных значений $v - v_r$ на рис. 2. В табл. 2 проводится сравнение определяемого по $v - v_r$ и рис. 2 маршрута изменения $\lg z$ с наблюдавшимся в эксперименте [3]. Некоторые примеры сравнения с экспериментом показаны и на рис. 2. Из приведенных данных следует, что предсказываемые корреляционными зависимостями маршруты реализуются в действительности³.

³ Маршруты считаются одинаковыми для i смесей, если все $\lg z_i$ изменяются в направлении одних и тех же обозначенных на рис. 2 точек излома, т. е. симбатно. Совпадение точек с одними и теми же обозначениями для одинаковых маршрутов различных смесей не обязательно.

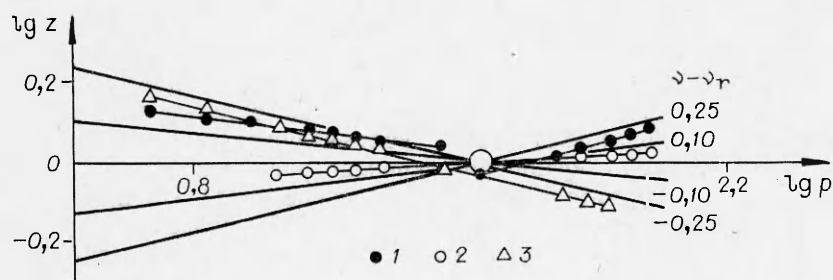


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных [3] с расчетом по (5) для тротила с добавками.

1 — 5% хромата свинца ($v - v_r = -0,2$, $p = 2,5 \div 40$ МПа, $v - v_r = 0,39$, $p = 40 \div 100$ МПа); 2 — 5% оксината меди ($v - v_r = 0,03$, $p = 10 \div 100$ МПа); 3 — 5% пентаоксид ванадия ($v - v_r = -0,24$, $p = 3 \div 80$ МПа).

Проводя подобное сравнение, следует иметь в виду что оно осложнено не столько корреляционным характером соотношения (5), сколько ошибками в определении z , v , v_r , и в особенности тем, что $v_{ПХА}$ (v_r) в зависимости от свойств образцов ПХА может изменяться в одном и том же диапазоне значений p в довольно широких пределах (от $\sim 0,5$ до $\sim 0,8$ при $p = 5\text{--}15$ МПа [3]).

Максимальный эффект уменьшения скорости горения ПХА при росте v до ~ 1 и $p = 5$ МПа наблюдается при выполнении (7) и соответствует $z = 0,23$ [3]. Оценка по (4) с учетом (6) для случая (7) дает $Z_1 = 0,17$ при $v_r = 0,5$ ($0,34$ при $v_r = 0,75$). Для серий, описывающихся соотношением (8), $Z_1 = 0,58$ ($0,63$ при $v_r = 0,75$), что также согласуется с данными опытов [3]. По рис. 2 можно проследить за изменениями z при ингибировании. На нем отражены также переходы от ингибирования к катализу (и наоборот), наблюдавшиеся экспериментально [3]. Например, для смесей с CaO [3] характерны маршруты *АСМФН* и *ЕМФН*.

Зависимость z от p для смесей на основе других ВВ может быть охарактеризована аналогичным образом. Рассмотрим несколько примеров. В [1] отмечалась хорошая корреляция β и v для смесей тротила, а на рис. 3 приведен соответствующий им корреляционный пучок. Из рис. 3 и данных по $v - v_r$ можно получить в неплохом соответствии с экспериментом все основные типы зависимости $\lg z$ от p , наблюдавшиеся в [3], несмотря на небольшую величину самих эффектов.

За некоторыми исключениями, естественными для статистических закономерностей, о такого же рода соответствии можно говорить для смесей пикриновой кислоты, дины и др. В случае нитрата аммония с добавками ($\geq 5\%$) охарактеризовать зависимость z от p трудно, так как чистый нитрат аммония не горит. Соответственно высоким значениям b в смесях этого окислителя типа аммонита для добавок, уменьшающих показатель давления ($v - v_r < 0$), наблюдается закономерное уменьшение z с ростом p [3]; при $v - v_r \simeq 0$ добавки практически не влияют на скорость горения.

Оценка максимального увеличения скорости (Z_0) по (4) показывает, что при $p = 5$ МПа для пикриновой кислоты $Z_0 \sim 3$ и близко к 10 для тротила. Первое значение согласуется с наибольшим из экспериментальных значений $z = 2,4$ [3], а второе — значительно больше экспериментального $z < 1,5$ [3]. Таким образом, в случае тротила имеются трудности практической реализации расчетной величины Z_0 . Вероятно, они обусловлены тем, что горение тротила и подобных ему ВВ определяется газофазными реакциями [6], а интенсификация процессов в ж-фазе с помощью добавок неэффективна вследствие легкости испарения и устойчивости тротила к действию катализаторов. Менее устойчива из-за наличия гидроксильной группы пикриновая кислота, легче подвержена действию ката-

лизатора в κ -фазе, благодаря чему при горении ее смесей оказывается «включенным» эффективный механизм κ -фазного ускорения горения.

Предлагаемый подход к оценке эффектов влияния добавок на горение индивидуальных ВВ и смесей не связан с какой-либо конкретной математической моделью горения, учитывающей процессы переноса и физико-химические превращения в конденсированном веществе. Он основан на формальных эмпирических соотношениях (1), (2) или следствиях из них, при выполнении которых связь между показателем давления и скоростью горения в пределах серии смесей становится достаточно определенной.

Анализ экспериментального материала [1] показывает, что подавляющее большинство смесей одного типа, состав которых варьируется в сравнительно небольших пределах ($\sim 5\%$, иногда и более), образуют корреляционную серию, описываемую в некотором интервале изменений внешних условий конкретной зависимостью (2). В смесях этой серии могут быть проведены многочисленные изменения параметров (соотношения и дисперсность компонентов, природа добавок-активаторов и флегматизаторов горения и др.), но эти изменения, как правило, не влияют на величины a и b зависимости (2). Поэтому найденные в ограниченном по объему эксперименте значения a и b могут использоваться для вероятностного прогнозирования характеристик горения других смесей этого же типа, в частности, интервала возможных значений скорости горения при некотором ν , и наоборот.

Есть основания считать [1, 2], что выполнимость (2) определяется единством механизма горения (основных термодинамических и кинетических характеристик процессов, протекающих при горении), присущего смесям данной серии в некотором интервале давлений. Изменения механизма меняют или нарушают (практически это обнаруживается по выпадающим точкам) зависимость (2), благодаря чему имеется возможность выявить смеси с принципиальными отличиями в характере горения. Последним отвечают другие значения a и b , а следовательно, и другие характеристики горения, например пределы регулирования скорости горения.

Корреляционный характер соотношений (2) и (5) и аппроксимационный характер соотношения (1) накладывают ограничения на точность количественных оценок, однако она во многих случаях превосходит чисто теоретические, дающие обычно лишь порядок величины. Очевидно, что распространение выводов, сделанных на основе отрицательной корреляции (2), (5), на все те случаи, когда изменение β и ν не превышает разброса экспериментальных данных, неправомерно. Число точек, резко выделяющихся из некоторой зависимости типа (2), можно использовать для расчета (известными методами [13]) надежности предсказаний, основанных на этой зависимости.

В целом отрицательная корреляция (2), (5) позволяет разбить гетерогенные конденсированные системы на серии, в пределах которых имеется определенная связь между u и ν , проводить оценки скорости горения и ее изменения в областях значений ν , труднодоступных для экспериментальной проверки, дает возможность в общем виде представить зависимость скорости горения (или z) этих систем от давления, а анализ причины существенных отклонений от этой зависимости может указать нетривиальные пути воздействия на горение и способствовать целенаправленному подбору добавок.

*Поступила в редакцию
19 / XII 1979*

ЛИТЕРАТУРА

- 1 А. И. Леспинович. ФГВ, 1979, 15, 1.
2. А. И. Леспинович. Вест. Белорус. ун-та, 1979, II, 2.
3. А. П. Глазкова. Катализ горения взрывчатых веществ. М., Наука, 1979.
4. И. Д. Скворцов, М. С. Шур.— В кн.: Итоги науки и техники. Авиационные и ракетные двигатели. Т. 1. М., ВИНТИ, 1974.
5. А. В. Болдырева, Р. П. Митрофанова и др. ФГВ, 1975, 11, 5.
6. С. С. Новиков, П. Ф. Похил, Ю. С. Рязанцев. ФГВ, 1968, 4, 4.
7. J. J. Ravlik, J. Klikorka. Col. Czech. Chem. Commun., 1965, 30, 3.
8. П. Н. Гапоник, А. И. Леспинович, Ю. Г. Орлик. Журн. неорг. хим., 1977, 22, 2.
9. М. Е. Цимблер, С. М. Цимблер, А. В. Коваль. Журн. неорг. хим., 1972, 17, 11.
10. М. Е. Цимблер, С. М. Каральник и др. Укр. хим. журн., 1973, 39, 7.
11. C. H. Burnside. Pat. USA, № 3753348.
12. H. Inoue, S. Janagisawa. J. Inorg. and Nucl. Chem., 1973, 35, 7.
13. Л. М. Батунер, М. Е. Позин. Математические методы в химической технике. Л., Химия, 1971.

ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ ПРИ СПУТНОЙ ПОДАЧЕ ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ

Е. А. Мещеряков, В. А. Сабельников

(Жуковский)

Расчетное исследование процессов горения в сверхзвуковых потоках в общем случае представляет значительные трудности [1]. Известные в литературе исследования сверхзвукового горения в каналах выполнены в основном для плоских и осесимметричных течений в приближении пограничного слоя, в том числе и при конечных скоростях химических реакций (см., например, [2—4]).

Достаточно широко распространен случай, когда топливо и окислитель подаются отдельно, а процесс горения лимитируется смешением (диффузионное горение) [1]. В этом случае при некоторых предположениях [5, 6] удастся исключить из рассмотрения кинетику горения, сведя задачу к задаче о диффузии пассивной примеси (см., например, в такой постановке задачу о горении затопленной дозвуковой турбулентной струи [7, 8]).

В данной работе этот подход обобщается на случай сверхзвукового диффузионного горения водорода в канале, когда условия полного подобия нарушаются вследствие отличия числа Прандтля от единицы, наличия трения и теплоотвода на стенках, а также различия в начальных распределениях параметров на входе в канал. Учет этих обстоятельств приводит к необходимости рассмотрения нескольких пассивных примесей.

Задача решается в приближении пограничного слоя. Процессы смешения описываются с помощью полуэмпирического уравнения для турбулентной вязкости [9], модифицированного с целью учета эффектов сжимаемости. Расчетная методика апробирована сопоставлением с известными из литературы экспериментальными данными и со специально поставленными опытами.

1. Рассматривается (рис. 1) истечение сверхзвуковой (с числом Маха M_1) турбулентной струи топлива (H_2) из плоского или осесимметричного сопла в спутной сверхзвуковой (с числом M_e) поток воздуха, распространяющийся в канале (индекс 1 относится к параметрам центральной