



Рис. 4. Выход топливной NO_x при вводе в ТС-1 различных азотсодержащих соединений.

а) режим 1; б) режим 2; 1 — пиридин; 2 — пиперидин; 3 — анилин; штриховые линии: $g = 0,683 (1 + [N])^{-1,586}$ (а) и $0,697 (1 + [N])^{-1,218}$ (б).

димому, атому азота труднее «освободиться» из бензольного кольца (пиперидин), чем порвать связи в аминной группе (анилин) или в нафтеновом кольце с одинарными связями (пиперидин). Эти данные опровергают предположения, выдвинутые в [3, 4], о том, что весь азот топлива мгновенно переходит в NO , а далее конечный выход NO_x определяется кинетикой образования и разложения по термическому механизму Зельдовича. Во всяком случае, погрешность такого допущения по полученным в настоящей работе данным следует оценивать до 20%.

Для более детальной идентификации механизма образования топливной NO_x требуются дальнейшие исследования, но они, по-видимому, будут иметь чисто научный интерес, поскольку на практике даже идентифицировать азотсодержащие соединения в топливе не всегда удается. Указанные обстоятельства затрудняют точную априорную оценку «выхода» оксидов азота газотурбинного двигателя, однако для приближенных расчетов можно рекомендовать следующую обобщенную зависимость с погрешностью до 10% на уровне $[N] = 0,1\%$ и до 25% при $[N] = 1,0\%$, полученную статистической обработкой экспериментальных данных на обоих режимах для керосинового пламени и различных азотсодержащих соединений:

$$g = 0,690 \cdot (1 + [N])^{-1,387}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Канило, В. Д. Однолетков, В. И. Шмидт. — В кн.: Вопросы теории и расчет рабочих процессов тепловых двигателей. № 5. Куйбышев, 1981.
2. В. А. Крутиев и др. Теплоэнергетика, 1976, 10.
3. Хун. Энергетич. машины и установки, 1976, 3, 22.
4. Хун. Там же, 1977, 4, 86.
5. З. А. Саблина. Состав и химическая стабильность моторных топлив. М.: Химия, 1978.
6. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М.: Изд-во АН СССР, 1947.

Поступила в редакцию 21/X 1985,
после доработки — 27/VII 1986

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ХЛОРИРОВАННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВ

А. С. Мальцева, Г. М. Ронкин, Ю. Е. Фролов,
Е. П. Якушина, А. И. Розловский
(Москва)

Критерии пожароопасности твердых продуктов

При изучении горючих свойств твердых материалов принято измерять следующие параметры: массовую скорость сгорания, скорость распространения зоны горения по поверхности, calorиметрические характеристики сгорания, кислородный индекс, т. е. минимальное содержание кислорода в атмосфере, при котором возможно устойчивое горение, температуры воспламенения и самовоспламенения [1, 2]. Два последние тер-

мина здесь использованы в соответствии с установками ГОСТа [3]. Следует указать, что эти установки не во всем совпадают с общепринятыми в мировой, в частности отечественной, научной литературе.

Согласно [3], температура самовоспламенения $T_{св}$ — минимальная, «при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающееся пламенным горением». В таком определении неясно, что считать «пламенным горением», какой режим заканчивается таким горением, обязательно ли «пламенное горение» для самовоспламенения, какое увеличение скорости реакции следует считать достаточно резким и как это зафиксировать. Сравнивая между собой механизмы самовоспламенения твердых тел и однородных газовых систем, приходим к выводу, что понятию температуры самовоспламенения твердого тела больше соответствовало бы другое определение.

Известно [4], что горение твердых материалов, способных пиролизываться с образованием горючих газов и паров, обычно возникает в газовой фазе. Образующиеся при пиролизе газообразные продукты создают при контакте с атмосферным воздухом диффузионное пламя. Конвективное нагревание твердого горючего от зоны пламени приводит к дальнейшей газификации. До освобождения всех летучих компонентов на стадии предварительного нагревания твердый материал разлагается, но окисляются лишь продукты разложения. Твердая фаза является резервуаром непрерывно поступающих в пламя горючих газов.

Критическая температура самовоспламенения газовой среды характеризуется режимом, при котором возникает прогрессивное самоускорение реакции, обусловленное накоплением в реагирующей системе тепла или активных центров разветвленного цепного процесса (см. [4]). Предел такому самоускорению может положить израсходование недостающего (по стехиометрическим соотношениям) компонента или накопление продуктов реакции, препятствующих дальнейшему превращению, например, вследствие диффузионного сопротивления их слоя.

В связи с изложенным было бы целесообразно считать, что для твердых горючих материалов температура самовоспламенения, если сохранять и в дальнейшем этот термин, соответствует началу прогрессивного ускорения тепловыделения. Существенное отличие механизма самовоспламенения твердых тел от газов обусловлено более ограниченной ролью температуры реагирующей среды вследствие выраженного диффузионного характера горения твердого тела. Специфика разогрева при загорании твердых материалов побудила авторов видоизменить систему оценки их пожароопасности. Для определения температур самовоспламенения предложен видоизмененный способ и устройство для его выполнения.

Малоинерционный прибор упрощает аппаратуру и процедуру измерения, уменьшает инерционность устройства и позволяет следить за температурой зоны реакции у поверхности исследуемого образца одновременно с визуальным наблюдением за изменением последнего в ходе опыта. Установлено, что резкое ускорение нагревания не всегда сопровождалось появлением видимого пламени.

Оказалось целесообразным принять в качестве основного критерия самовоспламенения не появление видимого пламени, а характер повышения температуры при заданных геометрических параметрах, режимах нагревания и подачи воздуха. Возможность возникновения саморазогрева — объективный, наиболее наглядный критерий пожароопасности твердого горючего материала. Светящееся пламя невоспроизводимо возникало в ряде опытов на последующих после начала резкого саморазогрева этапах, при более высоких температурах, а во многих случаях вообще отсутствовало. Описанный способ использован для изучения инициирования горения образцов полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и различных хлорполиэтиленов (ХП).

При изучении горючих свойств полимерных материалов целесообразно не прибегать к распространенному методу определения кислород-

ного индекса, а ограничиться изучением инициирования горения исследуемых продуктов исключительно в воздушном потоке. При этом критерием пожароопасности может служить температура самовоспламенения, если она будет существенно изменяться в ряду изучаемых объектов, характер саморазогрева при инициировании горения и вероятность загорания испытываемых материалов в эквивалентных условиях.

Методика опытов и обработки результатов

Все термограммы изменения температуры над поверхностью исследуемого образца получены с помощью хромель-копелевых термопар диаметром 0,2—0,4 мм и автоматического самопишущего потенциометра ПСР1-08. В большинстве опытов навеска горючего $m = 0,1$ г. Увеличение m до 0,2 г и указанное варьирование диаметра спая не влияли на результаты измерений. Расход подаваемого в реактор воздуха дозировали по показаниям реометра, среднюю начальную линейную скорость потока v_0 в большинстве опытов варьировали в диапазоне 0,41—1,7 см/с.

Исследуемый, помещенный в кварцевую лодочку, образец размещали внутри устанавливаемого горизонтально трубчатого кварцевого прозрачного реактора диаметром 25 мм: реактор был снабжен нагревающим элементом. Малые габариты, а с ними и тепловая инерционность аппаратуры позволяли получать начальную скорость разогрева $\varphi_1 = (dT/dt)_1 = 35 \div 170$ град/мин (в большей части опытов 35—80; T — температура, °С; t — время, мин; в дальнейшем размерности опускаем). После завершения всех подготовительных операций включали обогрев при постоянном напряжении на клеммах нагревающего элемента.

На термограммах, описывающих процесс самовоспламенения, можно различить три специфических участка. Начальной стадии нагревания ($\varphi = \varphi_1$) отвечает режим, когда влияние химического превращения еще невелико. По мере повышения температуры реактора скорость его разогрева обычно несколько уменьшается в результате увеличения теплоотвода в окружающее пространство (конвективного и радиационного) и протекания эндотермического процесса пиролиза. На стадии, предшествующей началу быстрого саморазогрева, величина φ в большинстве опытов достигает наименьшего (от начала нагревания) значения φ_2 . Саморазогрев, связанный с началом окисления продуктов пиролиза, соответствует резкому увеличению φ до φ_3 .

Критическую температуру $T_{св}$ можно определить по точке пересечения касательных к отрезкам (близким к линейным) кривой $T(t)$ при начале саморазогрева, эту точку легко зафиксировать на всех термограммах, когда наблюдался саморазогрев. Начало режима самоускорения характеризует отношение φ_3/φ_2 . В некоторых опытах на последующих этапах процесса отмечался еще один скачок температуры. После первого и второго воспламенений иногда резко, но ограниченно понижалась температура, что, очевидно, связано с продолжающимися за счет запасенного физического тепла процессами эндотермической газификации.

Надо полагать, что при увеличении содержания кислорода в газовом потоке инициирование горения происходило бы с большей вероятностью и при более низких температурах. Этот эффект можно было бы интерпретировать как увеличение кислородного индекса с увеличением исходного содержания хлора в полимерном материале.

Результаты измерений

Изучено поведение при нагревании исходного ПЭВД и 15 типов ХП; последние различались между собой массовым содержанием хлора, а также способом изготовления. Все отечественные образцы хлорполиэтилена получены хлорированием ПЭВД в растворе CCl_4 , импортные (кроме аллопрена) — хлорированием в водной суспензии. Значения φ_1 , φ_2 , φ_3 и $T_{св}$ при фиксированных v_0 определяли по термограммам и усредняли для

групп параллельных опытов с образцами данного продукта. Результаты представлены в таблице. В ней указан диапазон значений отношения φ_3/φ_2 (при данном v_0) и усредненная величина ($\overline{\varphi_3/\varphi_2}$), аналогичные характеристики для $T_{св}$, а также отношение числа опытов, в которых появлялось видимое пламя I^+ , к полному числу опытов с саморазогревом ΣI .

В большинстве опытов $\overline{\varphi_3/\varphi_2}$ слабо увеличивается с уменьшением скорости газового потока, поскольку тепловыделение здесь еще не началось и уменьшение v_0 сокращает теплоотвод. При переходе к режиму саморазогрева скорость роста температуры значительно повышается. Заметна тенденция возрастания $\overline{\varphi_3/\varphi_2}$ с увеличением скорости газового потока, очевидно, в связи с интенсификацией химической реакции.

Найденная для ПЭВД $T_{св}$ несколько возрастает с замедлением воздушного потока: при $v_0 = 1,7 \div 0,41$ $T_{св} = 388 \div 423^\circ\text{C}$. Эти значения удовлетворительно согласуются с приводимыми в [5, 6] величинами: $T_{св} = 417$ и 440°C ; различие $T_{св}$ свидетельствует о невозможности более точного измерения.

Флегматизация полиэтилена как горючего при его хлорировании

Были сопоставлены между собой результаты изучения поведения при нагревании в воздушном потоке образцов исходного ПЭВД и всех ХП, содержащих от 22,0 до 41,4% хлора. Они различаются между собой тем, что во всех без исключения опытах с ПЭВД зафиксировано иницирование горения, тогда как для ХП в части опытов самоускорение окисления не имело места. Лишь образцы ХП марки SD674 (США), содержащие 26,5% Cl, загорались всегда. Видимое пламя в опытах как с ПЭВД, так и с ХП, где происходило самоускорение разогрева, возникало не всегда. В тех случаях, когда оно появлялось, каких-либо других отличий не наблюдали. Полученные результаты доказывают, что $T_{св}$ — неподходящий критерий пожароопасности хлорсодержащих полимеров. Явственной зависимости $T_{св}$ от содержания хлора в ХП обнаружить нельзя. Значения $T_{св}$ у образцов ХП лишь немногим больше, чем у исходного ПЭВД. Не обнаруживает заметной зависимости от состава и отношение $I^+/\Sigma I$.

В большей степени критерием пожароопасности можно считать вероятность возникновения режима саморазогрева при окислении в воздушном потоке. Однако полученные результаты не позволяют установить закономерности, определяющие зависимость горючих свойств от состава при $[\text{Cl}] \leq 41,4\%$. Опыты по иницированию горения различных ХП демонстрируют выраженную неоднородность этих материалов. Только этим можно объяснить случайный характер возникновения горения различных образцов одного и того же продукта в аналогичных условиях.

Из изложенного следует, что все рассмотренные типы ХП менее пожароопасны исходного ПЭ, но все же горючи. Иные результаты получены с образцами ХП, содержащими 63 и 65% хлора. Опыты показали, что эти полимерные материалы безусловно не загорались: ни их разогрев в воздушном потоке, ни появление видимого пламени не имели места.

В дальнейшем целесообразно рассматривать ХП как вещество, состав которого описывается эмпирической формулой $\text{C}_2\text{H}_{4-x}\text{Cl}_x$. Очевидно, что значение x определяет соотношение: $\frac{35,5x}{35,5x + 28 - x} = [\text{Cl}] \cdot 10^{-2}$.

В диапазоне $x = 0,22 \div 0,56$ (см. таблицу) образцы ХП отличаются повышенной горючестью. Можно полагать, что при $0,56 < x < 1,34$ полимерный материал теряет способность к самоускоряющемуся окислению в воздушном потоке. Этот вывод следует считать предварительным до проведения более подробных исследований диапазона изменения массы образца и скорости нагрева.

Сопоставление критериев пожара

Код образца	[Cl], %	Число загораний Число опытов при v_0 , см/с					$\frac{\Phi_3/\Phi_2}{(\Phi_3/\Phi_2)}$ при v_0 , см/с			
		5,1	1,7	0,82	0,41	0,075	1,7	0,82	0,41	0,075
ПЭВД	0	14/14	17/17	6/6	—	—	20,8—2,61 7,59	14,8—2,83 6,01	7,88—1,86 4,48	—
50	22,0	4/6	6/6	2/5	—	—	49,6—1,49 20,8	12,5—3,65 35,7	2,57—1,87 2,22	—
131	31,8	4/5	6/6	5/6	—	—	18,3—5,33 12,7	18,0—4,86 10,0	3,99—1,09 3,19	—
48	33,4	3/5	4/7	0/4	—	—	33,7—1,06 15,9	3,50—1,12 2,13	Her Her	—
144в	35,2	5/5	5/5	3/5	—	—	44,9—6,34 17,3	16,0—9,49 12,1	24,0—1,24 9,75	—
167в	40,3	2/5	5/5	5/5	—	—	14,4—5,95 10,2	4,91—2,86 3,63	6,25—2,44 4,50	—
2	40,4	2/5	3/5	2/3	—	—	1,76—12,0 6,88	16,7—2,20 7,08	4,17—2,34 3,26	—
140	41,1	2/6	1/4	3/4	—	—	2,61—1,63 2,12	2,54 2,54	4,54—2,18 3,27	—
54в	41,4	0/5	1/5	5/5	—	—	Her Her	6,00 6,00	20,0—1,60 6,98	—
SD674(США)	26,5	8/8	7/7	4/4	—	—	15,6—2,77 9,84	23,2—2,12 9,29	2,86—1,36 2,32	—
566А(США)	35,2	1/7	8/9	5/9	—	—	8,07 8,07	2,03—1,15 1,56	3,14—1,44 2,22	—
LN14(ФРГ)	35,2	3/5	3/5	1/5	—	—	11,8—14,1 50,1	1,85—1,33 1,59	2,70 2,70	—
552(США)	35,6	1/4	3/5	4/5	3/4	—	3,50 3,50	32,2—1,48 13,2	8,60—1,67 2,50	3,54—1,67 2,70
NL12(ФРГ)	38,2	1/5	4/5	3/4	—	—	8,54 8,54	5,40—1,36 2,64	3,00—1,16 2,32	—
53	63,0	0/2	0/5	0/2	0/2	—	—	—	—	—
СРЕ-20 (аллопропен, Англия)	65,0	0/2	0/5	0/2	—	—	—	—	—	—

В заключение коснемся вопроса о причинах флегматизации полимерного продукта при частичном замещении в его структуре водорода хлором. При горении газовых систем введение одного атома хлора в молекулу этана, а тем более этилена, не делает продукт замещения негорючим: воздушные смеси не только C_2H_5Cl , но и C_2H_4Cl и даже $C_2H_4Cl_2$ считают горючими. Эти хлоруглеводороды еще содержат достаточно вещества, способного к процессам экзотермического окисления кислородом. Однако воздушные смеси любого состава не только дихлорэтана, но и хлористого этила без добавок дополнительного горючего не образуют устойчивых стационарных пламен. Даже в присутствии дополнительного горючего оба эти хлоралкана полностью не окисляются в пламени [7, 8].

Причина такой пассивности хлоруглеводородов в процессах окисления кислородом объяснена в [9]. При беспламенном пиролизе хлоругле-

опасности полимерных материалов

$\frac{T_{св}}{\bar{T}_{св}}$ при $v_0, \text{см/с}$				$\frac{\Gamma^+}{\Sigma \Gamma}$	α
1,7	0,82	0,41	0,075		
<u>433—368</u> 388	<u>486—371</u> 414	<u>443—386</u> 423	—	$\frac{14}{37}$	0
<u>494—421</u> 458	<u>462—428</u> 446	<u>461—441</u> 451	—	$\frac{7}{12}$	0,223
<u>486—457</u> 471	<u>486—428</u> 456	<u>542—457</u> 493	—	$\frac{9}{15}$	0,368
<u>482—428</u> 447	<u>486—438</u> 470	Нет Нет	—	$\frac{2}{7}$	0,396
<u>500—443</u> 465	<u>475—430</u> 456	<u>457—450</u> 454	—	$\frac{10}{13}$	0,429
<u>512—493</u> 502	<u>514—457</u> 494	<u>486—432</u> 469	—	$\frac{2}{12}$	0,533
<u>496</u> 496	<u>486—457</u> 476	<u>550—457</u> 503	—	$\frac{1}{13}$	0,535
<u>526—440</u> 483	<u>465</u> 465	<u>457—410</u> 441	—	0	0,551
Нет Нет	<u>455</u> 455	<u>467—400</u> 446	—	$\frac{1}{6}$	0,557
<u>471—408</u> 443	<u>470—330</u> 413	<u>461—410</u> 441	—	$\frac{11}{19}$	0,285
<u>418</u> 418	<u>454—410</u> 434	<u>455—436</u> 444	—	$\frac{0}{14}$	0,428
<u>500—414</u> 457	<u>486—464</u> 473	<u>486</u> 486	—	$\frac{3}{7}$	0,429
<u>457</u> 457	<u>457—420</u> 438	<u>470—429</u> 440	<u>479—442</u> 480	$\frac{2}{11}$	0,436
<u>482</u> 482	<u>468—421</u> 447	<u>493—429</u> 460	—	$\frac{2}{8}$	0,488
—	—	—	—	—	1,34
—	—	—	—	—	1,47

водородов в кислородсодержащей среде реакции окисления заторможены и начинаются только после эндотермического отщепления связанного хлора (в виде хлористого водорода). В условиях, исключающих адиабатический саморазогрев, скорость отщепления хлористого водорода больше скорости окисления даже индивидуального углеводорода. По-видимому, в смесях, содержащих хлоруглеводороды и кислород, окислительные процессы возможны только после завершения эндотермической стадии отщепления HCl. Несмотря на суммарный положительный тепловой эффект превращения хлоруглеводородов в пламени, описанное чередование стадий препятствует возникновению стабильного стационарного горения.

Можно считать, что по аналогичной причине полимеры, содержащие достаточное количество связанного хлора, хотя и способны к экзотермическому в конечном итоге окислению, но не могут служить горючим

для самоподдерживающегося устойчивого горения в воздушном потоке. Поэтому хлорполимеры представляются перспективным продуктом в отношении возможного создания на их базе негорючих материалов с широким диапазоном технических применений, что заслуживает соответствующих дальнейших разработок.

Поясним изложенное объяснение флегматизации горения. Флегматизирующее влияние различных галоидсодержащих добавок или фрагментов сополимеров было известно и ранее. Как правило, его связывали с ингибированием окислительных процессов в газовой фазе галоидводородами или другими галоидсодержащими продуктами, т. е. в данном случае с самоингибированием горящего полимерного материала [2, 10]. Были и другие объяснения, например затруднением тепло- и массообмена между газовой и твердой фазами галоидированного полимерного материала слоем кокса, образующимся на поверхности [11, 12].

Вероятно, самоингибирование, если и существует, возможно только для бром- (и иод-)замещенных полимеров. Показано [13], что замена всего азота в горючей газовой смеси хлористым водородом не влияет на концентрационные пределы распространения пламени (взрываемости). Точно так же добавка до 10% CCl_4 не влияет на нижний предел взрываемости смеси $CH_4 +$ воздух. Слой кокса вряд ли может оказать влияние на иницирование горения в начальной стадии пиролиза. В то же время эндотермические процессы на стадии газификации твердого горючего существенно изменяют структуру еще не сформировавшейся зоны горения в газовой фазе и могут послужить решающей причиной негорючести твердого материала.

Выводы

1. Изучены закономерности иницирования горения для серии хлорированных полиэтиленов методом термографирования образцов в воздушном потоке при одновременном визуальном наблюдении.

2. Установлено, что образцы хлорполиэтилена, содержащие от 22,0 до 41,4% хлора (т. е. 0,22—0,56 атомов хлора на одну группу C_{12} в среднем), с определенной вероятностью загораются в заданном режиме. В аналогичных условиях загорались все без исключения образцы исходного полиэтилена. Заметных различий в поведении сопоставляемых образцов ХП не наблюдали. Видимое пламя появляется только для части воспламенившихся образцов как ХП, так и ПЭ.

3. Критические температуры иницирования горения мало различаются между собой для всех ХП и ПЭ; найденные значения $T_{св}$ полиэтилена согласуются с известными из литературы. Величина $T_{св}$ не характеризует горючие свойства изученных материалов.

4. Неустойчивость результатов измерений для ХП свидетельствует о неоднородности их структуры, в частности по содержанию хлора.

5. Образцы ХП, содержащие 63—65% Cl, негорючи в воздушном потоке.

6. Негорючесть образцов ХП в воздушном потоке при достаточно высокой степени хлорирования по аналогии с поведением мономерных хлоруглеводородов объяснена эндотермическим пиролизом ХП, предшествующим стадии окисления. Протекание этого процесса делает невозможным стационарное горение полимера. Негорючесть высокохлорированных ХП делает их перспективным объектом для создания на их основе эффективных огнебезопасных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Кодолов. Горючесть и огнестойкость полимерных материалов. М.: Химия, 1976.
2. В. И. Кодолов. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980.
3. Пожаровзрывоопасность нефтепродуктов и химических органических продуктов. ГОСТ 12.1.017-80.

4. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
5. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. М.: Химия, 1968.
6. Там же, 1970.
7. А. С. Мальцева, И. Н. Жарова, Ю. Е. Фролов и др. Хим. промышл., 1984, 1, 19.
8. А. С. Мальцева, Ю. Е. Фролов, А. И. Розловский. Хим. физика, 1983, 2, 7, 999.
9. А. С. Мальцева, Ю. Е. Фролов, А. И. Розловский. Докл. АН СССР, 1983, 269, 873.
10. Р. М. Асеева, Г. Е. Заиков. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
11. А. Г. Гальченко, Т. В. Попова, Г. Б. Айвазян и др. Горение конденсированных веществ. Черноголовка, 1980.
12. Г. Б. Айвазян, М. Б. Ордян, Н. А. Халтуринский и др. Арм. хим. журн., 1983, 36, 391.
13. А. С. Мальцева, А. И. Розловский, Ю. Е. Фролов. Журн. Всес. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева, 1974, 19, 542.

*Поступила в редакцию 11/III 1984,
после доработки — 26/VIII 1986*

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ

В. А. Вольперт
(Черноголовка)

В работах [1—3] изучены стационарные режимы протекания экзотермической реакции в одномерном потоке. В случае неактивированной реакции анализ уравнений и численные расчеты проведены в [1], расчеты [2] и приближенный анализ [3] относятся к сильно активированной реакции. В [1—3] показано, что в зависимости от соотношения между скоростью подачи горючей смеси v и нормальной скоростью распространения пламени по неподвижной смеси u возможны различные режимы протекания реакции, причем смена режимов носит критический характер.

Исследование стационарной задачи включало в себя нахождение температурного и концентрационного профилей, расстояния l от входа в реактор до зоны горения, температуры горения. В частности, показано [1—3], что в режиме горения ($v < u$) это расстояние может быть немонотонной функцией v/u : при v/u , близких к нулю и единице, l монотонно растет вместе с v/u , а в промежуточной области убывает. Можно предположить, что стационарные состояния, отвечающие падающей ветви этой зависимости, неустойчивы [4]. Действительно, массовые скорости подачи горючей смеси и ее потребления в стационаре совпадают. Большому значению l на падающей ветви отвечает меньшая скорость потребления, поэтому случайное увеличение расстояния приведет к уменьшению скорости горения и, следовательно, к сносу фронта. Эти рассуждения были бы безусловно верны, если бы они относились к сосредоточенной системе, не допускающей колебательного поведения. В данном случае исследование устойчивости должно быть проведено непосредственно.

В настоящей работе изучается устойчивость режима горения в потоке в случае конденсированной горючей смеси, когда влиянием диффузии можно пренебречь. Задача рассматривается в постановке [3]. Предположение о сильной активированности реакции позволяет воспользоваться приближением Зельдовича — Франк-Каменецкого и заменить распределенную зону реакции поверхностью горения.

Постановка задачи

Пусть в полупространство $x > 0$ поступает через плоскость конденсированная горючая смесь. При $x > 0$ процесс горения описывается той же нестационарной системой уравнений, что и распространение пламени в конденсированной среде, но вместо нормальной скорости го-