**ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ**

ДИДЕНКО В. Н., ФАХРАЗИЕВ И. И., МАРТЫНОВ А. И.

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7

АННОТАЦИЯ. Метод базируется на известных опытных значениях верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения однокомпонентных углеводородных газов при атмосферном давлении. Предполагается корреляция значений этой температуры с адиабатной калориметрической температурой горения и низшей теплотой сгорания. Приводятся зависимости, позволяющие расчетным путем определять верхнюю и нижнюю температуру самовоспламенения при атмосферном давлении различных смесей углеводородных газов, включая попутные нефтяные газы. Результаты работы полезны при определении границ детонации углеводородных газов в цилиндрах газопоршневых установок. Влияние давления и степени сжатия учитывается по формуле Н.Н. Семенова.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: феноменологический метод, температура самовоспламенения, адиабатная температура горения, теплота сгорания, попутный нефтяной газ.

Одним из способов утилизации попутных нефтяных газов (ПНГ) является использование их в качестве топлива для газо-поршневых установок (ГПУ), например, в составе газо-поршневых электростанций. При технической реализации этого способа утилизации ПНГ необходимо учитывать возможность детонация топливной смеси в цилиндре ГПУ от разогрева до температуры самовоспламенения при неизотермическом сжатии. Таким образом, для предотвращения детонации в ГПУ газозооушной смеси, необходимо знать значения температуры самовоспламенения газовых смесей при различных давлениях.

В справочной литературе приводятся значения температуры самовоспламенения чистых (однокомпонентных) газов, полученные в экспериментах, как правило, при атмосферном давлении.

Опытные значения температуры самовоспламенения определяются на специальных установках как минимальное значение температуры равномерно нагретой газозооушной смеси, при которой в ней происходит самопроизвольное (без участия внешних источников теплоты) ускорение экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением. Для данного газа температура самовоспламенения не является постоянной величиной, так как зависит от множества факторов: концентрации горючего в газозооушной смеси, гомогенности и давления смеси, формы и размеров сосуда для нагрева смеси, скорости и способа ее нагрева, каталитического влияния стенок сосуда, и др. Экспериментальное определение температуры самовоспламенения разнообразных смесей газов (например, ПНГ с изменяющимся по времени составом) требует значительных трудозатрат. Решением этой проблемы должен стать расчетный метод определения температуры самовоспламенения смеси углеводородных газов по ее заданному составу при различных давлениях.

Для расчетного определения температуры самовоспламенения газов существует метод В.Т. Монахова [1], базирующийся на установленной опытным путем зависимости температуры самовоспламенения от средней длины углеродной цепи в структурной формуле химического соединения. Метод пригоден для расчетов в пределах гомологического ряда алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов. По этому методу определяется единственное значение температуры самовоспламенения газа при нормальном давлении.

Метод, предложенный в данной работе, является феноменологическим, поскольку не использует какие-либо физико-химические модели самовоспламенения газа, и базой метода служат значения температуры самовоспламенения чистых углеводородных газов, полученные различными исследователями в специальных экспериментах при атмосферном давлении.

Температура самовоспламенения зависит от множества различных факторов [2 – 3]. В технической литературе значения температуры самовоспламенения углеводородных газов существенно разнятся, поэтому в качестве наиболее надежной базы опытных данных в работе использовались научно-технические справочники и ГОСТы. В табл. 1 представлены опытные значения минимальной и максимальной температур самовоспламенения углеводородных газов ($t_{CB}^{\min}$ и $t_{CB}^{\max}$) по различным справочным источникам.

Таблица 1

Опытные значения минимальной и максимальной температуры самовоспламенения некоторых углеводородных газов при нормальном давлении (0,101325 МПа)

Компонент		Источник			
		[4]	[5]	[6]	[7]
Метан CH_4	$t_{CB}^{\min}, ^\circ\text{C}$	545	545	537	537
	$t_{CB}^{\max}, ^\circ\text{C}$	800	800		
Этан C_2H_6	$t_{CB}^{\min}, ^\circ\text{C}$	510	530	510	515
	$t_{CB}^{\max}, ^\circ\text{C}$	694	694		
Пропан C_3H_8	$t_{CB}^{\min}, ^\circ\text{C}$	504	504	466	470
	$t_{CB}^{\max}, ^\circ\text{C}$	588	588		
Бутан C_4H_{10}	$t_{CB}^{\min}, ^\circ\text{C}$	430	430	430	372
	$t_{CB}^{\max}, ^\circ\text{C}$	570	569		
Пентан C_5H_{12}	$t_{CB}^{\min}, ^\circ\text{C}$	284	284	309	285
	$t_{CB}^{\max}, ^\circ\text{C}$	510	510		

Анализ опытных данных показывает, что все значения температуры самовоспламенения чистых углеводородных газов находятся в области с определенными границами.

На этом основании, в работе [8] были введены понятия «нижнего» (t_{CB}^H) и «верхнего» (t_{CB}^B) пределов температуры самовоспламенения углеводородных газов. Под t_{CB}^H и t_{CB}^B понимается соответственно наименьшее и наибольшее значения $t_{CB}^{\min}$ и $t_{CB}^{\max}$ для этого газа.

В известной работе [9] численно определялась температура самовоспламенения газа в адиабатных условиях с первым порядком реакции по горючему ($m = 1$) и нулевым порядком реакции по окислителю ($n = 0$) в уравнении для скорости брутто-реакции:

$$W = k_0 \cdot C_{\text{г}}^m \cdot C_{\text{о}}^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; $C_{\text{г}}^m, C_{\text{о}}^n$ – концентрации горючего и окислителя; E – эффективная энергия активации предпламенных реакций; R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная термодинамическая температура.

Температура самовоспламенения определялась как время достижения максимума второй производной температуры газа по времени.

Результаты численных экспериментов были аппроксимированы в [9] следующим соотношением:

$$\Theta_B = 0,6 \cdot \exp(0,04 \cdot Arr), \quad (5 < Arr < 10), \quad (2)$$

где Θ_B – безразмерная температура самовоспламенения:

$$\Theta_B = \frac{T_{CB}}{T_A},$$

где T_A – адиабатная температура горения, К; T_{CB} – температура самовоспламенения, К; Arr – критерий Аррениуса:

$$Arr = \frac{E}{R \cdot T_A}.$$

Расчетные значения T_{CB} по формуле (2) значительно превышают имеющиеся опытные данные и согласуются с ними лишь качественно. Но более важно то, что из этой формулы следует однозначная связь T_{CB} с T_A при $E = const$. Начальная стадия самовоспламенения различных углеводородных газов имеет общий механизм и примерно одинаковую энергию активации [10]. На этом основании, в данной работе сделано предположение о корреляции опытных значений температуры самовоспламенения различных углеводородных газов с их температурой горения в адиабатных условиях.

Во всех расчетах, использовалась адиабатная калориметрическая температура горения при постоянном давлении, зависящая только от стехиометрического состава топливной смеси:

$$t_A = \frac{Q_H}{\sum V_j C_{pj}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где Q_H – низшая теплота сгорания 1 м³ газовой смеси при нормальных физических условиях, кДж/м³; C_{pj} – средняя (в диапазоне $0 \div t_A$) изобарная объемная теплоемкость j -го компонента продуктов сгорания газовой смеси, кДж/(м³·°C); V_j – объем j -го компонента продуктов сгорания 1 м³ газовой смеси, м³.

$$Q_H = Q_{CH_4}^H \cdot CH_4 + Q_{C_2H_6}^H \cdot C_2H_6 + Q_{C_3H_8}^H \cdot C_3H_8 + Q_{C_4H_{10}}^H \cdot C_4H_{10} + Q_{C_5H_{12}}^H \cdot C_5H_{12}, \text{ МДж/м}^3, \quad (4)$$

где $Q_{CH_4}^H, Q_{C_2H_6}^H, Q_{C_3H_8}^H, Q_{C_4H_{10}}^H, Q_{C_5H_{12}}^H$ – значения низшей теплоты сгорания компонентов ПНГ в МДж/м³; $CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}$ – объёмные доли горючих компонентов ПНГ.

Значения теплоты сгорания горючих компонентов в формуле (4) принимались по ГОСТ 22667-82 (СТ СЭВ 3359-81).

В табл. 2 и на рис. 1 представлены опытные значения t_{CB}^B и t_{CB}^H чистых углеводородных газов в зависимости от t_A .

Таблица 2

Опытные значения верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения углеводородных газов при нормальном давлении

Параметры		Газ				
		Метан CH ₄	Этан C ₂ H ₆	Пропан C ₃ H ₈	Бутан C ₄ H ₁₀	Пентан C ₅ H ₁₂
Пределы температуры самовоспламенения	$t_{CB}^H, \text{ } ^\circ\text{C}$	537,0	510,0	466,0	372	284
	$t_{CB}^B, \text{ } ^\circ\text{C}$	800	694	588	570	510
Адиабатная калориметрическая температура горения	$t_A, \text{ } ^\circ\text{C}$	2005,4	2072,3	2106,4	2148,9	2208,6
Низшая теплота сгорания	$Q_H, \text{ кДж/м}^3$	35880	64360	93180	123570	156630

Рис. 1. Зависимость верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения при атмосферном давлении чистых углеводородных газов от их адиабатной калориметрической температуры горения

Как следует из рис. 1, опытные значения t_{CB}^B и t_{CB}^H чистых углеводородных газов в зависимости от величины t_A лежат на достаточно гладких кривых. Это подтверждает предположение о корреляции опытных значений температуры самовоспламенения различных углеводородных газов с их адиабатной калориметрической температурой горения.

Аппроксимирующие кривые можно описать уравнениями:

$$t_{CB}^H = 0,000061 \cdot t_A^3 - 0,391748 \cdot t_A^2 + 833,250578 \cdot t_A - 588947,437368, \quad (5)$$

$$t_{CB}^B = \begin{cases} -0,0151 \cdot t_A^2 + 59,9462 \cdot t_A - 58731,5846, & \text{при } t_A \in [2005,4; 2106,4], \\ -0,00569 \cdot t_A^2 + 23,7882 \cdot t_A - 24274,3868, & \text{при } t_A \in [2106,4; 2208,6]. \end{cases} \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) позволяют расчетным путем определять верхний и нижний пределы температуры самовоспламенения различных смесей углеводородных газов по известным значениям их адиабатной калориметрической температуры горения. В качестве примера, определялись t_{CB}^B и t_{CB}^H реальных ПНГ, состав которых представлен в табл. 3. Опытные данные по температурам самовоспламенения этих ПНГ отсутствуют.

Таблица 3

Состав ПНГ нефтяных месторождений Удмуртской Республики

Месторождение	Состав, %									
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	C_6H_{14}	H_2S	CO_2	N_2	O_2
№ 2	14,86	0,55	4,31	2,40	1,24	0,34	0,27	0,03	76,00	0
№ 3	4,18	2,04	2,31	1,45	0,65	0,20	0,00	0,03	89,03	0,1
№ 4	10,55	0,00	10,54	7,79	2,84	0,83	0,16	1,90	65,39	0
№ 5	21,63	6,00	13,41	7,48	2,88	0,85	0,75	0,00	47,00	0
№ 6	14,69	3,20	11,48	6,35	2,37	0,66	0,18	0,01	61,06	0
№ 7	10,84	1,20	5,58	2,60	1,26	0,51	0,61	0,00	77,40	0
№ 8	0,00	0,00	24,80	19,93	6,84	2,28	0,55	23,92	21,68	0
№ 9	4,60	3,78	5,20	3,92	1,84	0,35	0,52	4,03	75,76	0

В табл. 4 для рассматриваемых ПНГ приведены расчетные значения t_{CB}^B и t_{CB}^H при нормальных физических условиях. Кроме ПНГ, в табл. 4 также представлены результаты расчетов для летней пропан-бутановой смеси: C_4H_{10} (60 %) + C_3H_8 (40 %). В справочнике [11] приводятся опытные значения температуры самовоспламенения пропан-бутановой смеси, равные 490 – 510 °С. Судя по малому диапазону изменения температуры (всего 20 °С), приведены ее средние значения. Расчет значений средней температуры самовоспламенения этой же смеси по уравнениям (5) и (6) дает 490 °С.

Таблица 4

Результаты расчетного определения верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения смесей углеводородных газов при атмосферном давлении

Газ	Параметры			
	t_A , °С	t_{CB}^B , °С	t_{CB}^H , °С	Q_H , кДж/м ³
№ 1 (пропан-бутановая смесь)	2134,5	576,1	403,8	111414
ПНГ № 2	1832,9	1073,3	606,6	15261,6
ПНГ № 3	1608,1	1429,5	697,3	8121,4
ПНГ № 4	1987,4	828,4	544,2	29155,6
ПНГ № 5	2032,7	756,7	526,0	39519,1
ПНГ № 6	1995,4	815,7	541,0	30771,2
ПНГ № 7	1846,6	1051,5	601,1	16073,2
ПНГ № 8	2080,0	681,8	506,9	62526,4
ПНГ № 9	1866,5	1019,9	593,0	17382,2

Недостатком использования адиабатной калориметрической температуры горения для определения температуры самовоспламенения углеводородных газов является то, что на практике величина t_A опытным путем не определяется. Из уравнения (3) следует, что t_A и Q_H могут быть однозначно выражены друг через друга, если известны зависимости C_{pj} от температуры. На практике опытным путем определяется низшая теплота сгорания Q_H , а ее расчетные значения, в различных источниках, различаются незначительно и не зависят от внешних условий. По этой причине было предложено в дальнейшем использовать корреляцию t_{CB}^H и t_{CB}^B не с адиабатной калориметрической температурой горения t_A , а с низшей теплотой сгорания газа Q_H .

На рис. 2 представлены графики t_{CB}^H , t_{CB}^B и t_A в зависимости от Q_H различных углеводородных газов. Для ПНГ значения t_{CB}^H и t_{CB}^B брались из табл. 4.

Кривые, соединяющие на рис. 2 значения t_{CB}^H , t_{CB}^B и t_A углеводородных газов при нормальных физических условиях, можно аппроксимировать уравнениями:

$$t_{CB}^B = 7,7 \cdot 10^{-27} \cdot Q_H^6 - 4,1 \cdot 10^{-21} \cdot Q_H^5 + 8,5 \cdot 10^{-16} \cdot Q_H^4 - 8,7 \cdot 10^{-11} \cdot Q_H^3 + 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot Q_H^2 - 0,13 \cdot Q_H + 2199,96 \quad (7)$$

$$t_{CB}^H = 1,3 \cdot 10^{-27} \cdot Q_H^6 - 7,1 \cdot 10^{-22} \cdot Q_H^5 + 1,5 \cdot 10^{-16} \cdot Q_H^4 - 1,7 \cdot 10^{-11} \cdot Q_H^3 + 9,7 \cdot 10^{-7} \cdot Q_H^2 - 0,029 \cdot Q_H + 873,62 \quad (8)$$

$$t_A = 2,22 \cdot 10^{-22} \cdot Q_H^5 - 1 \cdot 10^{-16} \cdot Q_H^4 + 1,7 \cdot 10^{-11} \cdot Q_H^3 - 1,36 \cdot 10^{-6} \cdot Q_H^2 - 0,0518 \cdot Q_H + 1280,63 \quad (9)$$

Рис. 2. Расчетные значения верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения при атмосферном давлении и адиабатной калориметрической температуры горения в зависимости от низшей теплоты сгорания углеводородных газов

Как следует из рис. 2, в области малых значений Q_H кривые t_{CB}^H и t_A пересекаются, что должно быть соответствующим образом истолковано. Для этого была использована работа [12], в которой указывалось, что на нижнем концентрационном пределе воспламенения (НКПВ) различные газозвушные смеси выделяют при горении постоянное среднее количество теплоты 1830 кДж/м^3 , называемое предельной теплотой горения. Как известно, ниже НКПВ самовоспламенение и вынужденное воспламенение газовых смесей с последующим самоподдерживающимся горением невозможно. Предельное значение теплоты горения (1830 кДж/м^3) было использовано для тестирования разработанного метода расчетного определения границ температуры самовоспламенения углеводородных газов.

По формулам (7) – (9) для смеси с $Q_H = 1830 \text{ кДж/м}^3$ получено, что нижний предел температуры самовоспламенения и адиабатная калориметрическая температура горения примерно равны ($t_{CB}^H = t_A \cong 797^\circ\text{C}$). При этом горение после воспламенения идет на пределе устойчивости при минимальном выделении теплоты горения. При $Q_H < 1830 \text{ кДж/м}^3$ самоподдерживающееся горение газозвушной смеси невозможно. Полученное хорошее количественное совпадение Q_H в точке пересечения кривых t_{CB}^H и t_A на рис. 2 с предельной теплотой горения (1830 кДж/м^3) подтверждает достоверность предложенного метода расчетного определения значений верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения углеводородных газов при атмосферном давлении.

Для учета влияния давления на температуру самовоспламенения академиком Н.Н. Семеновым, в работе [13] предложена зависимость:

$$\ln \frac{P_{cv}}{T_{cv}^2} \approx \frac{E}{2RT_{cv}} + B, \quad (10)$$

где T_{cv} – температура самовоспламенения, К; B – постоянная величина, зависящая от состава смеси и условий теплоотдачи; P_{cv} – давление газозвушной смеси при самовоспламенении, МПа.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчетов температуры самовоспламенения ПНГ № 3 при различных давлениях. Из всех ПНГ, представленных в табл. 3, он содержит наибольшее количество азота (89,03 %), ухудшающего воспламенение и горение газа.

В уравнении (10) постоянные B для ПНГ № 3 определялись по расчетным значениям температуры самовоспламенения этого газа при атмосферном давлении (табл. 4). Для нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения ПНГ № 3 получены соответственно значения $B_n = -23,73$; $B_v = -21,55$. В расчетах принималось $E = 124024$ кДж/кмоль [14].

На рис. 3 приведены кривые t_{CB}^H и t_{CB}^B ПНГ № 3 при различных значениях абсолютного давления.

Рис. 3. Расчетные значения нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения ПНГ № 3 при различных значениях абсолютного давления

При использовании ПНГ в качестве топлива для ГПУ необходимо знать изменение температуры самовоспламенения от степени сжатия ε :

$$\varepsilon = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (11)$$

где V_1 — начальный объем газа при сжатии (объем цилиндра); V_2 — конечный объем газа при сжатии (объем камеры сгорания); P_1, P_2 — начальное и конечное давление; n — показатель политропы сжатия.

На рис. 4 представлены расчетные значения нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения ПНГ № 3 при различных значениях степени сжатия с показателем политропы $n = 1,36$.

При построении рис. 4 уравнение (10) преобразовывалось к более удобному виду:

$$T_{CB} \approx \frac{E}{2R \cdot \left[\ln \left(\varepsilon^n \frac{P_{ATM}}{T_{CB}^2} \right) - B \right]}. \quad (12)$$

Графические или аналитические (12) зависимости t_{CB}^H и t_{CB}^B от степени сжатия являются основой для расчетного определения границ детонации углеводородного газа в цилиндрах ГПУ[8].

Рис. 4. Расчетные значения нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения ПНГ №3 при различных значениях степени сжатия с показателем политропы $n = 1,36$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При неизотермическом сжатии смеси ПНГ с воздухом в цилиндре ГПУ возможна детонация топливной смеси в результате ее разогрева до температуры самовоспламенения. При большом разнообразии постоянно меняющихся составов ПНГ трудоемкое экспериментальное определение температуры их самовоспламенения не может быть оперативным. В связи с этим, необходимы расчетные методы определения температуры самовоспламенения смесей углеводородных газов при различных степенях сжатия в цилиндрах ГПУ. Феноменологический метод, разработанный в данной работе, базируется на значениях температуры самовоспламенения чистых углеводородных газов, полученных различными исследователями в специальных экспериментах при атмосферном давлении. В работе используется понятие верхнего и нижнего пределов температуры воспламенения, ранее введенное авторами для массива опытных данных. На основании известных теоретических зависимостей для температуры самовоспламенения газов выдвинуто предположение о существовании корреляции опытных значений температуры самовоспламенения различных углеводородных газов с их адиабатной калориметрической температурой горения. Это предположение подтверждено полученными достаточно гладкими графиками опытных значений верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения чистых углеводородных газов, в зависимости от величины их калориметрической адиабатной температуры горения при постоянном давлении. Получены уравнения, описывающие эти аппроксимирующие кривые. Для ряда попутных нефтяных газов по этим уравнениям вычислены значения верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения, ранее неизвестные. Большой градиент температуры самовоспламенения по адиабатной калориметрической температуре горения способствует увеличению погрешностей аппроксимации. Для уменьшения погрешностей расчетного определения температуры самовоспламенения газовых смесей предложено использовать корреляцию значений верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения чистых углеводородных газов с низшей теплотой их сгорания.

Для опытных значений чистых углеводородных газов и расчетных значений попутных нефтяных газов были получены объединенные (универсальные) графики зависимости адиабатной калориметрической температуры горения и значений верхнего и нижнего пределов температуры самовоспламенения от низшей теплоты их сгорания, а также

уравнения, описывающие эти графики. Известный факт существования «предельного значения теплоты горения» (1830 кДж/м^3) различных газозвушных смесей на нижнем концентрационном пределе воспламенения подтверждает результаты, полученные работе.

Для получения зависимости нижнего и верхнего пределов температуры самовоспламенения попутного нефтяного газа от давления и степени сжатия в цилиндре ГПУ использована формула Н.Н. Семенова. Аналогичные зависимости являются основой для расчетного определения границ детонации углеводородного газа в цилиндрах ГПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. Учебник для студ. техн. вузов / 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1979. 423 с.
2. Архипов В. А., Синогина Е. С. Горение и взрывы. Опасность и анализ последствий. Учебное пособие. Томск: Изд-во ТГПУ, 2007. 124 с.
3. Демидов П. Г., Саушев В. С. Горение и свойства горючих веществ. Учебное пособие. М.: Высшая инженерная пожарно-техническая школа МВД СССР, 1975. 280 с.
4. Земенков Ю. Д. и др. Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов. Учебно-практическое пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2006. 928 с.
5. Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. Л.: Недра, 1990. 762 с.
6. Никольский Б. П. Справочник химика. Том 6. Сырье и продукты промышленности органических веществ. М.: Книга по Требованию, 2013. 915 с.
7. ГОСТ Р 57413-2017 Газ горючий природный. Государственные стандартные образцы на основе магистрального газа. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017.
8. Диденко В. Н., Фахразиев И. И., Мерзлякова К. С. Метод расчетного определения границ нестабильной детонации природного газа в газопоршневых установках // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 2. С. 202-210.
9. Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б., Конович М. Н., Корчунов Ю. Н., Рундыгин Ю. А., Шагало С. Л., Шестаков С. М. Основы практической теории горения. Учебное пособие для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
10. Розловский А. И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1972. 368 с.
11. Инструкция по безопасности труда при применении сжиженных газов пропан-бутан для газопламенных работ на предприятии, 2016. <http://dereksiz.org/instrukciya-po-bezopasnosti-truda-pri-primenenii-sjiennih-gaz.html> (дата обращения 11.05.2019).
12. Андросов А. С., Салеев Е. П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва». Учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. 86 с.
13. Семенов Н. Н. Цепные реакции / 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1986. 535 с.
14. Диденко В. Н., Варфоломеева О. И., Касимов Р. З. Воспламенение природного газа. Учебно-метод. пособие по выполнению курсовой работы по дисциплинам «Физико-химические основы горения топлива» и «Теория горения и взрыва» для направления 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника». Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. 24 с.

PHENOMENOLOGICAL METHOD OF DETERMINING THE AUTO-IGNITION TEMPERATURE OF HYDROCARBON GASES MIXTURES

Didenko V. N., Fakhriziev I. I., Martynov A. I.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

SUMMARY. A phenomenological calculation method has been developed for determining the auto-ignition temperature of hydrocarbon gases mixtures at various degrees of compression in the gas reciprocating units (GRU) cylinders. Heating the gas-air mixture to the self-ignition temperature during non-isothermal compression in the GRU's cylinder is considered as a possible cause of the fuel mixture detonation. Experimental determination of the auto-ignition temperature of associated petroleum gas (APG), which is unstable in composition, is laborious and non-operational. The phenomenological method is based on known (reference) values of the auto-ignition temperature of pure hydrocarbon gases at atmospheric pressure. The work uses the concept of upper and lower limits of auto-ignition temperature. The assumption is made of experimental values correlation of the various hydrocarbon gases auto-ignition temperature with their adiabatic calorimetric combustion temperature. Graphs of the upper and lower limits values of the auto-ignition temperature of pure hydrocarbon gases on the calorimetric adiabatic temperature of combustion at constant pressure are given. Equations that correspond to these graphical dependencies are obtained. For a series of APG, the upper and lower limits of the auto-ignition temperature that was previously unknown are calculated using these equations. To reduce the errors of the auto-ignition temperature gas mixtures calculated determination of the due to large auto-ignition temperature gradients by the adiabatic combustion temperature, it is proposed to use the correlation between upper and lower auto-ignition temperatures of pure hydrocarbon gases with the lowest

heat of combustion. For the experimental values of pure hydrocarbon gases and the calculated values of the APG series, combined (universal) graphs of the adiabatic calorimetric combustion temperature and values of upper and lower limits of the auto-ignition temperature on their lower heat of combustion, as well as the equations describing these graphs, were obtained. To obtain the dependence of auto-ignition temperature's lower and upper limits of associated petroleum gas on the pressure and degree of compression in the cylinder of the GRU the N.N. Semenov's formula is used. The results of the work are useful in determining the boundaries of hydrocarbon gas detonation in the GTU cylinders.

KEYWORDS: phenomenological method, auto ignition temperature, adiabatic combustion temperature, calorific value, associated petroleum gas.

REFERENCES

1. Monakhov V. T. *Metody issledovaniya pozharной opasnosti veshchestv* [Methods for studying the fire hazard of substances]. Uchebnik dlya stud. tekhn. vuzov, 2-e izd., pererab. Moscow: Khimiya Publ., 1979. 423 p.
2. Arkhipov V. A., Sinogina E. S. *Gorenie i vzryvy. Opasnost' i analiz posledstviy* [Burning and explosions. Danger and Impact Analysis]. Uchebnoe posobie. Tomsk: TGPU Publ., 2007. 124 p.
3. Demidov P. G., Saushev V. S. *Gorenie i svoystva goryuchikh veshchestv* [Combustion and combustible properties]. Uchebnoe posobie. Moscow: Vysshaya inzhenernaya požarno-tekhnicheskaya shkola MVD SSSR Publ., 1975. 280 p.
4. Zemenkov Yu. D. i dr. *Spravochnik inzhenera po ekspluatatsii neftegazoprovodov i produktoprovodov* [Reference engineer for the operation of oil and gas pipelines and product pipelines]. Uchebno-prakticheskoe posobie. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ., 2006. 928 p.
5. Staskevich N. L., Severinets G. N., Vigdorchik D. Ya. *Spravochnik po gazosnabzheniyu i ispol'zovaniyu gaza* [Handbook of gas supply and use of gas]. Leningrad: Nedra Publ., 1990. 762 p.
6. Nikol'skiy B. P. *Spravochnik khimika. Tom 6. Syr'e i produkty promyshlennosti organicheskikh veshchestv* [Chemist Handbook. Volume 6. Raw materials and products of the organic industry]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu Publ., 2013. 915 p.
7. *GOST R 57413-2017 Gaz goryuchiy prirodnyy. Gosudarstvennyye standartnye obraztsy na osnove magistral'nogo gaza. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 57413-2017 Natural combustible gas. State standard samples based on the main gas. Technical conditions]. Moscow: Standartinform Publ., 2017.
8. Didenko V. N., Fakhraziev I. I., Merzlyakova K. S. Metod raschetnogo opredeleniya granits nestabil'noy detonatsii prirodnogo gaza v gazoporshnevnykh ustanovkakh [Method of calculating definition of borders of unstable detonation of natural gas in gas-standing installations]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 2, pp. 202-210.
9. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., Konovich M. N., Korchunov Yu. N., Rundygina Yu. A., Shagalova S. L., Shestakov S. M. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of the practical theory of combustion]. Uchebnoe posobie dlya vuzov, 2-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p.
10. Rozlovskiy A. I. *Nauchnye osnovy tekhniki vzryvobezopasnosti pri rabote s goryuchimi gazami i parami* [Scientific bases of explosion safety techniques when working with flammable gases and vapors]. Moscow: Khimiya Publ., 1972. 368 p.
11. *Instruktsiya po bezopasnosti truda pri primenenii szhizhennykh gazov propan-butan dlya gazoplamennykh работ na predpriyatii* [Safety instructions for the use of propane-butane liquefied gas for gas-flame works], 2016. <http://dereksiz.org/instrukciya-po-bezopasnosti-truda-pri-primenenii-szhizhennykh-gazov.html> (accessed May 11, 2019).
12. Androssov A. S., Saleev E. P. *Primery i zadachi po kursu «Teoriya goreniya i vzryva»* [Examples and objectives of the course «Theory of Combustion and Explosion»]. Uchebnoe posobie. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2005. 86 p.
13. Semenov N. N. *Tsepnnye reaktsii* [Chain reactions]. 2-e izd., ispr. i dop. Moscow: Nauka Publ., 1986. 535 p.
14. Didenko V. N., Varfolomeeva O. I., Kasimov R. Z. *Vosplamnenie prirodnogo gaza* [Natural gas ignition]. Uchebno-metod. posobie po vypolneniyu kursovoy raboty po distsiplinam «Fiziko-khimicheskie osnovy goreniya topliva» i «Teoriya goreniya i vzryva» dlya napravleniya 140100 «Teplotekhnika». Izhevsk: IzhGTU Publ., 2013. 24 p.

Диденко Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашикова,
e-mail: rsg07-9624@udm.net

Фахразиев Ильшат Индусович, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашикова

Мартынов Александр Игоревич, магистрант ИжГТУ имени М.Т.Калашикова