

МЕТОДИКА ЗА РЕДУЦИРАНЕ НА СЪСТАВА НА ГАЗОВА СМЕС ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДОЛНАТА ЕКСПЛОЗИВНА ГРАНИЦА НА СМЕСТА

Борис Прешелков¹

A METHODOLOGY FOR REDUCING GAS MIXTURE COMPOSITION IN THE DETERMINATION OF THE MIXTURE LOWER FLAMMABILITY LIMIT

Boris Preshelkov

Abstract:

An engineering methodology has been developed and described for reducing the composition of multicomponent gas mixtures when calculating the lower flammability limit of the mixture. The Le Chatelier rule is used as the basis of the method. The methodology introduces intermediate quantities such as a reduction threshold, a significance criterion, a safety factor, and others. Components classified as insignificant are not excluded, but are added to the base component, which improves the accuracy of the methodology. The reduced lower flammability limit is conservatively corrected by a safety factor. The methodology is checked using example gas mixtures with known composition and published lower flammability limit values. The applicability limits of the methodology are also defined.

Keywords:

lower flammability limit, gas mixture, composition reduction, Le Chatelier rule, safety factor, conservative estimate

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Долната експлозивна граница (ДЕГ) на газовете е характеристиката, която е най-тясно свързана с тяхната пожарна и експлозивна опасност. Това е минималната концентрация (в обемни проценти - %) на газ във въздуха, при която газо-въздушната смес е способна да се запали и експлодира [11, 7]. Чрез тази характеристика, количеството отделен газ и устойчивостта на експлозивната атмосфера се определя експлозивната зона по АТЕХ [13] или категорията по пожарна опасност на помещение [12] в редица постсоциалистически държави, между които и Република България. Уникалното при Република България е, че е единствената държава – член на Европейския съюз, която наслагва изискванията по АТЕХ

¹ Борис Прешелков, гл асистент, д-р, катедра ССС, Архитектурен факултет, Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“, Варна 9007, к.к. Чайка, ул "Янко Славчев" 84, boris.preshelkov@vfu.bg; Boris Preshelkov, Ch. assistant, Phd, CBF Department, Faculty of Architecture, Varna Free University „Chernorizets Hrabar“, Yanko Slavchev 84, Chayka Resort, Varna, Bulgaria, 9007, boris.preshelkov@vfu.bg.

директивите и стандартите със съветската категоризация по пожарна опасност на помещенията. Всички други социалистически държави, влезли в Европейския съюз, са изоставили категоризацията по пожарна опасност на помещенията за сметка на експлозивните зони по АТЕХ. В този смисъл, ДЕГ на газовете има двойно по-голямо значение в България, отколкото в другите държави – членки на Европейския съюз. От правилното определяне на ДЕГ много често зависи дали ще се вложат значителни средства за ненужно обезопасяване на помещения. От друга страна, подценяването на ДЕГ може да доведе до предотвратима експлозия с разрушаващо въздействие на конструкциите [1, 4] или интензивен пожар с изключително висока температура при постъпващ в помещението газов поток, съпроводен със загуба на огнеустойчивост и дори взривно обрушване в стоманобетонни конструкции [5, 6].

За чистите газове са правени множество изследвания и ДЕГ е лесно откриваема характеристика. Когато става въпрос за газови смеси, откриването на ДЕГ на сместа може да е трудно [8, 9, 10]. В такъв случай се прибягва до теоретични методики, които са показали надеждността си. Един от често използваните методи е правилото на Le Chatelier (Льо Шателие) [7, 8, 9]:

$$LFL_{mix,LC} = \frac{100}{\sum \frac{y_i}{LFL_i}} \quad (1)$$

където y_i [об. %] е съдържанието на i -тия горим компонент в първоначалната газова смес, а LFL_i [об. %] е неговата ДЕГ.

В практиката често се срещат смеси, в които един компонент е доминиращ, а останалите горими компоненти присъстват в малки количества. Това е типично например за природен газ, синтетичен природен газ, технологични горими газове и някои отпадъчни газови потоци. При такива смеси възниква практическият въпрос дали всички горими компоненти трябва да участват в изчислението, или част от тях могат да бъдат игнорирани без съществено изменение на резултата.

Целта на настоящата разработка е да предложи инженерна методика за редуциране на състава на газови смеси, като едновременно се запази точността и консервативността на изчислението.

2. РЕДУКЦИОНЕН ПРАГ

Когато се използва правилото на Le Chatelier с редуциран състав на газова смес, неизбежно се допуска възможност за отклонение на резултата. Това контролирано отклонение представлява предварителна редукиционна грешка. За да бъде оптимална стойността на контролираната редукиционна грешка, тя следва да отговаря едновременно на две условия:

- да бъде достатъчно голяма, за да позволи реално редуциране на компонентите в сместа;
- да бъде достатъчно малка, за да не доведе до необходимост от голям корекционен коефициент, с който да се гарантира безопасността на изчислението (коефициент на безопасност).

За настоящата методика е приета максимално допустима стойност на контролираната редукиционна грешка:

$$S^{max} = 0,2 \quad (2)$$

Тази стойност е в рамките на методичната неопределеност от 30 %, характерна при използването на справочни данни или изчислителни методи за определяне на ДЕГ на конкретно реално вещество [3].

Редукционният праг за компонентите в сместа се определя на база максимално допустимата контролирана редукционна грешка:

$$k_{red} = \frac{s^{max}}{n} = \frac{0,2}{n}, \quad (3)$$

където n е броят на горимите компоненти в първоначалната газова смес.

При така зададената стойност на редукционен праг е възможно редуциране на достатъчен брой компоненти от сместа, за да има смисъл от редукцията. Едновременно с това крайният резултат може да бъде коригиран с коефициент, близък до 1, с което консервативно се избягва предварително зададената контролирана грешка в интерес на безопасността.

3. МЕТОДИКА ЗА РЕДУЦИРАНЕ НА СЪСТАВА НА ГАЗОВА СМЕС

3.1. Избор на базов компонент

За базов компонент $y_{b,0}$ [об. %] се избира горимият компонент с най-голямо процентно съдържание в сместа y_i^{max} [об. %]:

$$y_{b,0} = y_i^{max} \text{ [об. \%]}. \quad (4)$$

В случай, че базовият компонент е с най-малка ДЕГ от всички компоненти на газовата смес, при използването на настоящата методика само в много редки случаи за ДЕГ на газовата смес е възможно да се получи стойност, която да е различна от ДЕГ на базовия компонент. Това е така, защото с настоящата методика ДЕГ на газовата смес се отклонява към ДЕГ на базовия компонент и допълнително се намалява консервативно с цел безопасност.

Поради тази причина, когато най-големият (базов) компонент е с най-малка ДЕГ в газовата смес е препоръчително не да се използва методиката, а ДЕГ на газовата смес да се приеме консервативно равна на ДЕГ на най-големия компонент в сместа или, в случай че се изисква точност, да се изчисли по правилото на Le Chatelier с всички горими компоненти.

3.2. Определяне на процентното съдържание на компонентите в сместа

От състава на газовата смес (по ИЛБ [14] или друг източник) се определя процентното съдържание y_i [об. %] на всеки от компонентите (горим или негорим), за който има информация. Ако след определянето се получи общ сбор на процентите, по-малък от 100 %, неизвестният остатък до 100 % се приема като негорим компонент.

Когато процентното съдържание на един или повече компоненти е налично в състава на газовата смес като диапазон, за изчислителна стойност на компонента се приема средната стойност в неговия диапазон:

$$y_i = \frac{y_{i,min} + y_{i,max}}{2} \text{ [об. \%]}, \quad (5)$$

При изчисляване на средна стойност от диапазони, сборът от процентите на всички компоненти изключително рядко би се получил 100 %. В този случай са възможни два варианта:

а) сумата от процентите на всички компоненти е по-малка от 100 %. Тогава неизвестният остатък до 100 % се приема като негорим компонент.

б) сумата от процентите на всички компоненти е по-голяма от 100 %. Тогава съставът на сместа се нормализира към 100 %.

3.3. Изключване на негоримите компоненти

В правилото на Le Chatelier се включват само горимите компоненти на газова смес. Влиянието на негоримите компоненти е възможно да се отчете допълнително чрез корекционни коефициенти за инертни газове [3, 7]. В съответствие с този принцип, негоримите компоненти се изключват от състава на сместа и от по-нататъшно участие в методиката, като не се променя възможността влиянието им да бъде отчетено чрез корекционни коефициенти.

3.4. Критерий за значимост на небазовите компоненти

За всеки небазов горим компонент се определя безразмерен критерий на значимост:

$$C_i = \frac{y_i}{y_b} \left| \frac{LFL_b}{LFL_i} - 1 \right|, \quad (6)$$

където:

- y_i е съдържанието на i -тия небазов горим компонент, % об.;
- y_b е съдържанието на базовия горим компонент, % об.;
- LFL_i е ДЕГ на i -тия компонент, % об.;
- LFL_b е ДЕГ на базовия компонент, % об.

Компонентът се приема за значим, ако:

$$C_i > k_{red}. \quad (7)$$

Съответно, компонентът се приема за незначим, ако:

$$C_i \leq k_{red}. \quad (8)$$

Критерият отчита едновременно процентното участие на компонента и различието между неговата ДЕГ и ДЕГ на базовия компонент. Компонент с малко процентно съдържание може да остане значим, ако неговата ДЕГ се различава много от тази на базовия компонент. Обратно, компонент с немалко процентно съдържание в сместа и ДЕГ, близка до тази на базовия компонент, може да се окаже незначим.

3.5. Редуциране на компонентите

Всички незначими компоненти се редуцират, като процентното им съдържание $y_{i,red}$ [об. %] се добавя към процентното съдържание на базовия компонент $y_{b,red}$:

$$y_{b,red} = y_b + \sum y_{i,red} \text{ [об. \%]}, \quad (9)$$

където $y_{b,red}$ [об. %] е резултатното процентно съдържание на базовия компонент след редукцията.

3.6. Изчисляване на редуцирана ДЕГ на газовата смес

Редуцираната ДЕГ се определя по правилото на Le Chatelier с процентното съдържание на базовия компонент и процентните съдържания на значимите компоненти:

$$LFL_{red} = \frac{100}{\frac{y_{b,red}}{LFL_b} + \sum_j \frac{y_j}{LFL_j}} \text{ [об. \%]}, \quad (10)$$

където j е поредният индекс на значимите небазови компоненти.

3.7. Коефициент на безопасност

При изчисляването на ДЕГ само със значимите компоненти се появява неопределеност. При голям брой редуцирани компоненти тази неопределеност клони към максималната стойност на контролираната редукиционна грешка. За да бъде компенсирана неопределеността, в интерес на безопасността се въвежда коефициент на безопасност:

$$K_s = 1 + S^{max} \frac{m}{n} = 1 + 0,2 \frac{m}{n}, \quad (11)$$

където:

- m е броят на редуцираните (незначими) компоненти;
- n е броят на горимите компоненти в първоначалната смес.

3.8. Изчисляване на консервативна ДЕГ на газовата смес

Чрез коефициента на безопасност консервативно се намалява изчислената редуцирана ДЕГ LFL_{safe} [об. %], така че неопределеността да не може да повлияе негативно върху безопасността:

$$LFL_{safe} = \frac{LFL_{red}}{K_s} \text{ [об. \%]}. \quad (12)$$

Коригираният с коефициента на безопасност резултат за ДЕГ на газова смес по тази методика се явява математически по-малък или най-много равен на ДЕГ, определена по правилото на Le Chatelier с всички компоненти на газовата смес.

3.9. Окончателно определяне на ДЕГ на газовата смес

В случай, че получената консервативно стойност на LFL_{safe} [об. %] е по-малка от най-малката ДЕГ на значим компонент, то коефициентът на безопасност е коригирал резултата под долната гранична стойност на ДЕГ. В този случай окончателно се определя:

$$LFL_{mix} = LFL^{min} \text{ [об. \%]}, \quad (13)$$

където LFL^{min} [об. %] е най-малката ДЕГ на значим компонент в сместа.

В по-честия случай, когато получената консервативно стойност на LFL_{safe} [об. %] е по-висока от най-малката ДЕГ на значим компонент, тогава:

$$LFL_{mix} = LFL_{safe} \text{ [об. \%]}. \quad (14)$$

3.10. Корекции в зависимост от конкретните условия

ДЕГ на газовете зависи от температурата на газо-въздушната смес T [K]. Когато сместа се използва при условия, различни от нормалната температура, полученият по методиката резултат LFL_{mix} е необходимо да се коригира за съответната температура. по общата формула за коригиране на ДЕГ [11]:

$$LFL_{mix}^T = LFL_{mix} \left| 1 - \frac{T-298}{1250} \right|, \quad (15)$$

където LFL_{mix}^T е коригираната ДЕГ на сместа при температура T , % об.

Изменението на налягането оказва силно влияние върху горната експлозивна граница, но влиянието му върху ДЕГ е незначително и може да се пренебрегне [7].

4. ПРИМЕРИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЕ

За проверка приложимостта на методиката, с нея е изчислена ДЕГ на няколко примерни газови смеси, за които е наличен състав на газовата смес и стойност на ДЕГ на сместа. Входните данни и резултатите от прилагането на методиката са показани в табл. 1.

Таблица 1. Приложение на методиката при газови смеси

№	Газова смес	Състав [об. %]	ДЕГ на горимите комп. [об. %] [2, 3, 7, 9, 14]	ДЕГ на сместа [об. %]	LFL_{full} [об. %] Относ. отклонение [%]	Редуцирани компоненти / Приложено правило	LFL_{mix} [об. %] Относ. отклонение [%]
1	Природен газ [14]	CH ₄ - 93,05; C ₂ H ₆ - 2,73; C ₃ H ₈ - 1,04; C ₄ H ₁₀ - 0,37; C ₅ H ₁₂ - 0,09; N ₂ - 1,97; CO ₂ - 0,75	CH ₄ - 5,0; C ₂ H ₆ - 3,0; C ₃ H ₈ - 2,1; C ₄ H ₁₀ - 1,8; C ₅ H ₁₂ - 1,4	4,5	4,93 +9,6	C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀ и C ₅ H ₁₂	4,43 -1,6
2	Природен газ [9]	CH ₄ - 96,16; C ₂ H ₆ - 1,096; C ₃ ⁺ - 0,189; CO ₂ - 2,54	CH ₄ - 5,0; C ₂ H ₆ - 3,0; C ₃ ⁺ (пр. C ₃ H ₈) - 2,1	5,0	5,08 +1,6	C ₂ H ₆ и C ₃ ⁺	4,53 -9,4
3	Grand Forks / DOE fuel gas [8]	CO - 57,6; H ₂ - 28,8; CH ₄ - 4,8; CO ₂ - 4,8; N ₂ - 4,0	CO - 12,5; H ₂ - 4,0; CH ₄ - 5,0	около 9,0	7,83 -13,0	Няма редукция	7,83 -13,0
4	C ₃ H ₆ -H ₂ -CO [2, 3]	C ₃ H ₆ - 90; H ₂ - 9; CO - 1	C ₃ H ₆ - 2,0; H ₂ - 4,0; CO - 12,5	около 2,2	2,11 -4,1	Приема се консервативно ДЕГ на базовия компонент	2,0 -9,1
5	CH ₄ -C ₂ H ₄ -C ₃ H ₈ [10]	CH ₄ - 95,00; C ₂ H ₄ - 1,67; C ₃ H ₈ - 3,33	CH ₄ - 5,0; C ₂ H ₄ - 2,7; C ₃ H ₈ - 2,1	около 4,7	4,72 +0,4	C ₂ H ₄ и C ₃ H ₈	4,41 -6,2

5. ОБСЪЖДАНЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Примерите в табл. 1 показват следното:

Пример 1. Резултатът е консервативен по отношение на безопасността спрямо справочната ДЕГ, докато изчислената с всички компоненти LFL_{full} [об. %] по правилото на Le Chatelier е с по-висока стойност от справочната.

Пример 2. Резултатът е консервативен по отношение на безопасността спрямо експерименталната ДЕГ, докато изчислената с всички компоненти LFL_{full} [об. %] по правилото на Le Chatelier е с много близка стойност до експерименталната.

Пример 3. В примера CH_4 не се редуцира и остава значим компонент, въпреки малкия си процентен състав спрямо базовия компонент CO . Резултатите и по методиката, и с всички компоненти по правилото на Le Chatelier са със значително по-малки стойности (-13 % отклонение) от публикуваната ДЕГ на сместа.

Пример 4. Резултатът не е получен по методиката, тъй като базовият компонент е с най-ниска ДЕГ и за ДЕГ на сместа консервативно е приета ДЕГ на базовия компонент. Полученият резултат е по-малък от известната ДЕГ на сместа. Изчислената с всички компоненти LFL_{full} [об. %] по правилото на Le Chatelier също се получава по-малка от известната ДЕГ, но отклонението е по-малко.

Пример 5. Резултатът е консервативен по отношение на безопасността спрямо публикуваната ДЕГ на газовата смес, докато изчислената с всички компоненти LFL_{full} [об. %] по правилото на Le Chatelier е незначително по-висока от известната ДЕГ.

Математическите граници при изчисленията по методиката и примерите от табл. 1 показват, че полученият по методиката резултат е консервативен в интерес на безопасността, но с по-малка точност от приложението на правилото на Le Chatelier към всички компоненти на сместа.

6. ОГРАНИЧЕНИЯ НА МЕТОДИКАТА

Методиката е приложима при изчислително определяне на ДЕГ, като е най-полезна при многокомпонентни газове, където се получава значително по-ясен изчислителен резултат. С коефициента на безопасност резултатът се коригира в интерес на безопасността.

Методиката не е приложима при:

- смеси с наличие на кислород в тях;
- нагрети до значително по-висока от атмосферната температура смеси, ако ДЕГ на компонентите на газовата смес не са приведени към тези условия;
- газови смеси, при които базовият компонент е с най-малка ДЕГ от всички компоненти. Консервативното правило в този случай е за ДЕГ на сместа да се приеме ДЕГ на базовия компонент.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработването на методиката за редуциране на състава на газови смеси при определяне ДЕГ на сместа са дефинирани междинни величини, между които:

- редукиционен праг;
- критерий за значимост на компонентите;
- коефициент на безопасност.

Методиката въвежда правило за прибавяне на незначимите компоненти към базовия компонент в сместа. Така се намалява грешката спрямо варианта незначимите компоненти да се изключват напълно от състава на газовата смес.

Чрез използването на предложените междинни величини се получава резултат, по-консервативен от правилото на Le Chatelier по отношение безопасността, който е напълно приемлив за инженерна оценка.

Методиката е особено полезна при смеси с ясно изразен базов компонент и няколко горими компоненти с малко съдържание.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васева, Е., Сотиров, П., Игнатиев, Н., Михалева, Д., Павлов, И., Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-3 - Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия, трета част: Оценка и усилване на сгради. КИИП, София, 2012, ISBN: 978-954-92275-9-8.
- [2] Земский, Г. Огнеопасные свойства неорганических и органических материалов, справочник. Москва, ВНИИПО, 2016.
- [3] Корольченко, А. Я., Корольченко, Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения, справочник в 2 ч., 2-е изд. Москва, Пожнаука, 2004.
- [4] Сотиров, П., Игнатиев, Н., Михалева, Д., Павлов, И., Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-1 - Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия: Нови сгради. КИИП, София, 2012, ISBN: 978-954-92275-5-0.
- [5] Чакър, А. Оценка на пожарната опасност при развитие на взривно обрушване в стоманобетонни конструкции. E-Journal VFU, бр. 25, 2026 г., DOI: 10.53606/evfu.25.888-899.
- [6] Чакър, А. Приложение на пасивната противопожарна защита при проектирането на сгради. X Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2021, 29 май 2021 г., Варна, стр. 469-473, ISSN 2535-0781.
- [7] Crawl, D. A., Louvar, J. F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, 2nd ed. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2002. ISBN 0-13-018176-5.
- [8] Burgess D. S., Furno A. L., Kuchta J. M., Mura K. E. Flammability of Mixed Gases, Report of Investigations 8709. Washington, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1982.
- [9] Liao S. Y., Jiang D. M., Cheng Q., Gao J., Hu Y., Huang Z. H., Zeng K. Experimental study of flammability limits of natural gas-air mixture. Journal of Hazardous Materials, Vol. 119, 2005, pp. 81–84. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2004.09.031.
- [10] Qi C., He M., Ning Y., Chen S., Yan X., Wang Y., Yu X., Yu J. Experimental measurement and theoretical prediction for lower flammability limits of ternary hydrocarbon mixtures. Process Safety Progress, Vol. 41, No 3, 2022, pp. 581–590, DOI: 10.1002/prs.12398.
- [11] ГОСТ 12.1.044 - 2018. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
- [12] Наредба № Из-1971 за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар. Обн. ДВ, бр. 96 от 4.12.2009 г., доп. ДВ, бр. 46 от 6.6.2025 г.
- [13] Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres. Official Journal of the European Communities, L 23, 28.1.2000, pp. 57–64.
- [14] Philadelphia Gas Works. Natural Gas Safety Data Sheet. Philadelphia Gas Works, revised 06.01.2015.