

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ И ПАРОВ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Э. Д. Замышевский, Ю. Н. Шебеко, А. В. Трунёв,  
В. Ю. Навценя, А. А. Зайцев

ВНИИ противопожарной обороны, 143900 Балашиха

Проведены экспериментальные исследования условий гашения диффузионного пламени газов и паров в различных средах. Определены предельные скорости срыва диффузионного факела при истечении в воздух нагретых смесей  $H_2 - N_2$  и  $H_2 - H_2O$ . Измерены минимальные огнетушащие концентрации при диффузионном горении газов ( $CH_4$ ,  $C_3H_8$ ) и жидкостей (бензин А-76).

Как известно [1], существование пределов диффузионного горения газов и паров обусловлено конечностью скорости химической реакции в пламени. При увеличении скорости подачи окислителя и (или) горючего в зону реакции или при разбавлении реагирующих веществ негорючим газом наступает момент, когда скорость химической реакции оказывается недостаточной для того, чтобы переработать поступающее в пламя вещество. Зона горения при этом охлаждается, что приводит к дальнейшему уменьшению скорости реакции и в конечном итоге — к гашению пламени. В первом случае принято говорить о предельных условиях срыва, во втором — об условиях тушения диффузионного факела, хотя и те и другие условия характеризуют одно и то же явление — гашение пламени.

Работы, посвященные изучению условий гашения диффузионного пламени, можно условно разделить на две группы. В первой из них рассматривается горение смеси горючего газа или пара с негорючим при истечении в воздух (см., например, [2–6]), а во второй — горение при истечении горючего газа или пара в разбавленную негорючим газом атмосферу (см., например, [7–11]). Установлены общие закономерности срыва оторванного и присоплового факелов смеси горючего и негорючего газов при горении в воздухе, которые, однако, проверены в основном для случая истечения ненагретой газовой смеси [2–6]. Разработаны методы определения минимальных огнетушащих концентраций газовых составов (минимальное содержание добавочного негорючего газа в его смеси с воздухом, при котором про-

исходит гашение диффузионного факела), которые нашли свое отражение в стандарте [12]. Однако анализ указанных методов не позволяет сделать вывод о том, что определяемые с их помощью огнетушащие концентрации действительно являются минимальными, поскольку в недостаточной мере используется взаимосвязь между временем гашения факела и концентрацией негорючего газа в атмосфере.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию условий гашения диффузионного пламени газов и паров в различных средах. В ней изучаются предельные условия срыва диффузионного факела при истечении нагретой парогазовой смеси в ненагретый воздух и уточняется методика определения минимальных огнетушащих концентраций для негорючих газов и паров.

Опыты проводили на экспериментальной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1 (см. также [13]).

Установка включает в себя следующие основные элементы:

- термостат для поддержания заданной температуры парогазовой смеси;
- термостатируемый сменный сопловой насадок для изучения диффузионного горения истекающей струи;
- реакционный сосуд в виде открытой сверху вертикальной стеклянной трубы с внутренним диаметром 105 и высотой 300 мм;
- газовая горелка с внутренним и наружным диаметрами 10 и 12 мм соответственно или кювета для жидкости диаметром 20 и глубиной 80 мм, расположенные на расстоянии 220 мм от верхнего края трубы;

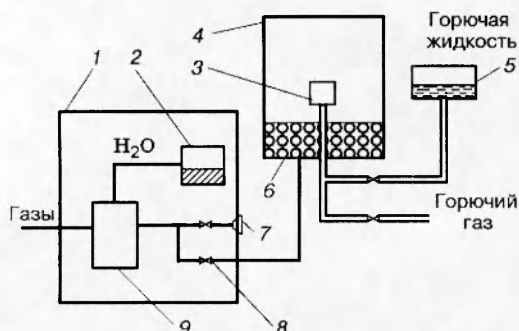


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения условий гашения диффузионного пламени:

1 — термостат; 2 — парогенератор; 3 — горелка; 4 — реакционный сосуд; 5 — ресивер с горючей жидкостью; 6 — засыпка из металлических шариков; 7 — сопловой насадок; 8 — вентили; 9 — смеситель

— засыпка из металлических шариков диаметром 8 мм для создания равномерного потока огнетушащей среды внутри реакционного сосуда;

— ресивер с горючей жидкостью для поддержания ее постоянного уровня в процессе горения.

Парогазовую смесь, используемую для определения скорости срыва пламени или минимальной огнетушащей концентрации, pripravивали в смесителе высокого давления объемом 5 дм<sup>3</sup> с последующей подачей на сопло или в реакционный сосуд. Для получения водяного пара применяли парогенератор, представляющий собой сосуд объемом 25 дм<sup>3</sup>, снабженный нагревателем. Давление парогазовой среды в смесителе, парогенераторе, газовых магистралях контролировали образцовыми манометрами (класс точности 0,4), снабженными разделителями, предотвращающими конденсацию водяного пара в трубках манометров.

Для проведения опытов с диффузионным горением нагретых парогазовых смесей все элементы системы регулирования подачи компонентов располагали в термостате. Сменный сопловой насадок диаметром 1,2; 2,1 и 3,2 мм дополнительно обогревался. Температуру парогазовых сред в смесителе, парогенераторе, а также температуру соплового насадка и подводных трубопроводов внутри термостата контролировали термопарами.

Опыты по определению предельных расходов срыва диффузионного пламени при ис-

течении парогазовой смеси через сопло в воздух проводили следующим образом. В смесителе, предварительно вакуумированном до остаточного давления не выше 0,5 кПа, создавали по парциальным давлениям парогазовую смесь требуемого состава при давлении 3,0 МПа. В экспериментах с нагретыми составами перед смешением все узлы установки (термостат, парогенератор, сопловой насадок) нагревали до требуемой температуры. Истечение приготовленной смеси в воздух происходило с достаточно малой скоростью (избыточное давление перед соплом не выше 20 кПа). Исследуемый состав зажигали с помощью открытого пламени. Скорость истечения смеси плавно увеличивали путем увеличения давления перед соплом до тех пор, пока пламя не гасло. Гашение пламени регистрировали визуально и фиксировали давление перед соплом, при котором происходило исчезновение пламени. Затем по известным формулам газовой динамики [14] рассчитывали предельную скорость истечения. Каждый опыт повторяли не менее трех раз. Во всех опытах (за исключением особо оговоренных случаев) ось соплового насадка была горизонтальной.

Эксперименты по определению минимальных огнетушащих концентраций проводили следующим образом. В описанном выше смесителе после его вакуумирования до остаточного давления не более 0,5 кПа по парциальным давлениям создавали исследуемую огнетушащую смесь воздуха с негорючим газом. На газовой горелке или в кювете с жидкостью зажигали диффузионное пламя. Устанавливали заданный расход огнетушащей смеси, первоначально сбрасывая ее в атмосферу, а затем переключали поток огнетушащей смеси в реакционный сосуд. Начиная с этого момента фиксировали промежуток времени (до 5 мин), прошедший до тушения пламени, которое регистрировали визуально. Опыт повторяли не менее пяти раз, после этого изменяли концентрацию негорючего газа в огнетушащей среде и строили зависимость времени тушения от содержания негорючего газа. Относительная погрешность измеряемых величин не превышала 10%.

На рис. 2 представлены результаты экспериментального определения предельной скорости срыва  $v_c$  диффузионного факела от температуры истекающей смеси  $H_2 + N_2$  для сопел различного диаметра. Видно, что с увеличением температуры  $T$  значение  $v_c$  возрастает, причем зависимость  $v_c(T)$  близка к линей-

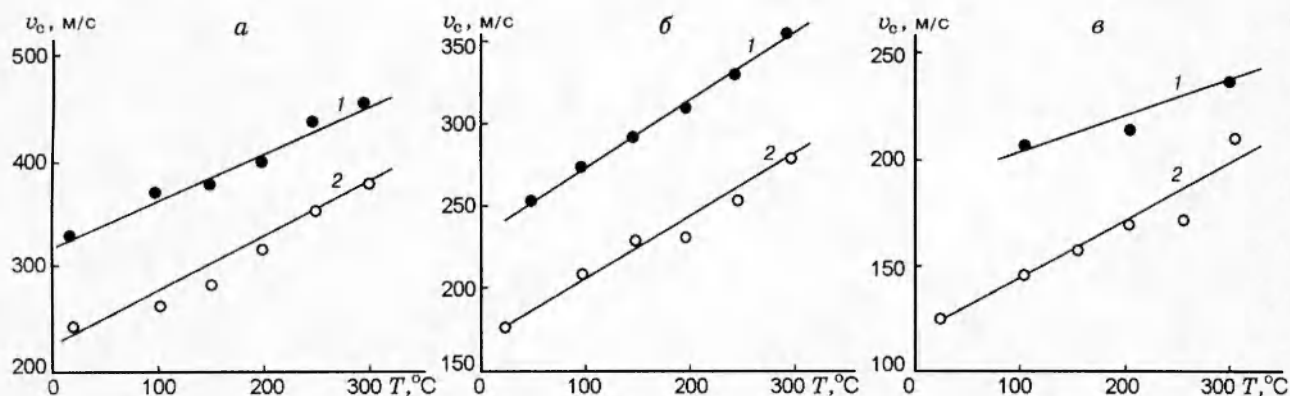


Рис. 2. Зависимость предельной скорости срыва диффузионного пламени смеси  $H_2 + N_2$  в воздухе от температуры при объемной концентрации водорода 80 (а), 60 (б), 40 % (в) для сопел диаметром  $d = 1,2$  (1) и 2,1 мм (2)

ной. Физическая природа увеличения скорости срыва от температуры состоит в росте скорости химической реакции во фронте пламени, в результате чего в пламени может прореагировать в единицу времени бо́льшая масса поступающего туда вещества [1]. Аналогичным образом предельная скорость срыва пламени уменьшается с ростом концентрации разбавителя в истекающей парогазовой смеси, так как температура пламени и скорость реакции при этом падают.

Следует отметить, что, вообще говоря, скорость химической реакции зависит не только от температуры, но и от концентрации реагентов. Однако влияние температуры, входящей в показатель экспоненты (если пользоваться, например, аррениусовской зависимостью для скорости брутто-реакции), существенно сильнее влияния концентрации реагирующих компонентов, которые входят в выражение для скорости химической реакции как множители. Поэтому в данном случае более правильно говорить о преимущественно тепловой природе изменения скорости срыва в зависимости от температуры и концентрации разбавителя.

Данные по предельным скоростям срыва пламени для случая истечения нагретой смеси водорода с водяным паром в воздух при объемной концентрации  $c_{H_2} = 60\%$  приведены в таблице.

$T, ^\circ C$	$d, \text{мм}$	$v_c, \text{м/с}$	$T, ^\circ C$	$d, \text{мм}$	$v_c, \text{м/с}$
200	1,2	260	250	1,2	290
	2,1	210		2,1	250
	3,2	120		3,2	230

Видно, что, как и в случае смеси  $H_2 + N_2$ ,

предельная скорость срыва увеличивается с температурой. Наиболее быстрый рост происходит для сопла диаметром 3,2 мм. Причина этого неясна.

Сравнивая представленные выше данные с рис. 2,б, можно сделать вывод, что водяной пар является более эффективным разбавителем, чем азот, что обусловлено его более высокой молярной теплоемкостью, хотя различия относительно невелики.

Путем обработки экспериментальных данных получены следующие эмпирические корреляции для предельной скорости срыва диффузионного факела:

для азота —

$$\frac{v_c}{d} = \left(\frac{v_c}{d}\right)_0 [1 + k_t(T - T_0)](1 - \delta c_{N_2}), \quad (1)$$

для водяного пара (без учета зависимости от его концентрации в истекающей смеси) для сопел диаметром 1,2 и 2,1 мм —

$$\frac{v_c}{d} = \left(\frac{v_c}{d}\right)_1 [1 + k_t(T - T_1)]. \quad (2)$$

Здесь  $(v_c/d)_0$  — отношение скорости срыва диффузионного факела водорода в воздухе к диаметру сопла при температуре истекающего газа  $T_0 = 20^\circ C$ ;  $(v_c/d)_1$  — отношение скорости срыва диффузионного факела заданной смеси водорода с водяным паром к диаметру сопла при температуре истекающей смеси  $T_1 = 50^\circ C$ ;  $k_t$  — температурный коэффициент, в пределах ошибки эксперимента одинаковый для азота и водяного пара;  $c_{N_2}$  — концентрация азота в смеси  $H_2 + N_2$ ;  $\delta$  — коэффициент эффективности разбавителя.

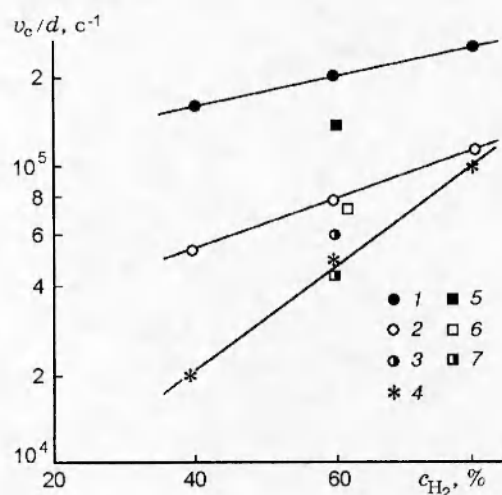


Рис. 3. Зависимость отношения предельной скорости срыва пламени к диаметру горелки от концентрации водорода в смеси  $H_2 + N_2$  для горизонтального (1–3) и вертикального (5–7) направлений истечения смеси:

$d = 1,2$  (1, 5);  $2,1$  (2, 6) и  $3,2$  мм (3, 7); 4 — данные работы [4]

Найдено, что величины  $k_t$  и  $\delta$  практически не зависят от диаметра сопла ( $d = 1,2$  и  $2,1$  мм) и составляют  $1,7 \cdot 10^{-3}$  К и  $0,87$  соответственно.

Соотношение (1) применимо при температурах истекающей смеси  $T = 20 \div 300$  °С,  $d = 1,2 \div 2,1$  мм и  $c_{N_2} = 40 \div 80$  %; соотношение (2) — при  $T = 200 \div 250$  °С,  $d = 1,2 \div 2,1$  мм и объемной доле водяного пара в смеси с водородом 40 %.

Интересно отметить, что в отличие от данных [4–6] в настоящих опытах чем меньше диаметр горелки, тем более устойчиво диффузионное пламя (т. е. тем выше предельная скорость срыва). Данный вывод иллюстрирует рис. 3, где приведены зависимости эффективного градиента скорости срыва пламени  $v_c/d$  от концентрации водорода в азотно-водородной смеси. В наших опытах диаметр сопла меньше, чем в упомянутых выше публикациях. В этом случае согласно [3] наблюдаются различные режимы срыва факела: для малых значений  $d$  наиболее типичны так называемые присопловые факела, стабилизированные у наружной кромки сопла, а для больших — оторванные (висящие) факела, стабилизированные на существенном расстоянии от сопла. В проведенных экспериментах наблюдались как раз присопловые факела при всех расходах горючей смеси вплоть до ее срыва, а в эксперимен-

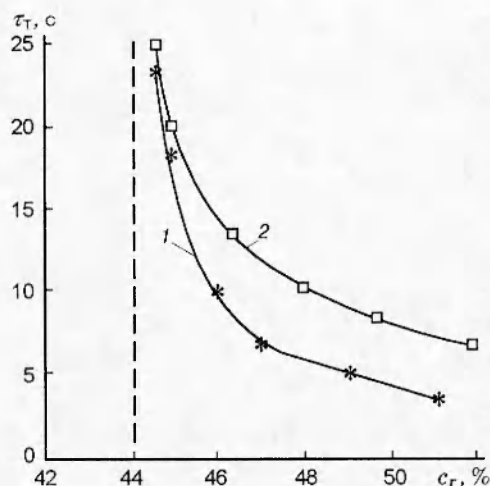


Рис. 4. Типичные зависимости времени тушения диффузионного пламени метана от объемной концентрации огнетушащего газа (азота) для расхода огнетушащей среды  $Q = 9,5$  (1) и 6 л/мин (2)

тах [4–6] — оторванные. Условия стабилизации присопловых и оторванных факелов различны, чем, вероятно, и обусловлено различие наших данных и результатов [4–6].

Согласно [3] эффективный градиент скорости срыва присоплового факела практически не зависит от диаметра сопла, что противоречит данным настоящей работы. Это связано, вероятно, с тем, что в нашей работе изучены факела, стабилизированные на соплах меньших диаметров, для которых теория [3], по видимому, не вполне применима. Об этом же говорят и экспериментальные данные [2], также полученные на горелках малого диаметра. В работе [2] в определенных условиях пламя стабилизировалось на горелках большего диаметра при меньших скоростях, что качественно согласуется с приведенными здесь данными.

Часть опытов была проведена при истечении смеси  $H_2 + N_2$  в вертикальном направлении (результаты представлены на рис. 3). Эффективные градиенты скорости срыва пламени оказались близки к соответствующим значениям при горизонтальном истечении, хотя и несколько ниже их, что свидетельствует о небольшом влиянии гравитационных сил на предельные условия срыва диффузионного факела.

На рис. 4 приведены (типичные) зависимости времени тушения диффузионного пламени метана от концентрации негорючего газа (азота) в огнетушащей среде для различных ее расходов, которые качественно подобны получен-

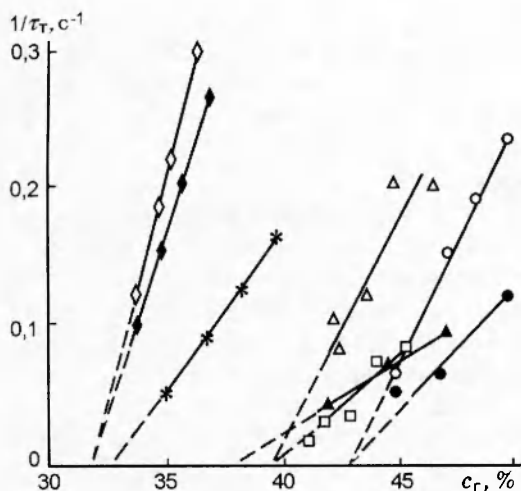


Рис. 5. Зависимость параметра  $1/\tau_T$  от концентрации огнетушащего газа для различных расходов огнетушащей среды и видов горючего и разбавителя:

○ — горючее  $\text{CH}_4$ , разбавитель  $\text{N}_2$ ,  $Q_r = 9,5$  л/мин;  
 ● —  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ , 6,0; □ —  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{N}_2$ , 9,5; ▲ — бензин А-76,  $\text{N}_2$ , 9,5; △ — бензин А-76,  $\text{N}_2$ , 7,0; \* — бензин А-76,  $\text{He}$ , 9,5; ○ — бензин А-76, NAFS, 9,5; ◆ — бензин А-76, NAFS, 7,0

ним ранее в экспериментах [9–11]. Кривые, отвечающие различным расходам огнетушащей среды, имеют общую вертикальную асимптоту, положение которой определяет минимальную огнетушащую концентрацию. Выявлено, что как положение самих кривых, так и положение их общей асимптоты практически не зависит от расхода горючего газа в диапазоне  $Q = 0,01 \div 0,05$  л/мин (линейная скорость истечения от 0,0025 до 0,0125 м/с).

На рис. 5 представлены полученные в настоящей работе зависимости времени тушения от концентрации негорючего газа в координатах  $1/\tau_T = f(c_T)$  для нескольких огнетушащих веществ (азот, гелий и состав NAFS). Видно, что наиболее эффективным из изученных огнетушащих веществ является состав NAFS, обладающий, по-видимому, ингибирующими свойствами. На первый взгляд, несколько необычна низкая огнетушащая концентрация гелия по сравнению с азотом, имеющим существенно более высокую молярную теплоемкость. Это обусловлено, вероятно, высоким коэффициентом теплопроводности гелия, в результате чего кондуктивные теплотери из фронта пламени в окружающее пространство оказываются существенно более высокими по

сравнению со случаем тушения азотом. Наблюдаемый эффект качественно согласуется с данными работы [8], в которой обнаружено, что огнетушащие эффективности азота и гелия не коррелируют с их молярными теплоемкостями.

Углы наклона прямых на рис. 5 относительно слабо зависят от вида горючего и огнетушащего вещества (за исключением, быть может, состава NAFS) и определяются в основном скоростью подачи огнетушащей среды в реакционный сосуд. Это свидетельствует о том, что время тушения в основном зависит от длительности достижения огнетушащей концентрации разбавителя в реакционном сосуде, после чего тушение происходит весьма быстро.

Представленные на рис. 5 зависимости практически линейны. Кроме того, прямые, отвечающие различным расходам огнетушащей среды при одних и тех же горючих веществах и негорючих газах, пересекаются с осью абсцисс практически в одной точке. Данные эмпирические закономерности интересны с точки зрения разработки новых методов определения минимальных огнетушащих концентраций, более совершенных, нежели описанный в стандарте [12].

Таким образом, в настоящей работе выполнены экспериментальные исследования условий гашения диффузионного пламени газов и паров в различных средах. Определены предельные скорости срыва диффузионного факела при истечении смесей  $\text{H}_2 + \text{N}_2$  и  $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ , нагретых до температуры  $20 \div 300$  °С, в холодный воздух из сопел диаметром 1,2; 2,1 и 3,2 мм. Измерены минимальные огнетушащие концентрации для диффузионного горения газов и жидкостей. Найдено, что с повышением температуры истекающей смеси водород — инерт предельная скорость срыва диффузионного факела существенно возрастает. Получена эмпирическая корреляция, описывающая изменение величины  $v_c/d$  от температуры и концентрации азота. Обнаружена аномальная зависимость предельной скорости срыва присоплового диффузионного факела от диаметра сопла при малых значениях  $d$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
2. Vranos A., Taback E. D., Shipman C. W. An experimental study of the stability of hydrogen-air

- diffusion flames // *Combust. Flame*. 1968. V. 12, N 3. P. 253-260.
3. **Голиневич Г. Е., Федотов А. П., Болодьян И. А., Карпов В. Л.** Стабилизация и тушение турбулентного диффузионного факела // Средства и способы пожаротушения. М.: ВНИИПО, 1988. С. 98-105.
  4. **Голиневич Г. Е., Карпов В. Л., Федотов А. П. и др.** Естественная стабилизация и срыв оторванного турбулентного диффузионного газового факела // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, N 5. С. 76-81.
  5. **Kalghatgi G. T.** Blow-out stability of gaseous jet diffusion flames. Pt I. In still air // *Combust. Sci. Technol.* 1981. V. 26, N 5/6. P. 233-239.
  6. **Kalghatgi G. T.** Blow-out stability of gaseous jet diffusion flames. Pt II. Effect of cross wind // *Ibid.* P. 241-244.
  7. **Balakrishnan G., Trees D., Williams F. A.** An experimental investigation of strain-induced extinction of diluted hydrogen-air counterflow diffusion flames // *Combust. Flame*. 1994. V. 98, N 1/2. P. 123-126.
  8. **Ishizuka S., Tsuji H.** An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar diffusion flames // 18th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1981. P. 695-703.
  9. **Николаев В. М., Крюков В. Н.** Модель тушения материалов газовыми инертными составами // Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах. М.: ВНИИПО, 1979. Вып. 3. С. 74-90.
  10. **Еремин В. И., Николаев В. М., Михайлов В. Г.** Исследование процесса диффузионного пламени в спутном потоке // Вопросы горения и тушения материалов в обогащенных кислородом средах. М.: ВНИИПО, 1981. С. 42-48.
  11. **Николаев В. М., Голиневич Г. Е.** О задержке тушения диффузионного пламени // Там же. С. 48-54.
  12. **NFPA 2001.** Standard on clean agent fire extinguishing systems. NFPA, 1992.
  13. **Ермилин И. Ф., Каплин А. Ю., Кулаков И. Н. и др.** Установка для исследований самовоспламенения и условий возникновения диффузионного горения парогазовых сред // Современные методы определения пожаровзрывобезопасности веществ и материалов. М.: ВНИИПО, 1991. С. 30-36.
  14. **Техническая термодинамика** / Под ред. В. И. Крутова. 20-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1981.

*Поступила в редакцию 27/VI 1995 г.,  
в окончательном варианте — 2/X 1996 г.*