

УДК 699.816.3

СНИЖЕНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ОГНЕТУШАЩЕГО АЭРОЗОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ ВСТАВКИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЖАРОТУШАЩЕЙ СМЕСИ

Максимов П.В.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: Maximov_Pavel_01@mail.ru

Исследованы способы снижения температуры огнетушащей смеси в генераторах огнетушащего аэрозоля. Определены условия и представлены исходные данные для расчета устройства по типу кольцевого сопла Лаваля. Описана методика расчета гидродинамических параметров газодинамического устройства типа кольцевого сопла Лаваля с цилиндрическим центральным телом и представлена расчетная схема газодинамического охладителя. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие снижение температуры огнетушащей смеси на выходе из генератора.

Studied ways to reduce the temperature of the mixture in extinguishing the fire extinguishing aerosol generators. The conditions and shows the initial data for the calculation of the device type ring Laval nozzle. A technique for calculating the hydrodynamic parameters of the gas-dynamic device type ring Laval nozzle of the cylindrical central body and presented a design scheme of gas-dynamic cooling. The results of experimental studies confirming the reduction in the temperature of extinguishing mixture at the outlet of the generator.

(Поступила в редакцию 8 июня 2015 г.)

Введение. Разнообразие горючих материалов, условий возникновения и распространения пожаров определяют методы и средства пожаротушения. Из известных способов тушения пожаров в закрытых помещениях наиболее эффективным считается объемный, заключающийся в получении аэрозольной огнетушащей среды [1, 2]. Одним из основных недостатков этих средств тушения является высокая температура сгорания твердотопливных аэрозолеобразующих огнетушащих составов (АОС) [3, 4].

В известных устройствах получить аэрозоль температурой до 200 °С удастся ценой значительного усложнения конструкции газогенераторов путем применения специальных охладительных устройств различного типа:

- конструкционных (проволочные сетки, несколько слоев фильтрующего материала, наборы из отражательных пластин и слоев древесного угля и др.) [7-11].
- химических (поглотители тепла в виде карбонатов цинка, кальция, магния, натрия, оксалатов натрия и др.) [2, 5].

Таким образом, минимизирование недостатка генераторов аэрозоля осуществляется в двух направлениях: разработкой АОС с пониженной температурой сгорания [5], и совершенствованием конструкций генераторов аэрозоля [6]. Согласно имеющим литературным данным минимальное значение температуры сгорания аэрозолеобразующего заряда в средствах тушения составляет 150 °С [2], что не обеспечивает пожаробезопасности устройств пожаротушения.

Можно выделить три наиболее часто встречающихся способа понижения температуры: 1 – организация контакта огнетушащей смеси с сублимирующим материалом (снижает температуру до 530 °С); 2 – применение эжекционной насадки (уменьшает температуру до 230-430 °С); 3 – использование инертных теплообменников [4] (позволяет получить температуру менее 130 °С, однако конструкции газогенераторов имеют большие габариты и массу) [12]. Такой способ снижения температуры аэрозоля не применяется из-за его сложности.

Для решения проблемы снижения температуры огнетушащего аэрозоля до значений, при которых исключается самовоспламенение и плавление (82-160 °С) веществ и материалов (поливинилхлорид) в защищаемом объеме, путем внесения конструктивных изменений в стандартном генераторе огнетушащего аэрозоля (ГОА) (на примере ГОА «Муха-4»). В конструкцию генератора добавляется профилирующая вставка, через которую будет выходить в защищаемый объем огнетушащий аэрозоль, выполненная в виде сопла Лаваля [13].

Предлагаемое устройство используется для снижения температуры в газотурбинных двигателях, а для средств пожаротушения не применялось. В предлагаемом устройстве газ, проходя самое узкое сечение (критическое сечение) сопла, приобретает скорость, равную местной скорости звука, и далее, проходя диффузор, при расширении газ ускоряется до сверхзвуковых значений скоростей. При этом плотность газа резко уменьшается, и в соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона резко уменьшается температура газа [13, 14].

Целью исследований является разработка ГОА с газодинамическим устройством охлаждения пожаротушающей смеси. Для этого потребовалось провести литературный и патентный обзор АОС, исследовать конструктивные решения для охлаждения пожаротушающей смеси ГОА, разработать методику расчета геометрических параметров предлагаемого устройства охлаждения пожаротушающей смеси ГОА, рассчитать и разработать экспериментальный образец ГОА, провести экспериментальные исследования экспериментального образца и опытной партии ГОА.

Методика расчета профилирующей вставки для охлаждения огнетушащего аэрозоля. При расчете геометрических параметров профилирующей вставки сделаны следующие допущения, что газовый поток является изоэнтропным и адиабатическим, газовое течение является стационарным (установившимся) и одномерным, массовый расход газа одинаков во всех поперечных сечениях потока, влияние внешних сил пренебрежимо мало.

Исходными данными для расчета параметров являются:

1. Давление на выходе p_2 , которое принимаем равным одной атмосфере, т. е. $p_2 = 98100$ Па.
2. Температура на входе в кольцевое сопло T_1 . В соответствии с данными производителя ГОА «Муха-4» принимаем $T_1 = 500$ °С или $T_1 = 773$ °К.
3. Температура на выходе из сопла T_2 .
4. Показатель адиабаты аэрозоля k .
5. Массовый расход огнетушащего аэрозоля m , кг/с, который может варьировать от задаваемого времени подачи (5-40 с) при фиксированной массе заряда 350 г = $0,35$ кг.

Газовую постоянную для огнетушащего аэрозоля определяем исходя из молекулярной массы газовой фазы огнетушащего аэрозоля. Показатель адиабаты для смеси газов k огнетушащего аэрозоля определяем по формуле:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}, \quad (1)$$

где k_i – показатель адиабаты i -й фракции газа.

a_i – процентное содержание i -го компонента газа газовой смеси в АОС.

По данным производителя в состав АОС входят азот N_2 (16%), углекислый газ CO_2 (62%), пары воды H_2O (12%), окись магния MgO (3,5%), углекислый калий K_2CO_3 (3,5%), гидроксид KOH (3%).

Поскольку показатель адиабаты зависит от температуры, на основании справочных данных с использованием метода наименьших квадратов, получены зависимости показателя k для некоторых газов [14].

Для азота (N_2):

$$k = 1,427 - 2 \cdot 10^{-4} t, \quad (2)$$

где t – средняя температура между значениями температуры на входе и выходе из сопла, °С.

Для углекислого газа (CO_2):

$$k = 1,2627 - 10^{-4} t. \quad (3)$$

Для паров воды (H₂O):

$$k = \frac{100}{\ln t + 71}. \quad (4)$$

Поскольку давление на входе в кольцевое сопло Лавалья с цилиндрическим центральным телом не задано, предлагаемый порядок расчета [15-17] будет следующим.

1. Определим площадь входного сечения S_1 :

$$S_1 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d^2), \quad (5)$$

где D_1 – диаметр входного сечения. Диаметр входного сечения примем равным диаметру крышки используемого ГОА «Муха-4», который рассматривается как базовый при разработке ГОА оперативного применения; d – диаметр цилиндрического центрального тела кольцевого сопла Лавалья, т. е. внешний диаметр стакана ГОА «Муха-4».

2. Определим плотность газовой фазы аэрозоля ρ_{2r} в выходном сечении:

$$\rho_{2r} = \frac{p_2}{R \cdot T_2}. \quad (6)$$

3. Определим константу уравнения адиабаты:

$$\text{const} = \frac{p_2}{\rho_{2r}^k}. \quad (7)$$

4. Определяем температуру $T_{кр}$ в критическом сечении:

$$T_{кр} = T_1 \frac{2}{k+1}. \quad (8)$$

5. Определяем плотность газовой фазы $\rho_{кр.г}$ огнетушащего аэрозоля в критическом сечении:

$$\rho_{кр.г} = \left(\frac{R \cdot T_{кр}}{\text{const}} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (9)$$

6. Определяем давление $p_{кр}$ в критическом сечении:

$$p_{кр} = \text{const} \cdot \rho_{кр.г}^k. \quad (10)$$

7. Определим плотность огнетушащего аэрозоля $\rho_{ТВ}$ в критическом сечении, считая твердую фазу несжимаемой. Плотность твердой фазы аэрозоля равна:

$$\rho_{ТВ} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}. \quad (11)$$

где ρ_i – плотность i -й фракции твердых составляющих аэрозольной смеси; a_i – процентное содержание i -го компонента твердых составляющих аэрозольной смеси. Тогда приведенная (с учетом твердых фаз) плотность аэрозольной смеси $\rho_{кр}$ в критическом сечении будет равна:

$$\rho_{кр} = \frac{\rho_{кр.г} \cdot a_{г} + \rho_{ТВ} \cdot a_{ТВ}}{a_{г} + a_{ТВ}}, \quad (12)$$

где $a_{г}$ и $a_{ТВ}$ – процентный состав газовой и твердой фаз в аэрозоле.

8. Определяем среднюю приведенную скорость (с учетом твердых фаз) огнетушащего аэрозоля $\overline{V}_{кр}$ в критическом сечении [15]:

$$\overline{V}_{кр} = \varphi \sqrt{k \frac{p_{кр}}{\rho_{кр}}}, \quad (13)$$

где φ – скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0,97$ [18].

9. Рассчитываем критическое сечение кольцевого сопла.

Площадь критического сечения $S_{кр}$:

$$S_{кр} = \frac{m}{\rho_{кр.г} \cdot \overline{V}_{кр}}. \quad (14)$$

Внешний диаметр в критическом сечении $D_{кр}$:

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{4S_{кр}}{\pi} + d^2}. \quad (15)$$

10. Определим критическое отношение давлений $\beta_{кр}$ и плотность газовой среды $\rho_{1г}$ во входном сечении:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (16)$$

$$\rho_{1г} = \frac{\rho_{кр.г}}{\beta_{кр}}. \quad (17)$$

11. Форма поверхности от входного сечения до критического сечения может быть построена по уравнению Витошинского [15]:

$$r = \frac{r_{кр}}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_{кр}}{r_0} \right)^2 \right] \frac{\left(1 - \frac{3x^2}{l'^2} \right)^2}{\left(1 + \frac{x^2}{l'^2} \right)^3}}}, \quad (18)$$

где r_0 – радиус входного сечения, применительно к нашему случаю

$$r_0 = \frac{D-d}{2}, \quad (19)$$

$r_{кр}$ – радиус критического сечения

$$r_{кр} = \frac{D_{кр} - d}{2}, \quad (20)$$

$$l' = l\sqrt{3}, \quad (21)$$

где l – длина рассчитываемого участка, т. е. $l = L$ (сопла).

12. Определим приведенную (с учетом твердых фаз) плотность $\overline{\rho}_1$ во входном сечении сопла:

$$\overline{\rho}_1 = \frac{\rho_{1г} \cdot a_{г} + \rho_{ТВ} \cdot a_{ТВ}}{a_{г} + a_{ТВ}}. \quad (22)$$

13. По уравнению Сен-Венана [13] находим приведенную скорость \bar{V}_2 (с учетом многофазной среды) в выходном сечении

$$\bar{V}_2 = \varphi_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (23)$$

где φ_c – коэффициент расширяющегося сопла, $\varphi_c = 0,5$ [14].

14. Определяем размеры выходного сечения. Площадь выходного сечения S_2 рассчитывается по формуле

$$S_2 = \frac{m}{\rho_{2г} \cdot \bar{V}_2}, \quad (24)$$

где m – массовый расход огнетушащего аэрозоля, кг/с.

Диаметр выходного сечения D_2 равен:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4S_2}{\pi} + d^2}. \quad (25)$$

15. С учетом метода построения оптимальной конструкции кольцевого сопла с многокомпонентным рабочим телом, предложенного в [14], диаметр выходного сечения при $l = L$ будет равен:

$$D_2 = (D_{кр} - d) \cdot 7 + d. \quad (26)$$

Определены предполагаемые геометрические параметры газодинамического устройства типа кольцевого сопла Лавалья с цилиндрическим центральным телом. По результатам расчетов получили $D_1 = 98,4$ мм, $D_{кр} = 95,7$ мм, $D_2 = 82,9$ мм. Изготовлен экспериментальный образец ГОА с профилирующей вставкой для охлаждения пожаротушающей смеси.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения и корректировки теоретических подходов, методики расчета и конструкторской документации проведены экспериментальные исследования генераторов огнетушащего аэрозоля с усовершенствованным газодинамическим охладителем. При проведении исследований проводились следующие измерения. Измерение температуры производилось двумя методами: термопарами и с использованием тепловизора.

В сериях экспериментов в ГОА с профилирующей вставкой и без вставки термопары располагались по оси генератора с интервалом 0,1 м от выходного отверстия ГОА. Результаты измерений представлены на рисунке 1.

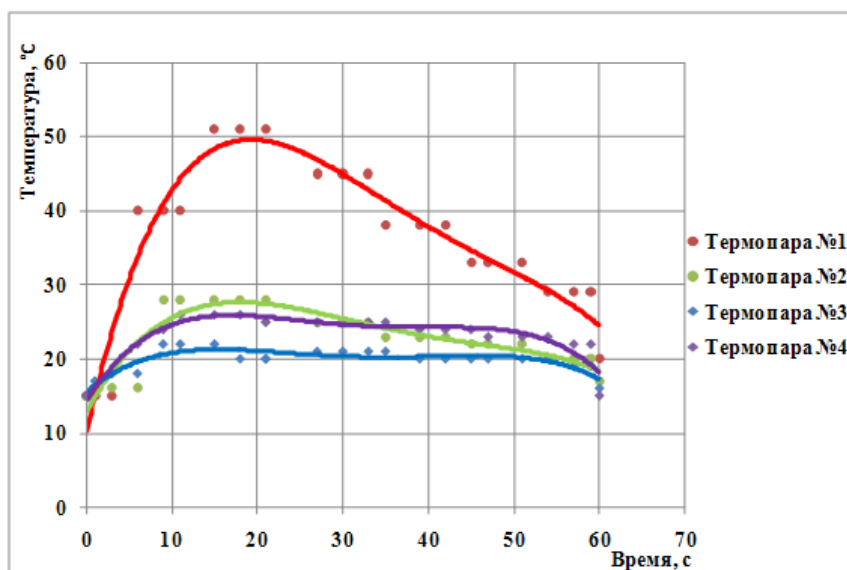


Рисунок 1 – График измерений температуры ГОА с модифицирующей вставкой

Анализ серии экспериментов ГОА с охладителем показал, что максимальная температура аэрозольной смеси достигается на 20-ой секунде. Истечение аэрозоля прекращалось на 40-ой секунде. Максимальная температура на 1-ой термопаре, которая располагалась на расстоянии 0,1 м от выходного отверстия ГОА, составила 52-56 °С. По результатам экспериментов первых 2-х серий на ГОА с охладителем температура на срезе сопла не превышала 100 – 122 °С.

Для сравнения эффективности работы газодинамического охладителя, выполненного в виде кольцевого сопла Лавалья с центральным цилиндрическим телом, проведена серия экспериментов с ГОА без модифицирующей вставки. Результаты экспериментов представлены на рисунке 2. Анализ результатов показывает, что температура огнетушащего аэрозоля из ГОА без охладителя значительно превышает температуру из ГОА с охладителем.

По результатам измерений, представленным на рисунке 2, экстремум температуры наблюдается так же на 20-й секунде и достигает 500 °С на срезе сопла. На расстоянии 0,1 м от среза сопла температура огнетушащего аэрозоля на ГОА без охладителя составляла 187 °С.

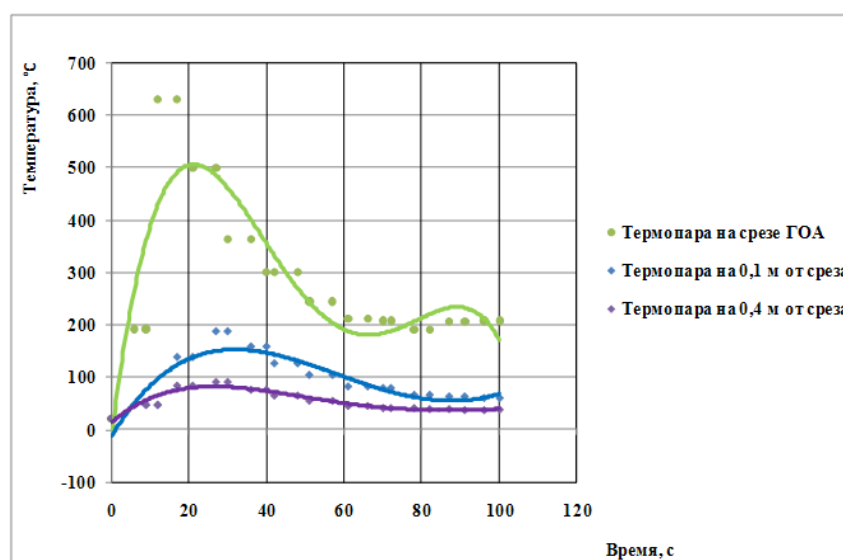


Рисунок 2 – Измерение температуры термопарами. Образец ГОА без модифицирующей вставки

С целью углубленного анализа температуры при работе ГОА при проведении экспериментов был использован тепловизор FLIR Systems. Тепловизор совместно с компьютерной программой TernaSAM Quick Report позволяет в данный момент времени исследовать полное поле температур снимка, определяя температуру в любой точке.

На рисунке 3 и 4 приведены снимки при работе ГОА без охладителя и с охладителем пожаротушащей смеси соответственно. Для анализа фотографировали на 10, 20, 35 и 50 секундах работы ГОА.

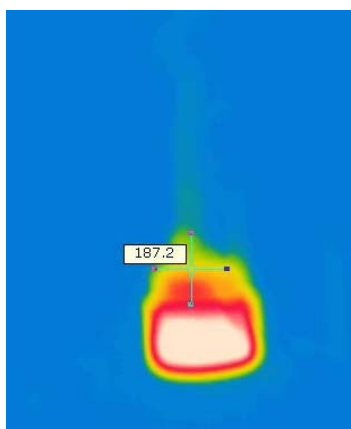


Рисунок 3 – ГОА без модифицирующей вставки (стандартный ГОА)

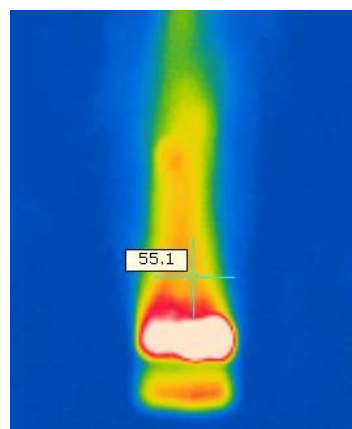


Рисунок 4 – ГОА с модифицирующей вставкой (экспериментальный ГОА)

Относительная неопределенность вычислений не превышала 12-14 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

Таким образом, во всех случаях при использовании газодинамического охладителя, выполненного в виде кольцевого сопла Лавалья с центральным цилиндрическим телом, происходило снижение температуры огнетушащего аэрозоля.

В процентном отношении относительное снижение температуры составляло:
на срезе сопла

$$\Delta = \frac{500^{\circ}C - 122^{\circ}C}{500^{\circ}C} = 74 \%,$$

на расстоянии 0,1 м

$$\Delta = \frac{187^{\circ}C - 56^{\circ}C}{187^{\circ}C} = 70 \%,$$

на расстоянии 0,4 м

$$\Delta = \frac{91^{\circ}C - 72^{\circ}C}{91^{\circ}C} = 21 \%.$$

Среднее относительное снижение температуры составило 55 %.

Выводы. С использованием известных формул (1-26), проведены расчеты геометрических параметров газодинамического устройства типа кольцевого сопла Лавалья с цилиндрическим центральным телом, что позволит расширить область применения ГОА для обеспечения пожарной безопасности объектов.

Изготовлен экспериментальный образец генератора и опытная партия ГОА с газодинамическим охладителем.

Проведены экспериментальные исследования генераторов огнетушащего аэрозоля с газодинамическим охладителем и получены следующие результаты:

- максимальная температура струи аэрозоля достигается на 20 секунде после срабатывания генератора;

- использование газодинамического охладителя, выполненного в виде кольцевого сопла Лавалья с центральным цилиндрическим телом, приводит к снижению температуры огнетушащего аэрозоля: на срезе сопла – на 74 %; на расстоянии 0,1 м – на 70 %; на расстоянии 0,4 м – на 21 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение эффективности применения аэрозольных установок для тушения пожаров с помощью добавок / И.А. Корольченко [и др.] // Пожарная безопасность. – 1996. – № 3. – С. 104–109.
2. Самборук, А.Р. Горение пористых газогенерирующих и аэрозолеобразующих составов для средств пожаротушения: дис. ... док. тех. наук: 01.04.17 / А.Р. Самборук. – Самара, 2006. – 345 л.
3. Коломин, А.Е. Теоретическое обоснование создания газогенераторов на твердом топливе с порошкообразными емкостными охладителями: дис. ... канд. тех. наук: 05.07.05 / А.Е. Коломин. – Пермь, 2006. – 130 л.
4. Бортников, Р.А., Разработка низкотемпературных твердотопливных газогенераторов с инертными теплообменниками: дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 / Р.А. Бортников. – Пермь, 2010. – 150 л.
5. Осипков, В.Н.. Создание новых пиротехнических источников холодного газа, совершенствование процессов, аппаратов и технологии их производства: дис. ... канд. тех. наук: 05.17.08 / В.Н. Осипков. – Бийск, 2004. – 183 л.
6. Кузнец, Е.А. Горение аэрозолеобразующих огнетушащих составов, генерирующих хлориды щелочных металлов: дис. ... канд. тех. наук: 01.04.17 / Е.А. Кузнец. – Самара, 2005. – 137 л.
7. Fire suppression system and solid propellant aerosol generator for use therein: пат. 1616599 Европа, МПК6 А62С 35/08 (2006.01), А62С 5/00 (2006.01), А62С 35/02 (2006.01) / Donald E. Olander,

- Michael L. Schall; заявитель Goodrich Corporation – № 05014617.4; заявл. 20.09.2002; опубл. 18.01.2006 / Бюл. 2006/03.
8. Flush-mounted fire extinguisher assembly: пат. 2208511 Европа, МПК6 А62С 13/78 (2006.01) / Rondino, Angelo Rome; заявитель Raimondi, Adriana Cavattoni - Raimondi, Viale dei Parioli – № 10150813.3; заявл. 15.01.2010; опубл. 21.07.2010 / Бюл. 2010/29.
 9. Fire suppression device: пат. EP1968714 Европа, МПК6 А62С 5/00 / POSSON, Philip, L.; заявитель Goodrich Corporation – № 60/756,374; 06825615.5; заявл. 06.10.2006; опубл. 19.07.2007 / Бюл. 2008/38.
 10. Aerosol fire extinguisher: пат. US 2007/0034390 США, МПК7 А62С 11/00 (2006.01), А62С 13/62 (2006.01), А62С 13/00 (2006.01) / William Vegsom; заявитель Buckeye fire equipment company – № 11/463,997; заявл. 11.08.2006; опубл. 15.02.2007.
 11. Hand-held aerosol fire suppression apparatus: пат. US8800676 В2, МПК7 А62С13/00; А62С5/00 / Hongbao Guo, Kun Zhang, Chunjie Ma, Tengfei Zhai, Zhenping Deng; заявитель Shaanxi J&R Fire Fighting Co., Ltd – № US 13/375,470; заявл. 03.07.2010; опубл. 12.08.2014.
 12. Способ получения огнетушащей смеси и устройство для его осуществления: пат. 2130792 Россия: МПК6 А 62 С 3/00 / Ю.М. Милехин, Э.Г. Ткачев, В.М. Сун, Ю.А. Милицын, В.К. Федоров, Т.П. Коробенина – № 97121686/12; заявл. 23.12.1997; опубл. 27.05.1999.
 13. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Теоретическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Учебное пособие. В 10 томах. – Т. 6: Гидродинамика. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736 с.
 14. Карташова, М.А. Построение оптимальной конфигурации кольцевого сопла с многокомпонентным рабочим телом / М.А. Карташева, А.Л. Карташев // Забабахинские научные чтения : сборник материалов IX Международной конференции 10-14 сентября 2007. – Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. – С. 259–261.
 15. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. – Изд. 2-е, переработ. М. – Л.: Госэнергоиздат., 1961. – 671 с.
 16. Нащекин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащекин. – Учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
 17. Шашкин, А.П. Основы прикладной газодинамики / А.П. Шашкин. – Учебное пособие. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2001. – 91 с.
 18. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика: Учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов / И.Л. Повх. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 504 с.