

УДК 699.816.3

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОФИЛИ СТРУЙ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ СОПЛ ЛАВАЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

Хрусталёв Б.М.*, акад. НАН РБ, д.т.н., профессор, Акельев В.Д.*, д.т.н., профессор,
Карпенчук И.В.**, к.т.н., доцент, Калиниченко Е.С. *, Максимов П.В.**,
Кравчук К.А.*, Костевич М.Ф.*

*Белорусский национальный технический университет
**Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

Email: tgv_73@tut.by

Дан термодинамический анализ струй жидкости и газа, истекающих из сопел Лавалья в объем, с температурными полями в условиях пожара, характеризующихся высокими температурами воздуха. Рассчитаны термодинамические параметры сопла Лавалья в программе на языке программирования Паскаль ABC.

Air and gas streams, elapsing from the Laval' nozzle to capacity, in fire temperature fields, characterized by high temperatures, thermo dynamical analysis presented. Laval' nozzle thermo dynamical parameters calculation programme in Pascal ABC programming language elaborated.

(Поступила в редакцию 18 июля 2014 г.)

Введение

Сопло было предложено в 1890 г. шведским изобретателем Густафом де Лавалем для паровых турбин. Сопло Лавалья – техническое приспособление, разгоняющее проходящий по нему газовый поток до сверхзвуковых скоростей. Оно широко используется на некоторых типах паровых турбин и является важной частью современных ракетных двигателей и сверхзвуковых реактивных авиационных двигателей [1].

Устройство, в котором сверхзвуковые скорости достигаются с помощью сужения канала в дозвуковой области ($M < 1$) и расширения его в сверхзвуковой области ($M > 1$). Переход через скорость звука возможен и в канале постоянного сечения, если в области $M < 1$ газ нагревать, а при $M > 1$ – охлаждать. Подвод теплоты к дозвуковому течению газа в канале приводит к уменьшению плотности газа и увеличению его скорости.

В цилиндрическом канале трение способствует ускорению дозвукового потока и торможению сверхзвукового (нагревание при постоянном массовом расходе). Струи с низкой температурой сверхзвуковой скоростью и истекающие из сопел круглого сечения могут быть компактными, турбулентными, неизотермическими, слабо охлажденными. Общий подход и алгоритм к решению данной проблемы изложен в [1-15].

Некоторые характеристики струй в соплах. Диффузоры, обеспечивающие малые потери напора при торможении потоков, необходимы при решении многих технических задач и представляют значимую проблему аэродинамических устройств. В сверхзвуковых аэродинамических устройствах существенно восстановление давления за рабочей зоной канала. В обычных диффузорах преобразование скоростного напора сверхзвукового потока в давление сопровождается прямым скачком уплотнения, что приводит к большим потерям. Поэтому сверхзвуковые потоки целесообразно тормозить не в прямом скачке (при переходе сверхзвуковой скорости в дозвуковую), а в оптимальной системе, включающей косые скачки (уменьшение сверхзвуковой скорости), и примыкающего прямого скачка. Система косых скачков может создаваться введением в диффузор специальных конусов или клиньев [2, 3].

Избыточная теплота в струе может быть определена из уравнения:

$$c_{px} \rho_x F_x w_x \vartheta_x = c_{p\infty,1} \rho_{\infty,1} F_{\infty,1} w_{\infty,1} \vartheta_{\infty,1}, \quad (1)$$

где ϑ_x и $\vartheta_{\infty,1}$ – средние относительно расхода избыточные температуры в поперечных сечениях струи на расстоянии x от поперечного сечения и на выходе из него, К;

c_{px} и $c_{p\infty,1}$ – удельные массовые изобарные теплоемкости воздуха, Дж/(кг·К);

ρ_x и $\rho_{\infty,1}$ – плотности струй в тех же сечениях, кг/м³;

F_x и $F_{\infty,1}$ – площади в тех же сечениях, м²;

w_x и $w_{\infty,1}$ – осевые скорости потока в тех же сечениях, м/с.

Из (1) следует:

$$\beta_x \frac{w_x}{g_x} = \beta_{\infty,1} \frac{w_{\infty,1}}{g_{\infty,1}}. \quad (2)$$

где β_x и $\beta_{\infty,1}$ – эмпирические коэффициенты, зависящие от количества движения секундной массы в плоскости истечения и в сечении на расстоянии x от плоскости.

Из вышеизложенного следует, что относительная средняя по расходу избыточная температура в поперечном сечении может быть определена из выражения:

$$\bar{g}_x = \frac{g_x}{g_{\infty,1}} = \frac{\beta}{\beta_{\infty,1}} \bar{w}_{Fi}. \quad (3)$$

Безразмерное поле относительных избыточных температур в поперечном сечении основного участка неизотермической струи в соответствии с уравнением Тейлора:

$$\bar{g} = \frac{g}{g_x} = \frac{t - t_{\infty,2}}{t_{oc} - t_{\infty,2}} = (\bar{w})^{0,5}, \quad (4)$$

где g – избыточная температура в произвольной точке $A(x, y)$ струи, °С;

g_x – избыточная температура на оси струи в точке $A(x, 0)$, °С;

t – температура поперечного сечения струи, °С;

t_{oc} – температура оси струи в том же сечении, °С;

$t_{\infty,2}$ – температура газа (воздуха) в системе, °С;

\bar{w} – относительная средняя скорость субстанции в локальной точке поперечного сечения струи.

Анализ условий развития свободных струй показал, что границы струи неоднозначны, поэтому используется известная характеристика струи при постоянной скорости (изотахи).

Поле температур в струе может быть рассчитано по уравнению Тейлора:

$$\frac{g}{g_x} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{cx} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где c – эмпирическая константа, равная 0,082. При этом релаксация температур в струе и окружающем пространстве происходит, когда $(y/x) \approx 0,4$.

Уравнения, характеризующие количество движения (импульс) секундной массы (кг·м), теплоту (Вт), переносимую струями, массовый расход истекающей смеси (кг/с), могут быть представлены в виде:

$$J_x = \int_0^{\infty} \rho w^2 dF, \quad Q_x = \int_0^{\infty} c_p \rho w g dF, \quad G_x = \int_0^{\infty} \rho w q dF, \quad (6)$$

где ρ – средняя плотность струи в сечении на расстоянии x от плоскости истечения до рассматриваемого сечения, кг/м³; w – локальная скорость потока в том же сечении, м/с; g и

c_p – избыточная температура и удельная массовая теплоемкость потока в том же сечении;
 q – массовая концентрация истекающей смеси в рассматриваемом сечении потока, кг/кг
 (начальная концентрация $q_{\infty,1} = 1$ кг/кг); dF – элементарная площадь произвольного
 поперечного сечения струи с постоянными скоростями, избыточными температурами,
 представляющая собой плоское кольцо радиусом y и характерным размером dy :

$$dF = 2\pi y dy. \quad (7)$$

Плотность потока легко определить из выражения:

$$\rho = \rho_{\infty,1}q + \rho_B(1-q) = \rho_B + q(\rho_{\infty,1} - \rho_B) = \rho_B + q\Delta\rho, \quad (8)$$

где $\Delta\rho = \rho_{\infty,1} - \rho_B$, кг/м³;

$\rho_{\infty,1}$ – средняя плотность струи в плоскости истечения (начальная плотность потока), кг/м³;

ρ_B – плотность эжектируемого воздуха, кг/м³.

Аналогично определяется удельная массовая теплоемкость:

$$c_p = c_{p\infty,1}q + c_{pB}(1-q) = c_{pB} + q(c_{p\infty,1} - c_{pB}) = c_{pB} + q\Delta c_p, \quad (9)$$

где $\Delta c_p = c_{p\infty,1} - c_{pB}$, кг/м³;

$c_{p\infty,1}$ – удельная массовая теплоемкость струи в плоскости истечения (начальная
 плотность потока), Дж/(кг·К);

c_{pB} – удельная массовая теплоемкость эжектируемого воздуха, Дж/(кг·К).

Изменение скорости и концентрации описываются уравнениями вида (5):

$$\frac{w}{w_x} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{cx}\right)^2\right], \quad \frac{q}{q_x} = \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{y}{cx}\right)^2\right]. \quad (10)$$

Примем также следующие условия:

$$J_x = J_{\infty,1} = \rho_{\infty,1}w_{\infty,1}^2 F_{\infty,1}\beta_{\infty,1}, \quad Q_x = Q_{\infty,1} = \rho_{\infty,1}c_{p\infty,1}w_{\infty,1}^2 F_{\infty,1}\beta_{\infty,1},$$

$$G_x = G_{\infty,1} = \rho_{\infty,1}w_{\infty,1} F_{\infty,1}q_{\infty,1}\beta_{\infty,1} = \rho_{\infty,1}w_{\infty,1} F_{\infty,1}\beta_{\infty,1}. \quad (11)$$

Решение уравнений (6) – (11) приводит к следующим зависимостям:

$$\frac{w_x}{w_{\infty,1}} = \frac{\rho_{\infty,1} F_{\infty,1} \beta_{\infty,1}}{q_x \pi c^2 x^2 \left(\frac{4}{3}\rho_B + q_x \Delta\rho\right)} = \frac{1}{q_x k \left(\frac{4}{3}\rho_B + q_x \Delta\rho\right)}; \quad (12)$$

$$\left(\frac{w_x}{w_0}\right)^2 = \frac{\rho_{\infty,1} F_{\infty,1} \beta_{\infty,1}}{\pi c^2 x^2 \left(\rho_B + \frac{4}{5}q_x \Delta\rho\right)} = \frac{1}{k \left(\rho_B + \frac{4}{5}q_x \Delta\rho\right)}, \quad (13)$$

где $k = \frac{\pi c^2 x^2}{\rho_{\infty,1} F_{\infty,1} \beta_{\infty,1}}$.

Из совместного решения уравнений (12) и (13) можно получить уравнение для
 расчета концентрации потока на оси струи:

$$k\Delta\rho^2 q_x^4 + \frac{8}{3}\rho_B k \Delta\rho q_x^3 + \frac{16}{9}\rho_B^2 k q_x^2 - \frac{4}{5}\Delta\rho q_x - \rho_B = 0. \quad (14)$$

Данное уравнение четвертой степени решается аналитически, и для определенных
 значений k (следовательно, и x) получаем конкретные значения величины q_x .

В таком случае совместное решение уравнений (5) – (9), (12) и (14) позволяет определить избыточную температуру на оси струи в произвольной точке сечения:

$$\vartheta_x = \vartheta_{\infty,1} c_{p\infty,1} \frac{q_x \left(\frac{4}{3} \rho_v + q_x \Delta \rho \right)}{\left(\frac{2}{3} q_x^2 \Delta c_p \Delta \rho + \frac{4}{5} q_x^2 (\rho_v \Delta c_p + c_{p_v} \Delta \rho) + \rho_v c_{p_v} \right)}. \quad (15)$$

Приведенные выше зависимости для скорости, концентрации и избыточной температуры справедливы для основного участка струи.

Длину участка формирования поперечного профиля струи можно определить или из уравнения (12) при условии $w_x = w_{\infty,1}$. Также для участка формирования справедливо

$$\vartheta_x = \vartheta_{\infty,1} \text{ и } q_x = q_{\infty,1}.$$

Полученные результаты. Расчет избыточной температуры выполнялся при следующих характеристиках истекающей струи из кольцевого сопла Лавала: состав смеси: $N_2 = 16 \%$; $CO_2 = 62 \%$; $H_2O = 12 \%$; $MgO = 3,5 \%$; $K_2CO_3 = 35 \%$; $KOH = 3 \%$; массовый расход $m = 0,070$ кг/с; давление смеси на выходе из сопла $P_{\infty,1} = 0,0981$ МПа; температура потока – $T_{\infty,1} = 473$ К; скорость потока на выходе – $w_{\infty,1} = 61$ м/с; площадь выходного сечения – $F_{\infty,1} = 122 \cdot 10^{-5}$ м²; радиус выходного сечения сопла – $R_{\infty,1} = 0,0492$ м. Струя рассматривалась как свободная, затопленная, турбулентная, компактная, неизотермическая, слабо охлажденная. Расчет избыточной температуры в произвольном сечении струи выполнялся в соответствии с зависимостями (5) и (15).

Поперечные значения избыточных температур при температурах окружающей среды от 20 до 500°C представлены на рис. 1. Профили избыточных температур в поперечных сечениях характеризуются экспоненциальными зависимостями и симметричны относительно y/x , где x – это координата в горизонтальной плоскости, отложенная по оси, перпендикулярной плоскости выходного сечения сопла. Например, если $x = 0$ м – это плоскость выходного сечения сопла; если $x = 1,5$ м, то рассматриваемая плоскость параллельна плоскости выходного сечения сопла и отнесена от нее на расстояние 1,5 м в направлении истечения струи; y – это координата в вертикальной плоскости, отложенная по оси перпендикулярной оси $0x$.

Анализ поперечных профилей избыточных температур $\vartheta(x;y/x)$ описывается зависимостями избыточной температуры от отношения y/x в поперечных сечениях струи и имеет экспоненциальный вид. Для автоматизации расчетов была разработана программа определения термодинамических параметров аэрозольной смеси при прохождении через сопло Лавала на языке программирования Паскаль ABC. Программа позволяет получить характеристики сопла Лавала для заданных составов смеси. Как видно из рис. 1 выравнивание температуры происходит при $y/x = \pm 0,4$, но достаточно значимые значения избыточной температуры наблюдаются при $y/x = \pm 0,3$.

Из графиков на рис. 1а можно сделать следующие выводы:

– при температуре воздуха в окружающем пространстве ($t_{\infty,2} = 20$ °С) в поперечном сечении струи на расстоянии $x = 0,15$ м от сечения истечения избыточная температура ϑ изменяется от 0 до 165 °С;

– если $x = 0,18$ м, то ϑ изменяется в диапазоне от 0 до 150 °С;

– если $x = 0,23$ м, то ϑ изменяется в диапазоне от 0 до 130 °С;

– если $x = 0,3$ м, то ϑ изменяется в диапазоне от 0 до 115 °С.

Из профиля кривых на рис. 1б – 1г видно, что они плавно изменяются в рассчитанных диапазонах температур и кривизна зависит от отношения y/x ; избыточная температура изменяется от 0 до 300 °С.

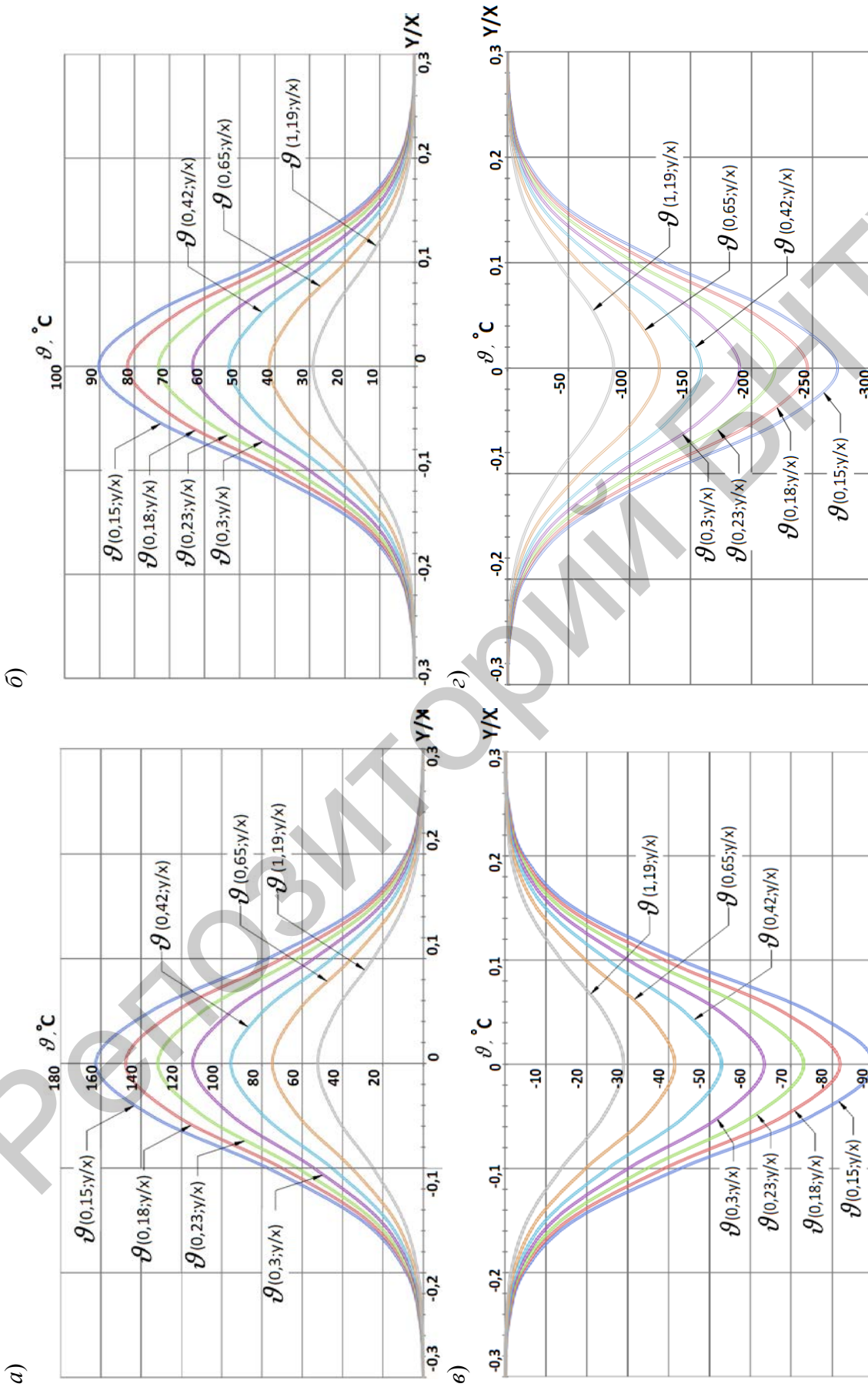


Рисунок 1 – Поперечные профили избыточных температур $\vartheta(x; y/x)$ при температуре воздуха в окружающем пространстве: а) $t_{\infty,2} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $t_{\infty,2} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) $t_{\infty,2} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) $t_{\infty,2} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Заключение. Рассмотрен характер струи, истекающей из патрубка кольцевого сопла Лавалея, на основании построенных профилей распределения избыточной температуры в поперечных сечениях струи на различных расстояниях от точки истечения. Анализ показал, что скорости по длине осесимметричных, плоских изотермических струй трансформируются по экспоненциальным законам. Путь перемешивания струй в большинстве поперечных сечениях зависит от термодинамических параметров, изменяющихся по направлению потока. При числах Рейнольдса $3 \cdot 10^3 \div 5,5 \cdot 10^5$ гидроаэродинамические, тепловые явления в струях автомодельны.

Из описанных уравнений следует, что во многих турбулентных струях профили избыточных температур и скоростей совпадают.

Разработана программа, позволяющая автоматизировать расчет значений термодинамических параметров для любых смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталёв, Б.М. Техническая термодинамика в 2-х частях. Часть 1: учебник для вузов / Б.М. Хрусталёв, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк; под. общ. ред. Б.М. Хрусталёва. – Минск: УП Технопринт, 2004. – 485 с. – Предм. указ.: с. 470-478. – 2500 экз. – ISBN 985-464-547-9.
2. Власов, В.Н. Сопло Лавалея как сверхъединичное устройство / под. общ. ред. В.Н. Власова // «Академия Тринитаризма», М., Эл. № 77-6567, публ. 19013, 24.05.2014.
3. Серяков, А.В. Пульсационные течения в паровом канале тепловых труб / А.В. Серяков, А.А. Павлов, Ю.Е. Михайлов, В.К. Белоусов // Решетниковские чтения. Материалы XVII Международной конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетникова. 2013. ч.1. С. 93-96.
4. Дейч, М.Е. Газодинамика / М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин; под. общ. ред. М.Е. Дейча. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 384 с.
5. Повх, Л. Техническая гидромеханика / под. общ. ред. Л. Повха; – Ленинград: Машиностроение. – 1976. – 504 с.
6. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович; – М.: Физматгиз. – 1960. – 720 с. ISBN 978-5-4365-0031-7.
7. Талиев, В. Н. Аэродинамика и вентиляция / В.Н. Талиев; – М.: Госстройиздат. – 1963. – 295 с.
8. Шепелев, И. А. Приточные вентиляционные струи и воздушные фонтаны / И.А. Шепелев. – «Изв. АСИА СССР», 1961, № 4. – 108 с.
9. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. Изд. 4-е, переработ. и доп. – М.: Энергия. 1972. – 312 с.
10. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. 2. Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов; под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.
11. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. Монография / С.В. Пузач – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
12. Идельчик, И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
13. Методика расчета гидродинамических параметров газодинамического устройства типа сопла Лавалея для охлаждения пожаротушающей смеси : отчет о НИР (промежуточ.) : 6-36 / Ком.-инжен. ин-т МЧС РБ; рук. И.В. Карпенчук. – Минск, 2013. – 39 с. – Библиогр.: с. 37–39. – Инв. № ГР 20130454.
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. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: Учебник для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.