

- propetrovsk : Dnepr-VAL, 2006. – 454 p. (Rus.)
9. Neshtsheret P.A. To an estimate of a hitting range of a supersonic gas jet / P.A. Neshtsheret, I.A. Lentsov // Izv. VUZov. Energetika. – 1988. – № 10. – P. 84-88. (Rus.)
  10. Lentsov I.A. Exploration and calculation of the geometrical characteristics of a supersonic segment not perturbed gas jets / I.A. Lentsov, V.A. Serebryakov // Gazodynamika i akustika struinikh tetshenii. – Novosibirsk, 1987. – P. 38-42.
  11. Neshtsheret P.A. К расчету течения в основном участке сверхзвуковой струи с учетом влияния торца сопла / P.A. Neshtsheret, E.A. Kapustin, O.E. Shlik // PMTF, 1984. – № 5. – P. 81-85. (Rus.)
  12. Shirie J.W. Length of a supersonic core high-speed jet / J.W. Shirie, J.G. Seubold // RTK. – 1967. – V.5. – № 11. – P. 198-199. (Rus.)
  13. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V.28, № 1. – P. 35-40. (Rus.)
  14. Lukhtura F.I. Critical gas outflow from nozzles / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics. – 1993. – V.29, № 4. – P. 585-588.
  15. Kapustin E.A. One-dimensional theory of jets / E.A. Kapustin, F.I. Lukhtura // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2001. – Issue 11. – P. 243-249. (Rus.)
  16. Lukhtura F.I. About the critical concentration of carbon in a melt of converter / F.I. Lukhtura // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2012. – Issue 24. – P. 49-56. (Rus.)
  17. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // J. Spacecraft. – 1964. – V.1, № 4. – P. 403-408.
  18. Antsupov A.V. Exploration of parameters of an off-design supersonic gas jet / A.V. Antsupov // Jurnal tekhnitsheskoj fiziki. – 1974. – T.44, № 2. – P. 372-379. (Rus.)
  19. Lukhtura F.I. About erosive wearing of purge nozzles of tuyeres of LD converters of the upper blast / F.I. Lukhtura, A.V. Sushchenko, V.N. Yevtshenko // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2003. – Issue 13. – P. 244-250. (Rus.)
  20. Nozzles of LD converters tuyeres with boosted stability against erosive wearing / A.V. Sushchenko, F.I. Lukhtura, A.B. Kovura, A.V. Gnedash, V.I. Ganoshenko // Stal, 2005. – № 9. – P. 20-24. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.05.2015

УДК 533.6.011.72:681.121.089

© Лухтура Ф.И.\*

## О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

*Представлена методика расчета параметров свободных струйных течений в квазиодномерной постановке, наиболее доступной для решения прикладных инженерных задач. Приведены основные закономерности и связи продольного затухания скорости с присоединенной массой и нарастанием толщины сдвигового слоя. Достоинство данной методики – универсальность и возможность использования для определения параметров как ламинарных, так и турбулентных (с различной степенью начальной турбулентности) дозвуковых и сверхзвуковых струйных течений из сопел различной конфигурации.*

**Ключевые слова:** сопло, струя, поток, скорость, эжекция, присоединенная масса.

*Лухтура Ф.И. Про закономірності затоплених струминних течій. Наведена методика розрахунку параметрів вільних струминних течій у квазіодновимірній постановці, найбільш доступній для рішення прикладних інженерних задач. При-*

\* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ведені основні закономірності та зв'язки повздовжнього згасання швидкості з приєднаною масою та нарощуванням товщини зсувного шару. Перевага даної методики – універсальність та можливість використання для визначення параметрів як ламінарних, так і турбулентних (з різними ступенями початкової турбулентності) дозвукових та надзвукових струминних течій з сопел будь-якої конфігурації.

**Ключові слова:** сопло, струмінь, потік, швидкість, ежекція, приєднана маса.

**F.I. Lukhtura. On regularities of submerged jet flows.** The calculation technique of free jet flows parameters in quasi one-dimensional formulation – the most suitable for the solution of applied engineering problems has been submitted. The advantage of this technique is its- universality and possibility to use it for definition of both laminar and turbulent parameters definition (initial turbulence degree being different), subsonic and supersonic jet flows through nozzles of various configuration. The basic regularities and dependences of speed longitudinal attenuation of speed on additional mass and the shift layer thickness increase for axial-symmetric and flat jets assuming that: parameters in isobaric section are distributed uniformly; the transverse components of speed in the jet are neglected; the speed structure (profile) in the jet section obeys the Schlichtings ratio; the pressure in the jet behind the isobaric section in the supersonic jet is equal to the pressure in the surrounding medium. For jet streams the value of additional mass is important, as it is responsible for portable properties of jets and is the parameter that takes indirect account of turbulent viscosity. Practically complete agreement between the received relations for axial-symmetric and flat jets has been supported with experiments, including for supersonic off-design jets. The given procedure makes it possible to extend the theory of turbulent jets.

**Keywords:** nozzle, jet, flow, speed, ejection, additional mass.

**Постановка проблеми.** В технических приложениях часто встречаются потоки газообразных и капельных жидкостей, граничащих соответственно с газовой или жидкой фазами. Их называют газовыми или гидравлическими струями. В случае несоответствия фаз на границе их называют газожидкостными. Различают свободные и ограниченные, затопленные и незатопленные струи. Практически в технике и энергетике приходится иметь дело лишь с турбулентными струями.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Некоторые сведения о теории турбулентных струй можно найти в [1-13], об экспериментальных исследованиях – в [14-33]. Из всего предложенного перечня информации заслуживают внимания работы [4, 5], в которых устранены некоторые противоречия, встречающиеся как в теории струй, так и в выборе коэффициентов смешения (более распространенный термин, справедливый лишь для несжимаемых течений – постоянная смешения, являющаяся показателем турбулентной вязкости). Эти работы открывают возможности для формирования новых физических взглядов на проблемы турбулентных течений. При этом в [5] допущены некоторые неточности, базирующиеся на известных представлениях [1, 6-8], и связанные, в первую очередь, с осреднением параметров (скорости) по толщине слоя (по сечению) струи и выбором значения средней скорости. Кроме того, теория турбулентных струй далека от окончательного завершения, поэтому полезно рассмотреть проблему турбулентных струйных течений под различным углом зрения.

**Цель статьи** – устранить перечисленные неточности, представленные в [5 и др.], и представить в рамках одномерной постановки более простой и физичный подход для описания поля течения затопленных струй и определения их характерных параметров.

**Изложение основного материала.** Ограничимся изложением простейших закономерностей для свободных турбулентных струй, распространяющихся в неподвижной среде с теми же свойствами, что и среда, составляющая струю - затопленных струй.

Экспериментальные и теоретические исследования струй позволили установить их структуру (рис. 1). Газ, вытекающий из сопла, за счет турбулентного перемешивания вовлекает в движение окружающую среду. Газ окружающей среды составляет присоединенную массу струи. Передача движения присоединенной массе вызывает уменьшение скорости исходной массы струи.

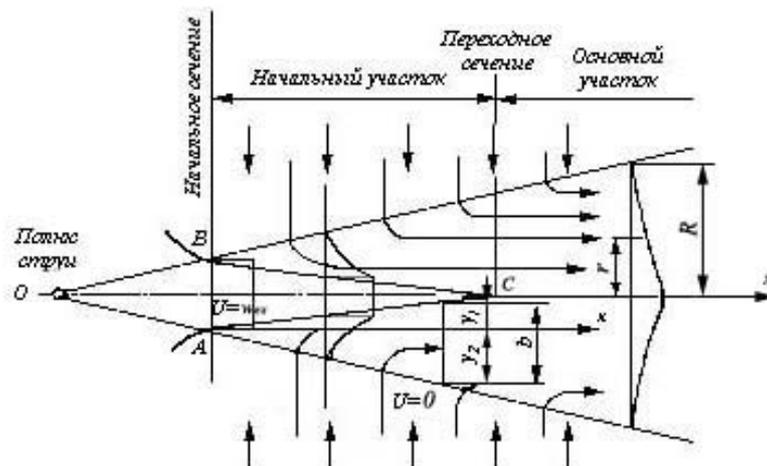


Рис. 1 – Структура свободной затопленной струи

Перемешивание происходит на всем протяжении струи, начиная от кромок сопла (корня струи), и толщина зоны перемешивания (сдвигового слоя) растет с увеличением расстояния от начала смешения (в отсутствии отрыва потока от стенок образующей сопла – от выходного сечения сопла) (рис. 1). Часть струи (расстояние  $L_C$ ) от начала смешения (АВ) до смыкания пограничных (сдвиговых) слоев на оси струи (точка С) называют начальным участком или ядром потенциального течения (ядром постоянной скорости). Далее вниз по потоку – переходный и основной участки. Определение границ внутреннего и внешнего пограничных слоев на начальном участке и внешней границы струи затруднительно ввиду малых градиентов скорости в этой области. Расширение струи не означает наличия существенных упорядоченных радиальных скоростей, переменности плотности и давления внутри струи. Происходит эжекция (подсос) окружающей среды в струю или как бы «налипание» частиц внешней среды на струю. Такая структура струи сохраняется и при сверхзвуковых скоростях истечения. Лишь на нерасчетных режимах, кроме начального участка 2 длиной  $L_C$ , существует участок 1 разгона (длиной  $L_m$ ) и торможения для недорасширенных струй (рис. 2) и участок торможения (первая «бочка» ударно-волновой структуры) для перерасширенных струй, на котором поток приспосабливается к атмосферному давлению, называемом начальным газодинамическим участком (рис. 2), который заканчивается изобарическим сечением. Кроме этого, сверхзвуковые струи отличаются наличием участка сверхзвуковых скоростей  $L_S$  (газодинамический участок 3), в пределах которого на нерасчетных режимах истечения могут наблюдаться ударные волны (системы косых и прямых скачков уплотнения и так называемая квазипериодическая ударно-волновая структура), образующиеся из-за неравномерного распределения скорости в изобарическом сечении  $ex$  (конец «первой» бочки ударно-волновой структуры). Специальная профилировка сопла может препятствовать образованию ударных волн на этом участке только на расчетных режимах истечения [1, 4, 6].

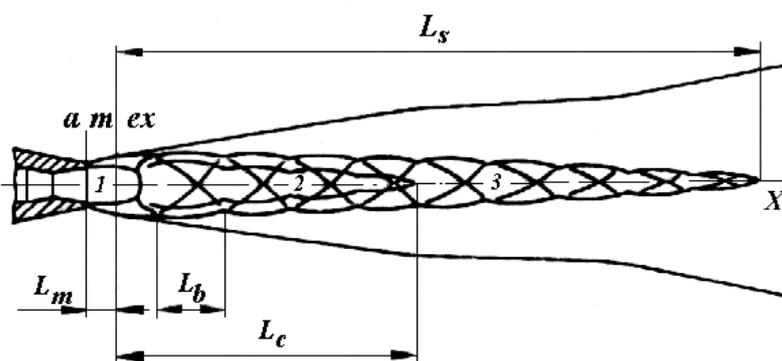


Рис. 2 – Структура сверхзвуковой нерасчетной струи

Известно, что в турбулентных (затопленных) дозвуковых и сверхзвуковых струях наблюдается аффинное подобие средних по времени скоростей в поперечном сечении по толщине динамического пограничного слоя, что неудивительно, так как струя и есть своеобразный пограничный слой. Подобие состоит в том, что профили осредненных по времени скоростей, различные в различных поперечных сечениях, сводятся в единую кривую, если перейти к безразмерным переменным: скорость в произвольной точке переходного и основного участков  $w$  отнести к скорости на оси  $w_{max}$  в том же сечении, а радиальную (в случае круглой струи) координату  $r$  – к радиусу границы струи  $R$ . Чаше в качестве масштаба берут величину более определенную, чем  $R$ , например,  $r_{0,5}$  – расстояние от оси течения, на котором  $w = 0,5 \cdot w_{max}$ .

Безразмерные скорости  $\bar{w} = w/w_{max}$  в разных сечениях равны друг другу, когда равны безразмерные координаты  $\bar{r} = r/r_{0,5}$ . Профиль скорости в поперечных сечениях на переходном и основном участках струи хорошо описывается теоретической формулой Г. Шлихтинга [1, 2, 6-8]

$$\frac{w}{w_{max}} = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1,5} \right]^2 = \left[ 1 - 0,441 \left( \frac{r}{r_{0,5}} \right)^{1,5} \right]^2, \quad (1)$$

где  $w_{max}$  – скорость на оси струи, м/с;  
 $r$  – текущий радиус сечения, м;  
 $R$  – радиус сечения струи, м.

Чтобы полностью описать поле скоростей струи  $w(x, r)$ , необходимо в формулу Шлихтинга подставить выражение  $w_{max} = w_{max}(x)$ . Последнюю зависимость можно найти с помощью теоремы импульсов.

Особенностью свободной турбулентной струи является близкое к постоянной величине давление, как вдоль нее, так и в поперечных сечениях (изобарическая струя). В любой точке струи, кроме начального газодинамического участка в нерасчетных струях [4, 5] (рис. 2), статическое давление можно считать равным давлению в окружающей среде. Поэтому, применяя теорему импульса к струе, легко приходим к заключению, что секундный перенос импульса через любое поперечное сечение струи – один и тот же

$$m_{ex} w_{ex} = \beta \cdot m_x \bar{w}_x, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент количества движения (Буссинеска);  
 $w_{ex}$  и  $\bar{w}_x$  – соответственно средние скорости в выходном сечении сопла (или начальном изобарическом сечении на нерасчетных режимах истечения) и в рассматриваемом сечении струи, м/с;  
 $m_{ex} = \rho_{ex} w_{ex} F_{ex}$  и  $m_x = \bar{\rho}_x \bar{w}_x F_x$  – соответственно расходы газа в этих же сечениях, кг/с.

При написании выражения (2) были использованы следующие допущения:

- параметры в изобарическом сечении распределены равномерно;
- пренебрегается поперечными составляющими скорости в струе;
- профиль скорости в поперечных сечениях принимается по соотношению (1);
- давление в струе за изобарическим сечением в сверхзвуковой струе равно давлению в окружающей среде (атмосферному).

Среднюю скорость  $\bar{w}_x$  и коэффициенты  $\beta$  в сечении свободной круглой струи радиусом  $R$  определим, предполагая, что скорости по сечению распределены по закону Шлихтинга (1).

Для определения  $\bar{w}$ ,  $\beta$  выделим элементарную площадку в форме кольца для круглой струи, т. е.  $dF = 2\pi r dr$ , и для плоской струи в форме вытянутого прямоугольника (щелевидной, одна сторона которого стремится к бесконечности) –  $dF = b dr$ .

Теперь по нижеприведенным формулам для несжимаемой жидкости найдем среднюю скорость и коэффициент количества движения  $\beta$ :

$$\bar{w} = \frac{1}{F} \int_F w_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 2\pi r dr = \frac{2w_{max}}{R^2} \int_0^R \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 r dr, \quad (3)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{F} \int_F w_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 b dr = \frac{w_{\max}}{R} \int_0^R \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^2 dr. \quad (4)$$

Для круглой струи  $F = \pi R^2$ , плоской –  $F = bR$ , где  $b$  – ширина щели.

Пределы интегрирования должны охватывать все сечение струи, где осуществляется перенос (динамический пограничный слой), т. е. от 0 до  $R$ .

Для круглой струи средняя скорость равна  $\bar{w} = \frac{9}{35} w_{\max} \cong 0,257 w_{\max}$ . Для плоской –  $\bar{w} = \frac{9}{20} w_{\max} = 0,45 w_{\max}$ .

Коэффициент количества движения для круглой струи

$$\beta = \frac{\int_F w^2 dF}{\bar{w}^2 F} = \frac{\int_0^R w_{\max}^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4 2\pi r dr}{\pi R^2 \left( \frac{9}{35} \right)^2 w_{\max}^2} = \frac{2 \int_0^R \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4 r dr}{R^2 \left( \frac{9}{35} \right)^2}. \quad (5)$$

$$\beta = 4 \left( \frac{35}{9} \right)^2 \left( \frac{1}{4} - \frac{4}{7} + \frac{6}{10} - \frac{4}{13} + \frac{1}{16} \right) = 2,019.$$

Для плоской –

$$\beta = \frac{\int_F w^2 dF}{\bar{w}^2 F} = \frac{\int_0^R w_{\max}^2 \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4 b dr}{bR \left( \frac{9}{20} \right)^2 w_{\max}^2} = \frac{\int_0^R \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^4 dr}{R \left( \frac{9}{20} \right)^2}. \quad (6)$$

$$\beta = \left( \frac{20}{9} \right)^2 \left( 1 - \frac{8}{5} + \frac{6}{4} - \frac{8}{11} + \frac{1}{7} \right) = \frac{400}{81} \cdot \frac{243}{770} = \frac{1200}{770} = 1,558.$$

Учитывая связь между средней скоростью  $\bar{w}_x$  и максимальной  $w_{\max}$  на оси течения несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{const}$ ) и значение  $\beta$ , получим для круглой струи

$$m_{ex} w_{ex} = 2,019 \cdot m_x \cdot 0,257 \cdot w_{\max} = 0,519 \cdot m_x w_{\max}. \quad (7)$$

Для плоской

$$m_{ex} w_{ex} = 1,558 \cdot m_x \cdot 0,45 \cdot w_{\max} = 0,7 \cdot m_x w_{\max}. \quad (8)$$

Представим расход газа в любом сечении  $x$  струи в виде

$$m_x = m_{ex} + m_{\infty} = m_{ex}(1 + g), \quad g = m_{\infty}/m_{ex}, \quad (9)$$

где  $g$  – относительная присоединенная масса, кг/кг;

$m_{\infty}$  – присоединенная масса струи в единицу времени, кг/с.

Тогда величину относительной присоединенной массы можно определить из (9) с учетом (8) для круглой струи

$$g = 1,93 \frac{w_{ex}}{w_{\max}} - 1 \cong 2 \frac{w_{ex}}{w_{\max}} - 1, \quad (10)$$

для плоской

$$g = 1,43 \frac{w_{ex}}{w_{\max}} - 1. \quad (11)$$

Для несжимаемых струйных течений ( $\rho \cong \text{const}$ ) из уравнений (2) и (7), используя уравнение массового расхода в виде  $m = \rho w F$ , где для круглых струй  $F \sim r^2$ , плоских –  $F \sim r$ , следует также, что

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = 2,738 \frac{r_{ex}}{R}, \quad (12)$$

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = \sqrt{3,1685678} \sqrt{\frac{r_{ex}}{R}} = 1,78 \sqrt{\frac{r_{ex}}{R}}. \quad (13)$$

Тогда из (10), (11) соответственно для круглой и плоской струи

$$g = \frac{1,93 \cdot R}{2,738 \cdot r_{ex}} - 1 \cong 0,705 \frac{R}{r_{ex}} - 1. \quad (14)$$

$$g = \frac{1,43}{1,78} \sqrt{\frac{R}{r_{ex}}} - 1 \cong 0,803 \sqrt{\frac{R}{r_{ex}}} - 1. \quad (15)$$

Следуя теории Прандтля о длине пути смешения, в которой предполагается, что изменение толщины слоя пропорционально расстоянию  $x$  от начала смешения (для точечного источника)  $R \sim Cx$ , где  $C$  – некоторая постоянная, отражающая угол наклона  $\alpha$  границы струи к оси (для круглых несжимаемых струй с естественной начальной турбулентностью  $C = tg \alpha = 0,22$  и  $\alpha \approx 12-13^\circ$ , точнее  $12,4^\circ$ ), получим

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = \frac{2,738}{Cx/r_{ex}} = \frac{2,738}{C\bar{x}} = \frac{1}{C' \cdot \bar{x}}, \quad C' = \frac{C}{2,738}, \quad (16)$$

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = \frac{\sqrt{3,169}}{\sqrt{C} \cdot \sqrt{x/r_{ex}}} = \frac{1,78}{\sqrt{C} \cdot \sqrt{\bar{x}}} = \frac{1}{\sqrt{C'} \sqrt{\bar{x}}}, \quad \sqrt{C'} = \frac{\sqrt{C}}{1,78}, \quad (17)$$

где  $\bar{x} = x/r_{ex}$  – расстояние от начала смешения в безразмерной форме (в калибрах характерного размера (радиуса и др.) выходного сечения сопла для расчетных или изобарического сечения для нерасчетных струй).

Более практична и точна формула для определения продольной составляющей средней скорости вдоль оси течения, полученная на основе точного решения уравнений пограничного слоя [11-13] для осесимметричного случая в форме [9, 10]:

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{1-x/L_C}\right) \quad (18)$$

или для дальнего поля струй

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = \frac{\alpha \bar{L}_C}{\bar{x}} = \frac{1,93}{1+g}. \quad (19)$$

$$\frac{w_{\max}}{w_{ex}} = \sqrt{\frac{\alpha \bar{L}_C}{\bar{x}}} = \frac{1,43}{1+g}. \quad (20)$$

Сопоставляя выражения (16) и (19) приходим к соотношению

$$C' = 1/(\alpha \bar{L}_C).$$

Для дозвуковых и околосзвуковых турбулентных струй с числом Маха  $M_{ex} < 1,15$  при естественной начальной турбулентности и больших числах Рейнольдса ( $Re \geq 10^5$ ) постоянную  $C'$  можно принять

$$C' = 1/(\alpha \bar{L}_C) = \frac{C}{2,738} = \frac{0,22}{2,738} = 0,08. \quad (21)$$

$$C' = 1/(\alpha \bar{L}_C) = \frac{C}{3,169} = \frac{0,22}{3,169} = 0,0694. \quad (22)$$

Тогда при известном из эксперимента значении длины начального участка (ядра)  $\bar{L}_C = L_C/r_{ex} \cong 8$ , коэффициент  $\alpha = 1,55$  или, наоборот, при известном из эксперимента коэффициенте  $\alpha = 1,55$  определяем длину потенциального ядра, например, для плоской струи

$$\bar{L}_C = \frac{L_C}{r_{ex}} = \frac{1}{\alpha \cdot C'} = \frac{1}{1,55 \cdot 0,0694} = 9,3.$$

Таким образом, использование длины ядра в качестве характерного линейного размера

при определении безразмерного расстояния от начала смешения (в виде  $x/L_C$ ) позволяет свести сжимаемые (сверхзвуковые) затопленные струйные течения к несжимаемым, что проиллюстрировано на рис. 3. В таком случае безразмерные скорости  $\bar{w} = w_{max}/w_{ex}$  в разных сечениях струи равны друг другу, когда равны безразмерные координаты  $\bar{x} = x/L_C$ , т.е. наблюдается подобие профилей безразмерных продольных составляющих скоростей вдоль оси несжимаемых и сжимаемых затопленных струй.

Для сверхзвуковых течений с числом Маха  $M_{ex} \geq 1,15$  при тех же начальных условиях истечения ( $Re \geq 10^5$ , коэффициент  $\alpha = 1,55$  и др.) длину ядра постоянной скорости в калибрах радиуса выходного сечения сопла для расчетных струй или изобарического сечения для нерасчетных, зависимой от числа Маха течения, можно определить из соотношения (более подробно в [4, 5])

$$\bar{L}_C = \frac{25\sqrt{M_{ex}^2 - 1}}{\alpha\lambda_{ex}}, \quad (23)$$

а постоянная

$$C' = 1/(\alpha\bar{L}_C) = \frac{C}{2,738} = \frac{\lambda_{ex}}{25\sqrt{M_{ex}^2 - 1}}, \quad (24)$$

где  $\lambda_{ex}$  – приведенная скорость истечения потока на выходе из сопла или, в случае нерасчетного истечения, в начальном изобарическом сечении.

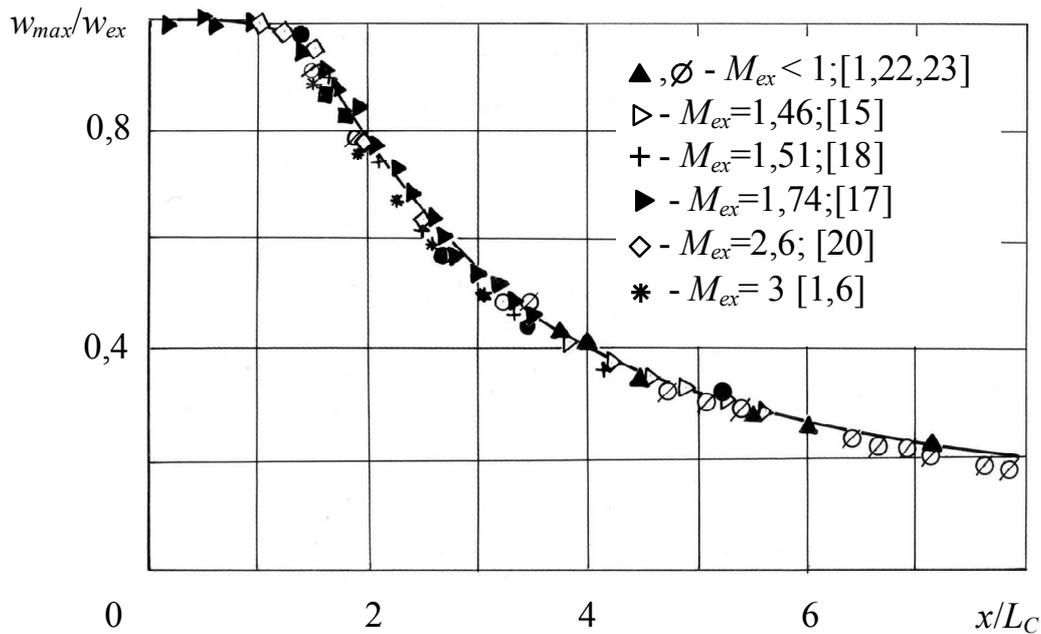


Рис. 3 – Продольный профиль относительной скорости

Тогда выражение (10,11) для определения относительной присоединенной массы для круглой и плоской струй соответственно можно представить в виде:

$$g \cong 2 \cdot C' \cdot \bar{x} - 1, \quad (25)$$

$$g \cong 1,43 \cdot \sqrt{C' \cdot \bar{x}} - 1 \quad (26)$$

или

$$g = \frac{1,93}{\alpha} \frac{\bar{x}}{\bar{L}_C} - 1 = 1,245 \frac{\bar{x}}{\bar{L}_C} - 1, \quad (27)$$

$$g = \frac{1,43}{\sqrt{\alpha}} \sqrt{\frac{\bar{x}}{\bar{L}_C}} - 1 = 1,149 \sqrt{\frac{\bar{x}}{\bar{L}_C}} - 1. \quad (28)$$

Для дальнего поля дозвуковой струи получим соответственно

$$g \cong 2 \cdot C' \cdot \bar{x} = 0,16\bar{x} . \quad (29)$$

и

$$g = 1,43\sqrt{C' \cdot \bar{x}} = 0,3767\sqrt{\bar{x}} . \quad (30)$$

Полученные соотношения практически совпадают с соотношениями [34], полученными с использованием теории размерностей.

На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные по (26) и (27) данные по изменению продольной составляющей средней скорости вдоль оси течения и относительной присоединенной массы затопленных дозвуковых и сверхзвуковых, в т. ч. нерасчетных, струй.

Некоторое несоответствие расчетных и экспериментальных данных по относительной присоединенной массе в дальнем поле сверхзвуковых нерасчетных течений (завышенные значения относительной присоединенной массы) указывает на некоторые погрешности измерений при использовании предлагаемой в [32] методики для определения присоединенной массы продольной составляющей скорости вдоль оси течения.

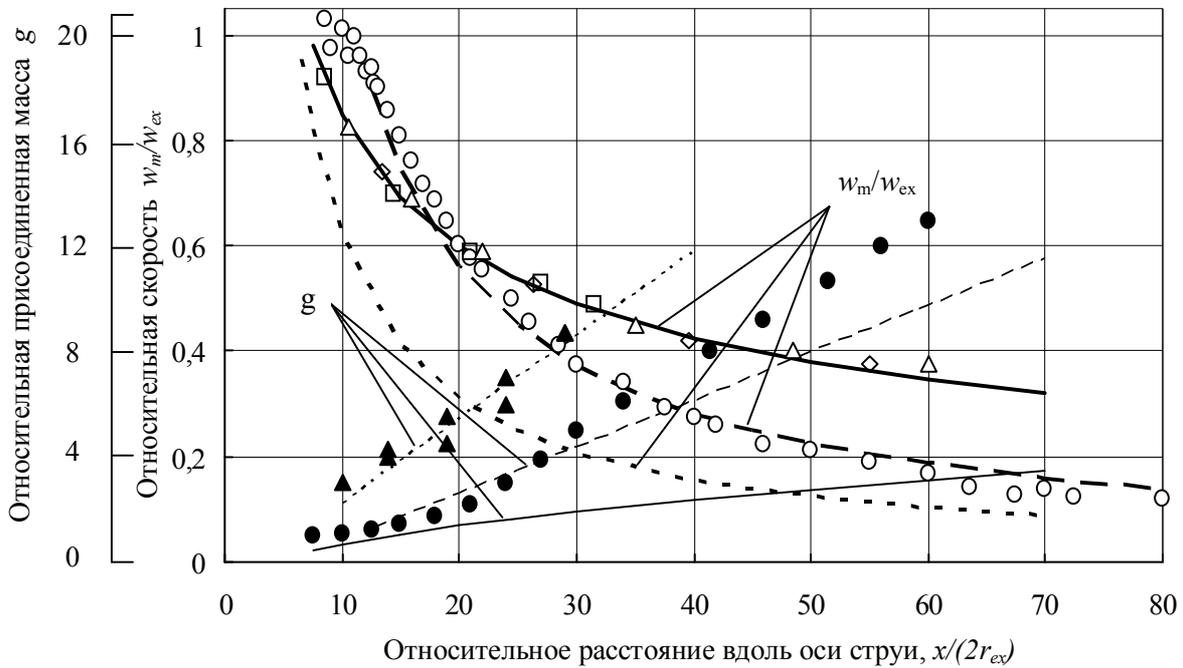


Рис. 4 – Изменение продольной составляющей средней скорости  $u_x/u_{ex}$  (светлые значки) и присоединенной массы  $g = m_x/m_{ex}$  (темные значки) вдоль оси струй, истекающих в затопленное пространство:  $\circ, \bullet$  – осесимметричная сверхзвуковая нерасчетная струя без эффекта АОС [31, 32] ( $M_a = 2,24; n = 0,6; M_{ex} = 1,635; \lambda_{ex} = 1,445; L_c/d_{ex} = 7,54$ );  $\square, \diamond, \triangle$  – плоская [24] и  $\blacktriangle$  – осесимметричная [30] дозвуковые не турбулизированные струи; —, — —, - - - - расчетные кривые по изменению относительной скорости  $u_x/u_{ex}$  и присоединенной массы  $g$  соответственно для плоской дозвуковой, осесимметричных сверхзвуковой и дозвуковой струй

Из анализа (рассмотрения) полученных результатов следует, что при истечении газа из щелевидных (или плоских) сопел с расходом эквивалентным расходу газа из осесимметричных сопел при остальных неизменных параметрах истечения, на относительных расстояниях от выходного сечения сопла больших, чем  $\frac{x}{b} \cong 2$ , присоединенная масса в сечениях струи ниже, чем в осесимметричных струях. Этот факт можно использовать на практике, если на тех же расстояниях от выходного сечения сопла необходимо по каким-то причинам получить меньшую эжекционную способность струи.

### Выводы

1. Результаты аналитического исследования распространения струй газа в затопленное пространство, истекающих из осесимметричных и пространственных отверстий и сопел, показали, что представленная одномерная модель может с успехом использоваться для расчета или оценки основных параметров потока вдоль оси и поперечных сечениях струйного течения.

2. Результаты можно использовать в качестве приложений в энергетике, металлургии и др. отраслях промышленности при разработке различных дутьевых и горелочных устройств.

3. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является дополнительный учет влияния конечной ширины щелевидного сопла на затухание скорости вдоль оси течения, влияние спутных и встречных потоков на затухание скорости с учетом особенностей внешней геометрии сопловых устройств, что позволит получить более полную картину распространения затопленных струй.

### Список использованных источников:

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1970. – 904 с.
3. Механика жидкости и газа / С.И. Аверин, А.Н. Минаев, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М. : Металлургия, 1987. – 304 с.
4. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V.28, № 1. – P. 35-40.
5. Капустин Е.А. Одномерная теория струй / Е.А. Капустин, Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2001. – Вип. 11. – С. 243-249.
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1 / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1991. – 600 с.
7. Абрамович Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1974. – 272 с.
8. Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М. : Наука, 1984. – 720 с.
9. Витце П.О. Падение скорости вдоль оси сжимаемой свободной струи / П.О. Витце // РТК. – 1974. – Т.12, № 4. – С. 3-5.
10. Witze P.O. A generalized theory for the turbulent mixing of axially symmetric compressible free jets / P.O. Witze // Fluid Mixing Joint Meet. Fluids Eng. Div. and Appl. Mech. Div., Atlanta, Ga, 1973. – N.Y., 1973. – P. 63-77.
11. Клайнштайн Г. Турбулентное перемешивание сжимаемых жидкостей при наличии пограничного слоя в осесимметричном случае / Г. Клайнштайн // РТК. – 1963. – Т.1, № 3. – С. 215-216.
12. Kleinstein G. An approximate solution for the axisymmetric jet of a laminar compressible fluid / G. Kleinstein // Quarterly of Applied Mathematics. – 1962. – V.20, № 1. – P. 49-54.
13. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // J. Spacecraft. – 1964. – V.1, № 4. – P. 403-408.
14. Lau J.C. Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter / J.C. Lau, P.J. Morris, M.J. Fisher // J. Fluid Mechanics. – 1979. – V.93, Pt.1. – P. 1-27.
15. Coherent large-scale structure in high Reynolds number supersonic jets / J. Lepicovsky, K.K. Ahuja, W.H. Brown, R.H. Burring // AIAA Journal. – 1987. – V.25, № 11. – P. 1419-1425.
16. Simonich J.C. Isolated and interacting round parallel heated jets / J.C. Simonich // AIAA Paper. – 1986. – № 281. – P. 11.
17. Broer L.J.F. Measurements on supersonic free jets / L.J.F. Broer, J.A. Rietdijk // Appl. Sci. Res., Sec.A. – 1960. – V.9, № 6. – P. 465-477.
18. Anderson A.R. Characteristics of free supersonic jets exhausting into quiescent air / A.R. Anderson, F.R. Johns // Jet Propulsion. – 1955. – V.25, № 1. – P. 13-15.
19. Glassman J. An unusual aerodynamic stagnation-temperature effect / J. Glassman, E.A. John // J. Aerospace Sci. – 1959. – V.26, № 6 – P. 387-389.
20. Pitkin E.T. Experimental mixing profiles of a Mach 2,6 free jet / E.T. Pitkin, J. Glassman // J. Aeronautical Sciences. – 1958. – V.24, № 12. – P. 41-43.
21. Lau J.C. Mach number and temperature effects on jets / J.C. Lau // AIAA Journal. – 1980. – V.18, № 6. – P. 609-610.

22. Голубев В.А. Исследование турбулентных затопленных струй газа различной плотности / В.А. Голубев, В.Ф. Климкин // ИФЖ. – 1978. – Т.34, № 3. – С. 493-499.
23. Голубев В.А. Расчет затопленных турбулентных струй газа различной плотности / В.А. Голубев // ИФЖ. – 1979. – Т.36, № 4. – С. 715-720.
24. Глазков В.В. О распространении турбулентных газовых струй в затопленном пространстве / В.В. Глазков, М.Д. Гусева, Б.А. Жестков // ИФЖ. – 1980. – Т.39, № 5. – С. 779-787.
25. Исследование турбулентной затопленной струи реального газа / Г.Н. Абрамович, В.И. Бакулев, И.С. Макаров, Б.Г. Худенко // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1966. – № 1. – С. 154-158.
26. Исследование структуры турбулентных струй и факела с помощью лазерного анемометра / Т.И. Ершова, О.А. Кузнецов, В.И. Кукес, Л.П. Ярин // Теория и практика сжигания газа. – Л. : Недра, 1975. – Т.6. – С. 72-78.
27. Кирильцев В.Т. О взаимосвязи осредненных динамических и геометрических характеристик турбулентного осесимметричного струйного течения в спутном потоке / В.Т. Кирильцев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1979. – № 1. – С. 135-139.
28. Ершин Ш.А. Исследование начального участка турбулентной струи сжимаемого газа / Ш.А. Ершин, З.Б. Сакипов // ЖТФ. – 1959. – Т.29, Вып. 1. – С. 51-60.
29. Lau J.C. Effects of exit Mach number and temperature on mean-flow and turbulence characteristics in round jets / J.C. Lau // J. Fluid Mechanics. – 1981. – V.105. – P. 193-218.
30. Голубев В.А. Расчет турбулентных струй газа / В.А. Голубев // ИФЖ. – 1982. – Т.42, № 3. – С. 395-402.
31. Капустин Е.А. Влияние формы торцевой поверхности сопла на параметры сверхзвуковых струй / Е.А. Капустин, И.А. Ленцов // Турбулентные струйные течения : Сб. науч. трудов. – Таллинн, 1985. – С. 197-201.
32. Капустин Е.А. Влияние внешней геометрии сопла на эжекционную способность сверхзвуковой струи / Е.А. Капустин, И.А. Ленцов, В.А. Серебряков // Турбулентные струйные течения: Сб. науч. трудов. – Таллинн, 1989. – С. 72-74.
33. Сивиркин В.Ф. Влияние сжимаемости на закономерности распространения турбулентных струй / В.Ф. Сивиркин // Изв. ВУЗов. Авиационная техника. – 1980. – № 3. – С. 90-95.
34. Ricou F.P. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets / F.P. Ricou, D.B. Spalding // J. Fluid Mechanics. – 1961. – V.11, № 1. – P. 21-32.

#### Bibliography:

1. Abramovitsh G.N. Applied gas dynamics / G.N. Abramovitsh. – M. : Nauka, 1969. – 824 p. (Rus.)
2. Loytsyanskii L.G. Mechanics of a fluid and gas / L.G. Loytsyanskii. – M. : Nauka, 1970. – 904 p. (Rus.)
3. Mechanics of a fluid and gas / S.I. Averin, A.N. Minayev, V.S. Shvidkii, Yu.G. Yaroshenko. – M. : Metallurgiya, 1987. – 304 p. (Rus.)
4. Lukhtura F.I. One-dimensional theory of off-design supersonic gas jets / F.I. Lukhtura // Fluid Dynamics, 1993. – V.28, № 1. – P. 35-40.
5. Kapustin E.A. One-dimensional theory of jets / E.A. Kapustin, F.I. Lukhtura // Reporter of the Priazovskyi state technical university. – 2001. – Issue 11. – P. 243-249. (Rus.)
6. Abramovitsh G.N. Applied gas dynamics. Part 1 / G.N. Abramovitsh. – M. : Nauka, 1991. – 600 p. (Rus.)
7. Abramovitsh G.N. Turbulent mixing of gas jets / G.N. Abramovitsh. – M. : Nauka, 1974. – 272 p. (Rus.)
8. Theory of turbulent jets / Eedited by G.N. Abramovitsha. – M. : Nauka, 1984. – 720 p. (Rus.)
9. Witze P.O. Centerline velocity decay of compressible free jets / P.O. Witze // AIAA Journal. – 1974. – V.12, № 4. – P. 417-418. (Rus.)
10. Witze P.O. A generalized theory for the turbulent mixing of axially symmetric compressible free jets / P.O. Witze // Fluid Mixing Joint Meet. Fluids Eng. Div. and Appl. Mech. Div., Atlanta, Ga, 1973. – N.Y., 1973. – P. 63-77.
11. Kleinstein G. On axially symmetric turbulent compressible mixing in the presence of initial boundary layer / G. Kleinstein // AIAA Journal. – 1963. – V.1, № 3. – P. 215-216. (Rus.)
12. Kleinstein G. An approximate solution for the axisymmetric jet of a laminar compressible fluid / G. Kleinstein // Quarterly of Applied Mathematics. – 1962. – V.20, № 1. – P. 49-54.

13. Kleinstein G. Mixing in turbulent axially symmetric free jets / G. Kleinstein // *J. Spacecraft.* – 1964. – V.1, № 4. – P. 403-408.
14. Lau J.C. Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter / J.C. Lau, P.J. Morris, M.J. Fisher // *J. Fluid Mechanics.* – 1979. – V.93, Pt.1. – P. 1-27.
15. Coherent large-scale structure in high Reynolds number supersonic jets / J. Lepicovsky, K.K. Ahuja, W.H. Brown, R.H. Burring // *AIAA Journal.* – 1987. – V.25, № 11. – P. 1419-1425.
16. Simonich J.C. Isolated and interacting round parallel heated jets / J.C. Simonich // *AIAA Paper.* – 1986. – № 281. – P. 11.
17. Broer L.J.F. Measurements on supersonic free jets / L.J.F. Broer, J.A. Rietdijk // *Appl. Sci. Res., Sec. A.* – 1960. – V.9, № 6. – P. 465-477.
18. Anderson A.R. Characteristics of free supersonic jets exhausting into quiescent air / A.R. Anderson, F.R. Johns // *Jet Propulsion.* – 1955. – V.25, № 1. – P. 13-15.
19. Glassman J. An unusual aerodynamic stagnation-temperature effect / J. Glassman, E.A. John // *J. Aerospace Sci.* – 1959. – V.26, № 6 – P. 387-389.
20. Pitkin E.T. Experimental mixing profiles of a Mach 2,6 free jet / E.T. Pitkin, J. Glassman // *J. Aeronautical Sciences.* – 1958. – V.24, № 12. – P. 41-43.
21. Lau J.C. Mach number and temperature effects on jets / J.C. Lau // *AIAA Journal.* – 1980. – V.18, № 6. – P. 609-610.
22. Golubev V.A. Exploration of the turbulent flooded jets of gas of various density // V.A. Golubev, V.F. Klimkin // *IFZh.* – 1978. – T.34, № 3. – P. 493-499. (Rus.)
23. Golubev V.A. Calculation of the flooded turbulent airs of gas of various density // V.A. Golubev // *IFZh.* – 1979. – T.36, № 4. – P. 715-720. (Rus.)
24. Glazkov V.V. About distribution of turbulent gas jets in flooded space / V.V. Glazkov, M.D. Guseva, B.A. Zhestkov // *IFZh.* – 1980. – T.39, № 5. – P. 779-787. (Rus.)
25. Exploration of the turbulent flooded jet of real gas / G.N. Abramovich, V.I. Bakulev, I.S. Makarov, B.G. Khudenko // *Izv. AN SSSR. MZhG.* – 1966. – №1. – P. 154-158. (Rus.)
26. Exploration of structure of turbulent airs and plume with the help of a laser anemometer / T.I. Yershova, O.A. Kuznetsov, V.I. Kukes, L.P. Yarin // *Teoriya i praktika szhiganiya gaza.* – L. : Nedra, 1975. – T.6. – P. 72-78. (Rus.)
27. Kiril tzev V.T. On interrelation of the mean dynamic and geometrical characteristics of a turbulent axisymmetrical jet flow in a cocurrent flow / V.T. Kiril tzev // *Izv. VUZov. Tshyornaya metallurgiya.* – 1979. – № 1. – P. 135-139. (Rus.)
28. Yershin Sh.A. Exploration of an initial segment of a turbulent air of a compressible gas / Sh.A. Yershin, Z.B. Sakipov. // *ZhTF.* – 1959. – V.29, Issue. 1. – P. 51-60. (Rus.)
29. Lau J.C. Effects of exit Mach number and temperature on mean-flow and turbulence characteristics in round jets / J.C. Lau // *J. Fluid Mechanics.* – 1981. – V.105. – P. 193-218.
30. Golubev V.A. Calculation of turbulent airs of gas // V.A. Golubev // *IFZh.* – 1982. – V.42, № 3. – P. 395-402. (Rus.)
31. Kapustin E.A. Influence of the form of an end surface of a nozzle on parameters supersonic jets / E.A. Kapustin, I.A. Lentsov // *Turbulentniye struiniye tetsheniya : Collection of scientific works.* – Tallinn, 1985. – P. 197-201. (Rus.)
32. Kapustin E.A. Influence of external geometry of a nozzle on ejection ability of a supersonic jet / E.A. Kapustin, I.A. Lentsov, V.A. Serebryakov // *Turbulentniye struiniye tetsheniya : Collection of scientific works.* – Tallinn, 1985. – P. 72-74. (Rus.)
33. Sivirkin V.F. Compressibility effect on legitimacy of distribution of turbulent airs / V.F. Sivirkin // *Izv. VUZov. Aviatzionnaya tekhnika.* – 1980. – № 3. – P. 90-95. (Rus.)
34. Ricou F.P. Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets / F.P. Ricou, D.B. Spalding // *J. Fluid Mechanics.* – 1961. – V.11, № 1. – P. 21-32.

Рецензент: В.А. Маслов  
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.05.2015