

11. Love E S., Gzigsby C.E., Lee L. P., Woodling M.J. *Experimental and theoretical studies of axisymmetric free jets*. NASA, Technical Report R-6, 1959.
12. Tabzi J. and Siestunck R. *Etude des divers regimes d'écoulement dans l'élargissement brusque d'une veine supersonique*. "Rev. Gen. Sci. Appl.", Brussels 114, 1955.
13. Tabzi J. and Paulon J. *Theory and experiments on supersonic air-to-air ejectors*. NASA TM 1410, 1958.
14. Чау, Э д и. Взаимодействие между основным и вторичным потоками сверхзвуковых эжекторных систем и их рабочие характеристики. "Ракетная техника и космонавтика", т.2, 1964, № 4.
15. В а с и л ь е в Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения. В сб. Лопаточные машины и струйные аппараты, вып.2, М., "Машиностроение", 1967.
16. С о р к и н Д.И., Б а й к о в В.С. Исследование течения в начальном участке звукового эжектора при короткой камере смешения. В сб. Лопаточные машины и струйные аппараты, вып.3. М., "Машиностроение", 1968.
17. Б а л а н и н Б.А. Сверхзвуковая струя в ступенчатом канале. Ученые записки ЛГУ № 338, вып. 43. "Газодинамика и теплообмен." ЛГУ, 1968.
18. П у з ы р е в В.М., Т а т и р о в Р.К. Расчет течения в эжекторных соплах. "Механика жидкости и газа", 1974, № 1.
19. С т е п а н о в Г.Ю., Г о г я ш Л.В. Квазидномерная газовая динамика сопел ракетных двигателей. М., "Машиностроение", 1973.

И.А.КОРОБКО

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВОЙ ПРИМЕСИ  
В СВОБОДНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТРУЯХ  
С РАЗЛИЧНОЙ НАЧАЛЬНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ СКОРОСТЕЙ ИСТЕЧЕНИЯ

Распределение концентраций газовой примеси (температуры) в струях характеризует процесс смесеобразования в диффузионных фа-

келах и позволяет установить стехиометрические поверхности, на которых смесь газового топлива с окислителем наиболее благоприятна для воспламенения.

Рассматриваемая задача описывается уравнением

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{D}{y} \frac{\partial c}{\partial y} + D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2},$$

где  $u$  и  $v$  - осредненные во времени продольная и радиальная составляющие вектора скорости;  $x$  - продольное расстояние от источника струи;  $y$  - расстояние от оси струи;  $D$  - коэффициент диффузии;  $c$  - концентрация примеси.

Вводя число Шмидта  $S_c = \frac{\nu}{D}$  ( $\nu$  - кинематическая турбулентная вязкость) и переменные  $x, \eta = \frac{y}{x \sqrt{\nu}}$ , приходим к уравнению

$$\frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} + (\eta x u S_c - x \frac{v}{\sqrt{\nu}} S_c + \frac{1}{\eta}) \frac{\partial c}{\partial \eta} = S_c x^2 u \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

Граничные условия для уравнения (1) имеют вид

$$\frac{\partial c}{\partial \eta} = 0 \quad \text{при} \quad \eta = 0, \quad c(\infty) = 0.$$

Распределение скоростей  $u(x, \eta)$  и  $v(x, \eta)$  получено асимптотическим методом [1] динамической неавтономной задачи о развитии осесимметричной незакрученной струи и считается заданным. Положим  $S_c = 0,7$  и составим алгоритм для численного решения уравнения (1) при условии

$$c(10) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial c}{\partial x} = \kappa(\eta) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

В последнем условии (2)  $\kappa$  - предполагается зависящим только от  $\eta$  ( $\kappa = \kappa(\eta)$ ). Заметим, что последнее условие (2) является строгим для основного участка осесимметричных турбулентных струй, что следует из аналитических решений распределения  $\frac{\partial c}{\partial x}$  и  $\frac{\partial u}{\partial x}$  на основном (автономном) участке [2].

Обозначим

$$P(x, \eta) = \eta^2 x u S_c - x \eta \frac{v}{\sqrt{\nu}} S_c + 1, \quad f(x, \eta) = S_c x^2 u \kappa(\eta) \frac{\partial u}{\partial x}, \quad c = y.$$

В результате получим

$$\eta y^2 - P(x, \eta) y' = f(x, \eta) \eta, \quad y'(0) = y(10) = 0. \quad (3)$$

Составим алгоритм решения задачи (3) по методу прогонки [3]. Предполагаем, что функции  $P(x, \eta)$  и  $f(x, \eta)$  определены на отрезке  $[a, b]$  ( $x = x_j, \eta \in [a, b] = [0, 10]$ ). Заменим уравнение (3) конечно - разностным, для этого разобьем отрезок  $[0, 10]$  на  $n$  равных частей с шагом

$h = \frac{10}{n}$ . Положим, что  $x = x_j = \text{const}$ ,  $\eta_i = \eta_0 + ih$ ,  $\eta_0 = 0$ ,  $\eta_n = 10$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) и обозначим  $P(x_j, \eta_i) = P_i$ ,  $f(x_j, \eta_i) = f_i$ ,  $y(\eta_i) = y_i$

для внутренних точек  $\eta = \eta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) отрезка  $[0, 10]$ ,  
Тогда уравнение (3) заменится конечно - разностным

$$\eta_i \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} + p_i \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} = f_i \eta_i,$$

которое запишем в виде

$$y_{i+1} + m_i y_i + n_i y_{i-1} = -\frac{1}{2} h^2 f_i m_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1), \quad (4)$$

где

$$m_i = \frac{4\eta_i}{2\eta_i + p_i h}; \quad n_i = \frac{2\eta_i - p_i h}{2\eta_i + p_i h}.$$

На концах отрезка  $\eta_0 = 0$  и  $\eta_n = 10$  берем односторонние производные

$$y'_0 = \frac{y_1 - y_0}{h}, \quad y'_n = \frac{y_{n-1} - y_n}{-h}.$$

Тогда, согласно граничным условиям (3), имеем

$$y_1 - y_0 = 0, \quad y_n = 0. \quad (5)$$

Линейная система (4), (5) состоит из  $(n+1)$  уравнений первой степени относительно  $y_0, y_1, \dots, y_n$ . Наиболее коротким путем решения полученной системы уравнений является метод прогонки [3].

Уравнение примет вид

$$y_i = c_i (d_i - y_{i+1}), \quad (6)$$

$$c_i = \frac{1}{m_i - n_i c_{i-1}}, \quad d_i = -\frac{1}{2} h^2 f_i m_i - n_i c_{i-1} d_{i-1}. \quad (7)$$

Для определения коэффициентов  $c_i$  и  $d_i$ , вначале находим  $y_1$  из (6) при  $i=1$  с учетом первого условия (5)

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{m_1 + n_1} \left( -\frac{f_1}{2} h^2 m_1 - y_2 \right). \quad (8)$$

С другой стороны, согласно (6)

$$y_1 = c_1 (d_1 - y_2). \quad (9)$$

В результате сравнения (8) и (9), определяем

$$c_1 = \frac{1}{m_1 + n_1}, \quad d_1 = -\frac{1}{2} h^2 f_1 m_1. \quad (10)$$

С учетом равенств (7) и (10) последовательно определяет коэффициенты  $c_i$  и  $d_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) (прямой ход). Обратный ход начинается с определения  $y_n$ . Согласно последнего условия (5) мулы (6), имеем

$$y_n = 0, \quad y_{n-1} = c_{n-1} (d_{n-1} - y_n).$$

Далее по формуле (6) последовательно находим

Подставляя в (10) значения  $y_{n-2}, y_{n-3}, \dots, y_0$  и  $n$  из (4) получим для  $c_i$  и  $d_i$ ,

$$c_i = 1, d_i = \frac{\eta_i h^2 f_i}{\eta_i - \frac{1}{2} \rho_i h}$$

Окончательно, для  $c_i$  и  $d_i$  из (7) имеем

$$c_i = \frac{\rho_i h + 2\eta_i}{(\rho_i h - 2\eta_i)c_{i-1} - 4\eta_i}, d_i = \frac{2\eta_i h^2 f_i + (\rho_i h - 2\eta_i)c_{i-1}d_{i-1}}{\rho_i h + 2\eta_i}$$

Численное решение задачи было выполнено на ЭМ М-220М для полей концентраций в осесимметричных струях с различной начальной неравномерностью скоростей истечения, характеристические постоянные которых  $\alpha, \beta, \sigma$  [1] представлены в табл. Эти постоянные были определены в результате сравнения результатов измерения продольной скорости на оси с решением [1]. Струи формировались при помощи форсунки ГРФ [4],

Т а б л и ц а  
Значение постоянных расчета

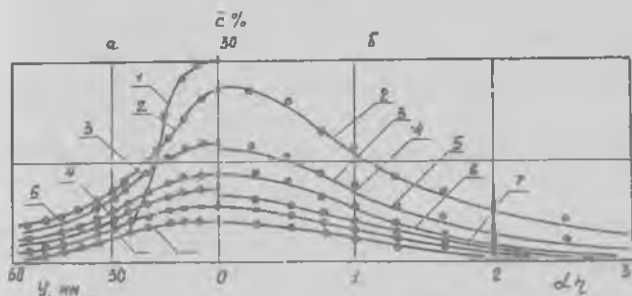
№ режимов	$\alpha^2$	$\beta$	$\sigma \cdot 10^4$	$K_0$
1	1.410	0.040	1.400	1.30
2.	1.584	0.262	-9.33	1.40
3	1.670	0.256	0.037	1.47
4	1.762	0.126	-22.7	1.32

а в трубопровод, питающий форсунку воздухом, добавлялся метан в количестве одного процента по отношению к расходу воздуха. Полученная газозоодушная струя развивалась в цилиндрической трубе ( $d_T = 600$  мм), которая была соединена с дымососом, причем соотношения расходов воздуха через форсунку и трубу для всех

исследованных режимов поддерживалось постоянным и составляло 1 : 10 (расход через форсунку для всех исследованных струй  $Q_0 = 24 \text{ м}^3/\text{час}$ ).

Измерения концентрации в струях проводились при помощи хроматографа "Цвет". Результаты численного расчета полей концентраций и измерений представлены на рис. 1 - 4. В качестве примера приведены режимы 1 и 4. На рис. 1, а и 2, а представлено распределение концентрации примеси метана в различных сечениях струй, полученное в результате измерений для режимов 1 и 4., где  $C\%$  - процентное содержание примеси по отношению к контрольной, за которую принята концентрация метана перед форсункой в подводящем трубопроводе, и которая контролировалась в течение опыта. Переменная  $\alpha \eta$ , отложенная на оси абсцисс, связана с физической переменной  $y$  по формуле

$$\alpha \eta = K_C \frac{y}{y_{0.5}}$$

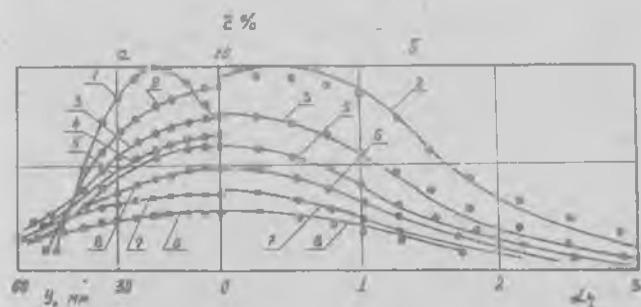


Р и с.1. Распределение концентрации газовой примеси в осесимметричной струе (режим I):

- численное решение; • - результаты эксперимента;

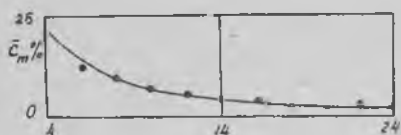
1-  $\frac{x}{d} = 2$ ; 2-  $\frac{x}{d} = 4$ ; 3-  $\frac{x}{d} = 6$ ; 4-  $\frac{x}{d} = 8$ ; 5-  $\frac{x}{d} = 10$ ;

6-  $\frac{x}{d} = 12$ ; 7-  $\frac{x}{d} = 16$



Р и с.2. Распределение концентрации газовой примеси в осесимметричной струе (режим 4); - численное решение; • - результаты эксперимента

где  $y_{0.5}$  - ордината, соответствующая значению половины максимального значения скорости в сечении;  $K_c$  - коэффициент поля концентраций, который для каждой из исследованных струй является величиной постоянной. Значения коэффициента  $K_c$  представлены в табл.



Р и с. 3. Изменение концентрации газовой примеси на оси струи (режим I):

— численное решение; • — результаты эксперимента



Р и с. 4. Изменение концентрации газовой примеси на оси струи (режим 4):

— численное решение; • — результаты эксперимента

### Л и т е р а т у р а

1. К о р о б к о В.И., Ф а л ь к о в и ч С.В. Развитие закрученной струи в безграничном пространстве. Изв. АН СССР, МЖТ, №3, 1969.
2. В у л и с Л.А., К а ш к а р о в В.П. Теория струй вязкой жидкости. М., "Наука", 1965.
3. Г о д у н о в С.К., Р я б е н ь к и й В.С. Разностные схемы. М., "Наука", 1973.
4. К о р о б к о Е.А. Газовая горелка с регулируемыми характеристиками факела. Информ. листок Саратовского ЦНТИ № 614-74, 1974. Также: Бюллетень технико-экономической информации. ГОСИНТИ, №3, 1975.

В.Ф.СИВИРКИН, Ф.И.КИТАЕВ, Ю.Г.ЛЕКАРЕВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ С ПРИМЕСЬЮ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Плазменные струи с примесью твердых частиц находят широкое применение в современных технологических процессах, в частности, в процессе плазменного напыления защитных покрытий, плазмохимических процессах и т.д. Распределение параметров в струях такого типа, как это показано в [1], отличается от чисто плазменных струй, однако закономерности распространения этих струй изучены недостаточно. Результаты экспериментального исследования изотермических газовых струй с примесью твердых частиц, обобщенные в работе [2], показали, что