

Определить характер этой зависимости можно экспериментально, исследуя влияние  $S$  и  $\epsilon_0$  на указанные составляющие;  $x_0$  в зависимости от  $S$  можно определить по выражению, приведенному в работе [2], а изменение полюсного расстояния в зависимости от  $\epsilon_0$  — по выражению из литературы [3].

На основании вышесказанного выявлена необходимость дополнительных исследований по определению влияния степени закрутки и начального уровня турбулентности на изменение профиля продольной составляющей абсолютной скорости, а также на связь между пульсационными продольной и поперечной ее составляющими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Турбулентное смещение газовых струй/Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.И. Секундов, И.П. СмирноватМ., 1974. — 272 с. 2. Сычев А.Т., Куновский В.И.— К вопросу о затухании скорости и температуры в слабонеизотермических закрученных струях. — Изв. АН БССР. Сер. физ.-энергет. наук, 1981, № 3, с. 44–48. 3. Куновский В.И., Буслаяев К.Э. Осесимметричная изотермическая газовая струя с повышенным начальным уровнем турбулентности. — В кн.: Техника, технология, организация и экономика строительства. Данный сб., с. 10–14. 4. Куновский В.И. Исследование закрученной вентиляционной струи: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — Минск, 1980. — 24 с.

УДК 697.957

В.И. КУНОВСКИЙ, канд.техн.наук,  
К.Э. БУСЛАЕВА (БПИ)

### ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗОВАЯ СТРУЯ С ПОВЫШЕННЫМ НАЧАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Применяемые аналитические зависимости [2] справедливы для расчета газовых осесимметричных струй с естественным начальным уровнем турбулентности ( $\epsilon_0 \leq 5\%$ ). Для интенсификации процессов тепло- и массообмена используются форсунки, горелки и воздухораспределители, формирующие осесимметричные газовые струи с повышенным начальным уровнем турбулентности ( $\epsilon_0 > 5\%$ ). Они обладают большей эжекционной способностью и меньшей дальностью по сравнению с естественным начальным уровнем турбулентности. Для правильного применения таких струй необходимо знание изменения аэродинамических параметров вдоль оси.

Рассмотрим возможность применения принципов термодинамики необратимых процессов для расчета осесимметричных газовых изотермических струй с повышенным начальным уровнем турбулентности. Для этого используем уравнение теории пограничного слоя и основное уравнение теории термодинамики необратимых процессов.

Рассмотрим, подобно данным [1], осесимметричную изотермическую газовую струю с повышенным начальным уровнем турбулентности, распростра-

няющуюся в неподвижном пространстве, как систему с двумя степенями свободы. Беря за основу рассуждение о том, что термодинамическая сила представляет сумму динамического и статического давлений [3], уравнение массопереноса в цилиндрических координатах  $(x, r, \varphi)$  для нашего случая можно записать следующим образом:

$$\rho v_x = K_{xx}^v \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} K_{xx}^P \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $v^2 = v_x^2 + v_r^2$  – квадрат средней абсолютной скорости и, соответственно, ее составляющие в направлениях  $x, r$ ;  $\rho$  – плотность газа в струе;  $P$  – статическое давление в ней, определяемое, согласно [2], как

$$P = -\rho \overline{v_r'^2}, \quad (2)$$

$v_r'$  – пульсационная составляющая поперечной скорости.

Для оси струи уравнение (1) примет вид

$$\rho v_{xm} = K_{xx}^{v_{xm}} \frac{dv_{xm}^2}{dx} + K_{xx}^{P_{xm}} \frac{1}{\rho} \frac{dP_m}{dx}, \quad (3)$$

где  $K_{xx}^{v_{xm}}$  – основной коэффициент массопереноса, который характеризует перемещение массы вдоль оси струи  $x$  от действия максимальной продольной составляющей скорости в том же направлении. Условия размерности позволяют записать следующее:  $K_{xx}^{v_{xm}} = M_{xx}^{v_{xm}} \rho x \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}} / v_{xm}$ ;

$\frac{P_m}{K_{xx}^P}$  – основной коэффициент массопереноса, характеризующий перемещение массы в направлении  $r$  от действия градиента статического давления в том же направлении,

$$K_{xx}^{P_{xm}} = M_{xx}^{P_{xm}} \rho x \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}} / v_{xm},$$

где  $M_{xx}^{v_{xm}}$ ;  $M_{xx}^{P_{xm}}$  – безразмерные коэффициенты массопереноса, не зависящие от  $x$ ;  $v_{xm}$  – максимальная продольная составляющая абсолютной скорости в поперечном сечении струи;  $\alpha_{0,5v_{xm}}$  – угол, на котором продольная составляющая абсолютной скорости равна половине максимальной продольной составляющей абсолютной скорости;  $P_m$  – статическое давление на оси струи.

С учетом вышесказанного выражение (3) примет вид

$$v_{xm} = M_{xx}^{v_{xm}} \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}} \frac{x}{v_{xm}} \frac{dv_{xm}^2}{dx} + M_{xx}^{P_{xm}} \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}} \frac{x}{v_{xm}} \frac{1}{\rho} \frac{dP_m}{dx}.$$

Введем эмпирическую постоянную  $\varphi_1 = M_{xx}^{v_{xm}} \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}}$ , не зависящую от  $x$ . Тогда

$$v_{xm} = \varphi_1 \frac{x}{v_{xm}} \frac{dv_{xm}^2}{dx} + M_{xx}^P \operatorname{tg} \alpha_{0,5v_{xm}} \frac{1}{\rho} \frac{dP_m}{dx} \frac{x}{v_{xm}}. \quad (4)$$

Значение постоянной  $\varphi_1$  можно найти, применив принцип термодинамики необратимых процессов и отбросив одну из степеней свободы. Это становится возможным при рассмотрении осесимметричной изотермической газовой струи с естественным начальным уровнем турбулентности; статическое давление в струе можно считать равным давлению в окружающем пространстве. Тогда  $dP_m/dx = 0$ , и, согласно литературным данным [3],  $\varphi_1 = -0,5$ .

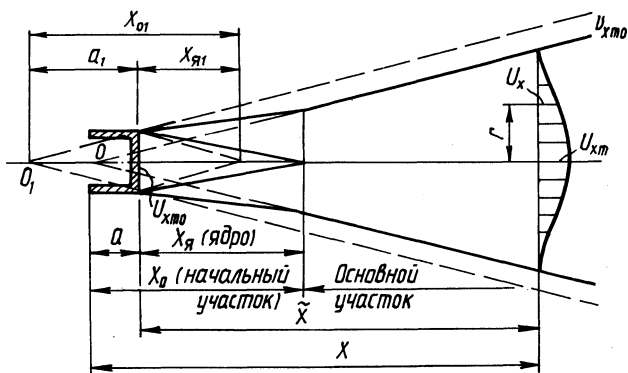


Рис. 1. Схема изотермической осесимметричной газовой струи с повышенным начальным уровнем турбулентности.

Схему струи представим следующим образом (рис. 1). Основной участок — часть струи, имеющая полностью развитую область течения, аффинность скоростных полей ( $v_x/v_{xm} = f(\eta)$ ), максимальную продольную составляющую скорости  $v_{xm}$  на оси струи; начальный участок — расстояние длиной  $x_0$  от полюса до основного участка; полюсное расстояние  $a$  — часть начального участка от места пересечения предполагаемых границ струи до выходного сечения сопла. Начало координат расположим в полюсе струи. Угол раскрытия струи при любых конструкциях насадков не зависит от начального уровня турбулентности  $\epsilon_0$  [2], [4]. Полюс нетурбулизованной струи из точки  $O$  перемещается вдоль оси относительно среза сопла в точку  $O_1$  (пересечение границ турбулизованной струи); величина начального участка  $x_0 = a + x_я$  вследствие неизменности угла раскрытия струи постоянна,  $x_0 = 4,75d_0$  ( $d_0$  — диаметр сопла);  $x_я$  — длина ядра струи, скорость в котором равна скорости газа на выходе из сопла. Для струи с повышенным начальным

уровнем турбулентности длина начального участка остается постоянной:  $x_0 = x_{01}$ ; изменяются полюсное расстояние  $a_1$  и длина ядра  $x_{я1}$ . Здесь  $\eta = r/x$ . Для замыкания уравнения (4) относительно  $v_{xm}$  воспользуемся "новой" теорией турбулентности Прандтля [2], согласно которой турбулентное напряжение связано с продольной составляющей абсолютной скорости  $v_x(r)$  следующим соотношением:  $\overline{\rho v'_x v'_r} = \rho K dv_x/dr$ .

Л. Прандтль предложил считать коэффициент турбулентной вязкости  $K = \kappa B$ , где  $\kappa$  — постоянная;  $B$  — ширина раскрытия струи,  $B = x \operatorname{tg} \alpha_{0,5 v_{xm}}$ .

Тогда  $K = \kappa x \operatorname{tg} \alpha_{0,5 v_{xm}}$ .

Известно [2], что продольная пульсационная составляющая абсолютной скорости  $v'_x$  больше поперечной пульсационной составляющей  $v'_r$ . Связь между ними можно представить в виде  $\overline{v'_x v'_r} = A \overline{v'^2_r}$ , где  $A$  — коэффициент пропорциональности.

$$\text{Тогда } \overline{v'^2_r} = \frac{\kappa}{A} v_{xm} x \operatorname{tg} \alpha_{0,5 v_{xm}} \frac{dv_x}{dr};$$

$$P_m = -\rho \frac{\kappa}{A} v_{xm}^2 \operatorname{tg} \alpha_{0,5 v_{xm}} \frac{df(\eta)}{d\eta}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) и обозначив  $\varphi_3 = M_{xx}^m \operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5 v_{xm}} \kappa / A df(\eta) / d\eta$ , получим

$$dv_{xm}^2 / dx = \frac{v_{xm}^2}{-x(0,5 + \varphi_3)}. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) от  $x_0$  до  $x$ , получим

$$v_{xm} = v_{xm0} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{-\frac{1}{2(0,5 + \varphi_3)}}. \quad (7)$$

Для практических расчетов необходимо определить длину полюсного расстояния в зависимости от  $\epsilon_0$  и диаметра сопла  $d_0$ . Согласно [4],  $a$  изменяется по экспоненциальному закону:

$$a = d_0 \exp(10,7 \epsilon_0 - 0,7). \quad (8)$$

Изменение  $\varphi_3$  от  $\epsilon_0$  определялось в результате сравнения расчетных данных по выражению (7) с экспериментальными [2]. Наилучшее совпадение (рис. 2) наблюдается, если  $\varphi_3$  описать эмпирическим выражением следующего вида:

$$\varphi_3 = 0,8 \epsilon_0^{-1}, \quad (9)$$

справедливым при  $3\% < \epsilon_0 \leq 21\%$ .

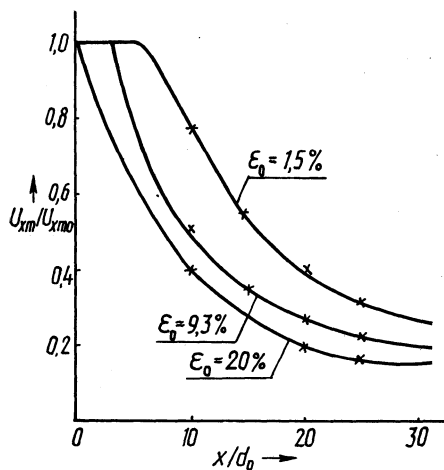


Рис. 2. Изменение относительной максимальной продольной составляющей скорости вдоль оси изотермической газовой осесимметричной струи в зависимости от начального уровня турбулентности  $\epsilon_0$ :

x — экспериментальные данные [2]; — — по выражению (10) с учетом (8).

С учетом (9) выражение (7) примет вид

$$v_{xm} = v_{xm} \left( 4,75 \frac{d_0}{x+a} \right)^{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_0+1,6}} \quad (10)$$

где x — расстояние от среза сопла.

Выражение (10), полученное на основании использования принципов термодинамики необратимых процессов и "новой" теории турбулентности Прандтля, описывает изменение максимальной продольной составляющей абсолютной скорости вдоль оси осесимметричной изотермической газовой струи с повышенным начальным уровнем турбулентности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А.Т. Исследование изотермических струй несжимаемого газа с помощью теории термодинамики необратимых процессов. — Изв. АН БССР. Сер. физ.-энергет. наук, 1978, № 3, с. 63–67.
2. Турбулентное смешение газовых струй/Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, В.И. Секундов, И.П. Смирнова. — М., 1974. — 272 с.
3. Сычев А.Т., Куновский В.И. К вопросу о затухании скорости и температуры в слабонеизотермических закрученных струях. — Известия АН БССР. Серия физ.-энергет. наук, 1981, № 3, с. 44–48.
4. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Энергетические спектры и масштабы турбулентности турбулизированной осесимметричной струи. — В кн.: Струйные течения жидкостей и газов. Новополоцк, 1982, с. 25–32.

УДК 662.99

В.Н. РУБАНИК  
(Белпромпроект)

#### ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ ПРОМЫШЛЕННО-СЕЛИТЕБНЫХ УЗЛОВ

В настоящее время в БССР получило широкое распространение групповое размещение предприятий в составе промышленно-селитебных узлов.

При таком размещении промышленных объектов обеспечивается значительный экономический эффект за счет блокировки зданий, создания единых общеузловых сетей, энергетических объектов и т.д. Одним из существенных