



УДК 533.6.011

DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.24

О.А. БАЛАНДИНА

СМЕШЕНИЕ СТРУИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА СО СНОСЯЩИМ ДОЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

THE MIXING OF A JET OF CARBON DIOXIDE FROM SMASHING SUBSONIC FLOW

Представлены результаты численного расчета взаимодействия струи углекислого газа со сносящим дозвуковым потоком воздуха. Определены и проанализированы значения давления, траекторий струи, профилей скорости при малых интенсивностях вдува. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными других авторов. Получены графики распределения температуры для сносящего потока воздуха и струи, вдуваемой из щелевидного отверстия с соотношениями сторон 1:2; 1:3; 1:4. Анализ результатов показал, что геометрические параметры отверстия вдува струи несут существенное влияние на распределение температуры в области за струей. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании струйных органов газовых горелок котельных агрегатов. Планируется проведение дальнейшего моделирования для усовершенствования процессов образования газозвуковой смеси в газовых горелках струйного типа.

Ключевые слова: траектория струи, пластина, численный расчет, моделирование, струйное течение

Исследование свойств газовых струй, вводимых в сносящий поток, вызывает затруднения в связи с нестационарностью пограничного слоя струи. Однако, так как поперечный вдув используется в ряде технических устройств: камерах сгорания газотурбинных двигателей, газовых горелках струйного типа, вентиляционных воздушных завесах и т.д., подобные исследования представляют практический интерес [1–3].

Моделирование струйного течения является достаточно актуальным, особенно в части применения к газовым горелкам струйного типа. Известно, что интенсивность смешения газовой струи со сносящим

Presents the results of a numerical calculation of the interaction of the jet of carbon dioxide from smashing subsonic air flow. Were identified and analyzed pressure values, the trajectories of the jet, the velocity profiles at small blowing intensities. The comparison of calculation results with experimental data of other authors. The obtained curves of the temperature distribution for carrying air flow and the jet issued from a slit-like holes with aspect ratios 1:2; 1:3; 1:4. Analysis of the results showed that the geometrical parameters of the jet blowing holes does not significantly affect the temperature distribution in the region behind the jet. The research results can be used in the design of the jet bodies of the gas burners of boilers. Will conduct further modeling to enhance the process of formation of the gas-air mixture in the gas jet type burners.

Key words: trajectory of the jet, plate, numerical calculations, simulation of jet flows, numerical investigation of flow

потоком зависит от степени турбулентности, формы и угла струи, а также от отношения скоростных напоров струи и сносящего потока.

Истечение струи углекислого газа из круглого отверстия рассматривал Y.Kamotani [4] и другие исследователи [5]. Экспериментальные исследования Н.М. Рогачева [5] проводились при относительном соотношении скоростей воздушного потока и струи круглого и овального профиля углекислого газа в пределах от 0,5 до 2. Гидравлический параметр

$$\bar{q} = \frac{\rho_0 \cdot v_0^2}{\rho_{\infty} \cdot v_{\infty}^2}$$
 задавался в диапазоне 0,38÷6,06.

Результаты исследования свидетельствуют об увеличении дальности струи газа в сносящем потоке воздуха при возрастании ее относительной скорости, а также о влиянии турбулизирующих решеток на характер распространения и форму вдуваемых струй. Также Н.М. Рогачев показал, что возрастание относительной скорости струи от 0,5 до 2,0 м/с приводит к увеличению ее ширины. С увеличением интенсивности турбулентности сносящего потока на входе вдуваемая струя размывается, но при этом данный процесс не приводит к изменению границ зоны смешения.

Численные исследования течения проводились Ю.П. Коробковой и В.О. Москаленко [1] при различных углах наклона вдува из круглого отверстия струи в дозвуковом потоке воздуха над пластиной. Исследование проводилось при значениях гидродинамического параметра $\bar{q} = 1$ и углах вдува струи $\omega_e = 65,90,135^\circ$ с использованием k -epsilon модели турбулентности. Исследования свидетельствуют о том, что угол наклона вдува струи оказывает существенное влияние на перераспределение скорости и давления в областях за струей и перед ней. Была выявлена обратная зависимость высоты траектории струи и угла ее вдува.

В данной работе проводилось численное моделирование течения при разных геометрических формах отверстия вдува струи под углом 90° к пластине, обтекаемой дозвуковым потоком. Были построены графики распределения температуры в струях. Для верификации разрабатываемой численной модели было заимствовано экспериментальное исследование пространственного течения при струйном взаимодействии в дозвуковом потоке несжимаемого газа Y. Kamotani [4], но с отличием геометрических форм отверстия вдуваемой струи.

Для моделирования стационарного дозвукового течения вдуваемой струи был использован программный продукт САПР Code_Saturne. Это приложение используется для расчета динамики сплошных сред.

В результате расчета строились графики полей температур потока в области взаимодействия в плоскости XOY.

Численная модель представляет собой совокупность методов и условий решения уравнений Навье-Стокса. Для рассматриваемой задачи система уравнений имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{U}) &= 0, \\ \rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial \tau} + \rho \vec{U} \cdot \operatorname{grad} \vec{U} &= -\operatorname{grad} p + \mu \cdot \operatorname{grad} \vec{U} + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \cdot \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{U} + \vec{q}, \\ \rho \left(\frac{\partial E}{\partial \tau} + \vec{U} \cdot \operatorname{grad} E \right) &= \operatorname{div}(\rho \vec{q} + \lambda \operatorname{grad} T) - p \cdot \operatorname{div} \vec{U} + \operatorname{grad} \vec{U} : \sigma + \rho \vec{q} \cdot \vec{U}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Система состоит из уравнения неразрывности, уравнения сохранения импульса и уравнения энергии. Все уравнения упрощены из условия несжимаемости рабочей среды [6].

Расчетная область была ограничена объемом аэродинамической трубы и задана в виде параллелепипеда $300 \times 300 \times 250$ мм, в основании которого была задана точка ввода струи. Струя подавалась через условное круглое отверстие диаметром 3,25 мм на расстоянии от входного сечения трубы $x=50$ мм. Вдув поперечной струи в экспериментальном исследовании осуществлялся на приподнятой пластине для исключения влияния пограничного слоя. Диапазон чисел Рейнольдса при исследовании составил $Re=2800 - 4200$.

Была использована ортогональная расчетная сетка с размерами ячейки $3 \times 3 \times 3$ мм. Поскольку решаемая задача не учитывает поверхностный теплообмен и влияние пограничного слоя не существенно, измельчение расчетной сетки вблизи стенок не проводилось. Более того, методика проведения экспериментального исследования предполагала отсутствие пристеночного вязкого слоя. Проводилось измельчение расчетной сетки в области вдуваемой струи вдоль оси распространения струи x по линиям измельчения, удаленным от отверстия вдува струи на расстояния, эквивалентные $0,5R$; R ; $1,5R$; $2R$, в обе стороны от оси x .

В качестве рабочей среды использовался воздух с термодинамическими параметрами, которые были заданы как функция от температуры. Начальная температура в расчетной области составляла 20°C . Сносящий поток задавался с помощью граничного условия первого рода, скорость потока $v=1,84$ м/с, температура потока $t=20^\circ\text{C}$. В соответствии с условиями проведения эксперимента (наличие приподнятой пластины) начальный участок аэродинамической трубы не моделировался и профиль скорости на входе не задавался. Вдуваемый поток углекислого газа задавался аналогично, скорость потока $v=14,2$ м/с, температура потока $t=95^\circ\text{C}$. На входе было задано равномерное распределение давления. Основание расчетной области было задано в виде гладкой стенки с условием прилипания. Остальные стенки были заданы с условием движения в направлении потока и со скоростью сносящего потока. Это позволило сократить габариты расчетной области в направлении осей z и y .

В расчете была использована адаптивная вихревая модель (Classical) в нестационарной постановке. Коэффициент Смагоринского был принят в соответствии с условиями течения в свободном потоке $Cs=0,42$. Градиенты рассчитывались итерационным методом с учетом неортогональности потоков. Сопряжение скорости и давления проводилось по полуневяжному алгоритму SIMPLEC. Релаксация не задавалась. Скорость и температура рассчитывались по алгоритму Jacobi. Градиент давления рассчитывался сеточным методом с степенью укрупнения $k=3$.

Для указанных алгоритмов решения были введены ограничения максимального количества субитераций $Ns=10000$, предельная точность $\epsilon = 10^{-5}$.

Для расчета скорости и температуры использовалась схема второго порядка SOLU. Для стабилизации решения уравнения энергии были введены ограничения температуры в расчетной области в диапазоне $t=20\div 95$ °С. При расчете использовался фиксированный временной шаг $\Delta t=0,001$ с, который определялся из условия обеспечения предельного числа Куранта $Cr \leq 1$ для области дувяемого потока воздуха. Общее количество итераций ($N=2000$) было определено на основании оценки скорости стабилизации течения. Периодичность вывода результатов составила 20 шагов.

Оценка адекватности разработанной численной модели проводилась на основании результатов расчета с заимствованными экспериментальными данными. Сопоставление осуществлялось по профилям максимальной температуры и скорости дувяемой струи. Количественная оценка проводилась в соответствии с методикой проведения экспериментального исследования: по максимальной температуре и скорости в поперечном сечении струи.

На рис. 1 показаны результаты численного моделирования поперечного дувя нагретой струи в холодный поток воздуха. Расхождение с экспериментальными данными У. Камотани [4] составило менее 5%. Наибольшее расхождение приходится на область диффузии струи. Анализ показал хорошую работоспособность адаптивной вихревой модели Classical, выбранной рабочей сетки и границ расчетной области, которые и были заложены в основание дальнейшего численного моделирования течения при различных геометрических формах условного отверстия дувя поперечной струи.

Численные результаты, получаемые в данной постановке, сравнивались с экспериментальными

данными [4]. На рис. 1 приведено распределение по оси симметрии относительных перепадов температуры по струе, распространяющейся за отверстием дувя (сплошная кривая – расчет; точками нанесены экспериментальные данные). Полученная верификация показала хорошую сходимость результатов.

В проведенном моделировании дувя струи производился не в круглое, а в щелевое отверстие с соотношением сторон 1:2; 1:3 и 1:4. Было принято решение исследовать щелевидное отверстие, так как подобные отверстия используются во многих конструкциях газовых горелок. Были получены распределения температуры для четырех рассматриваемых вариантов. На рис. 2 представлены графики распределения температуры для щелевого отверстия.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что геометрические параметры отверстия дувя струи несущественно влияют на распределение температуры в области за струей. Показано, что данная методика численного расчета характеристик струйного взаимодействия позволяет производить исследования для широкого круга изменяющихся геометрических параметров отверстия дувя струи на основе $k-\epsilon$ модели турбулентности.

Результаты моделирования показали хорошую сходимость с экспериментальными данными [4]. Отличия от работ исследователей [1,4,5,7] заключались в рассмотрении взаимодействия струи газа, дувяемой не только из круглого, но и из щелевидного профиля в сносящий воздушный поток. В дальнейшем в модель будут внесены изменения, касающиеся изменения угла наклона струи относительно пластины для изучения глубины проникновения дувяемой струи газа в сносящий поток. Результаты данных исследований могут быть использованы при проекти-

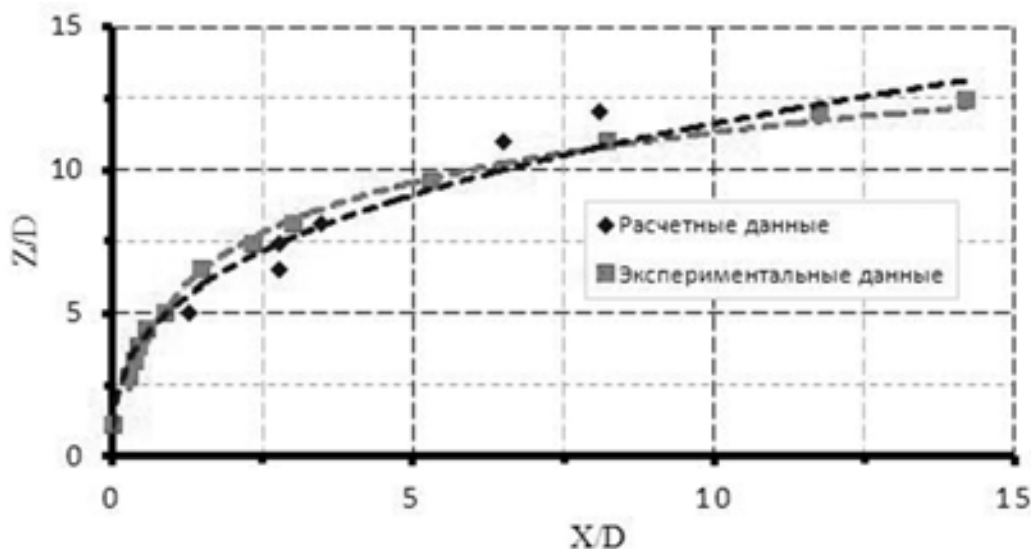


Рис. 1. График распределения температуры в плоскости XOZ при истечении струи из круглого отверстия

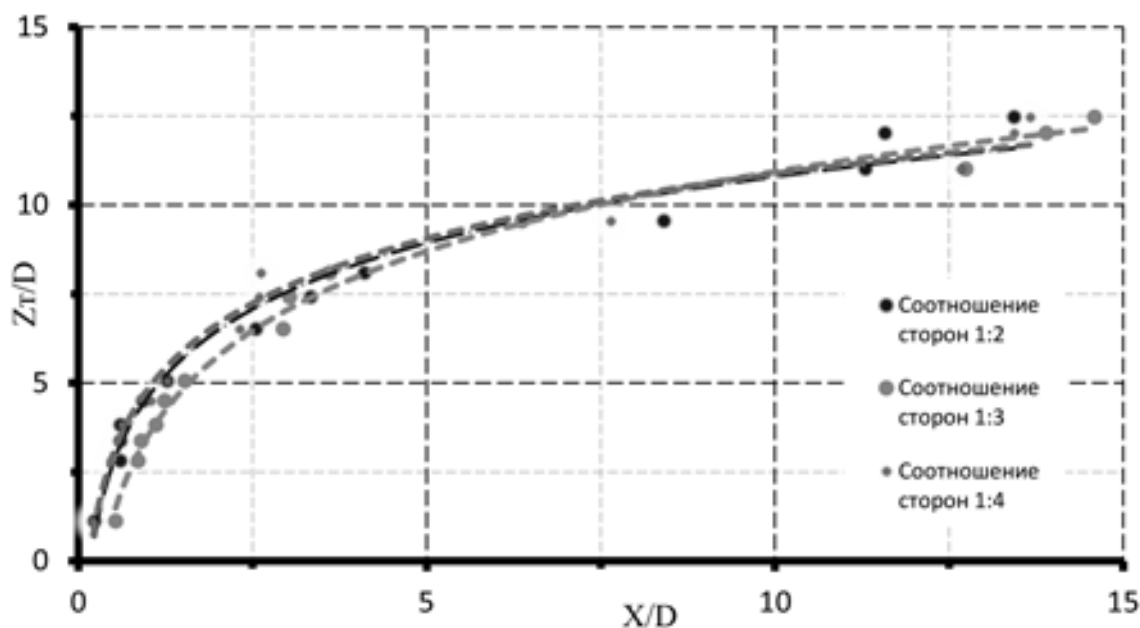


Рис. 2. График распределения температуры в плоскости XOZ при истечении струи из щелевого отверстия с различным соотношением сторон

ровании струйных органов газовых горелок котельных агрегатов для усовершенствования процессов образования газозвуковой смеси в них.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коробкова Ю.П., Москаленко В.О. Моделирование струйного взаимодействия круглой струи с дозвуковым сносящим потоком // *Аэрокосмический научный журнал*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 03. С. 53–63.

2. Москаленко В.О., Красников И.Ю. Численный расчет взаимодействия плоской струи с о/сносящим дозвуковым потоком // *Аэрокосмический научный журнал*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 02. С. 30–40.

3. Зеленцов Д.В., Тутицына О.В., Чертес К.Л., Пыстин В.Н. Обработка осадков нефтесодержащих сточных вод с применением принудительной высоконапорной аэрации // *Градостроительство и архитектура*. 2012. № 3 (7). С. 72–74. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.03.16.

4. Yasuhiro Kamotani, Isaac Greberf. Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow // *Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio*. 2013. №11. С. 1425-1429. DOI: 10.2514/3.50386.

5. Рогачев Н.М. Смещение струи углекислого газа со сносящим потоком воздуха // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. Самара: СГАУ, 2006. №1 (9). С. 194–199.

6. Рогачев Н.М. Определение положений боковых границ струи углекислого газа, вдуваемой в поперечный поток воздуха // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. Самара: СГАУ, 2007. №1 (12). С. 207–210.

Об авторе:

БАЛАНДИНА Ольга Александровна
аспирант кафедры теплогасоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, тел. +7 (927)012-65-70
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

BALANDINA Olga A.

Postgraduate Student of the Department of heat and gas supply and ventilation
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
tel. +7 (927)012-65-70
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

Для цитирования: Баландина О.А. Смещение струи углекислого газа со сносящим дозвуковым потоком воздуха // *Градостроительство и архитектура*. 2018. Т.8, №2. С. 142-145. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.24.

For citation: Balandina O.A. The mixing of a jet of carbon dioxide from smashing subsonic flow // *Urban Construction and Architecture*. 2018. V.8, 2. Pp. 142-145. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.24.