УДК 621.384.3

М. С. Вологдина, ст. преподаватель
В. А. Тененёв, доктор физико-математических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ИКНГ ОТ ГЕОМЕТРИИ ЕГО УСТРОЙСТВА И ВХОДНЫХ УСЛОВИЙ

Приводится постановка задачи и методика расчетов процессов, протекающих в горелочном устройстве ИКНГ. Исследуется зависимость распределения основных параметров течения газов от геометрических особенностей горелочного устройства и от расхода горючего.

Системы инфракрасного лучистого отопления позволяют создавать комфортные тепловые условия на рабочих местах при существенной экономии расхода энергоносителей. Они представляют собой установки, в состав которых входят излучающие трубы (излучатель), отражатель, блок горелок или раздельные горелки, система дымоудаления и блок автоматики (дистанционное управление). В качестве горючего применяется природный газ или пропан-бутановая смесь. Окислителем служит окружающий воздух. Высокотемпературные продукты сгорания проходят по излучателю, отдавая тепло стенкам трубы. Наружная поверхность трубы охлаждается за счет теплового излучения и свободной конвекции. Для направления теплового потока с излучателя на заданную зону используется отражатель.

В рамках данной статьи рассматривается конструкция горелочного устройства инфракрасного нагревателя и исследуется влияние геометрии и входных условий на распределение поля температур и скоростей.

При построении математической модели принимаются следующие допущения [1].

Процесс считается стационарным, так как период прогрева и выхода на режим нагревателя мал по сравнению с основным периодом его работы.

Модель горения рассматривается в рамках простой химически реагирующей системы (ПХРС) [2].

Число Маха рассматриваемого течения $M < 0{,}1$, поэтому допустимо полную энергию газа определять только температурой, а плотность – уравнением состояния идеального газа.

Отсутствие объемных сил.

Динамическая вязкость зависит только от температуры.

Коэффициент теплопроводности газа пропорционален динамическому коэффициенту вязкости, так что число Прандтля, определяемое формулой $\mathrm{Pr} = \mu c_p / \lambda$, рассматривается как физическая постоянная газа.

Строение горелочного блока схематично показано на рис. 1. На входе через отверстие D_g подается горючее, на остальной области – окислитель.

Горючий газ поступает через отверстие D_g. Для подачи воздуха в горелочное устройство на конце трубы создается разрежение. Отверстия D_1, D_2 заменяются круговыми прорезями с такими же значениями площадей проходных сечений.

© Вологдина М. С., Тененёв В. А., 2009

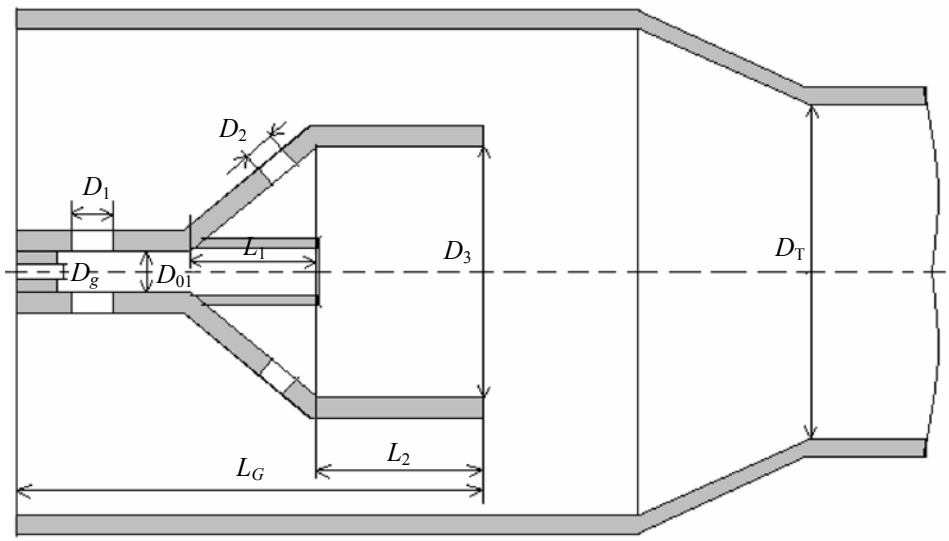


Рис. 1. Схема газогорелочного блока

Процессы, протекающие внутри горелочного устройства инфракрасного нагревателя, описываются с учетом принятых допущений системой стационарных дифференциальных уравнений Навье – Стокса в осесимметричной постановке:

$$\mathbf{F}_x + \mathbf{G}_r = \mathbf{P} + \mathbf{R}_x + \mathbf{H}_r + \mathbf{S}; \tag{1}$$

$$\mathbf{F} = ru\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\end{bmatrix};\quad \mathbf{G} = rv\begin{bmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\end{bmatrix};\quad \mathbf{P} = -r\begin{bmatrix}0\\ p_x\\ p_r\end{bmatrix};\quad \mathbf{R} = r\mu\begin{bmatrix}0\\ u_x\\ v_x\end{bmatrix};\quad \mathbf{H} = r\mu\begin{bmatrix}0\\ u_r\\ v_r\end{bmatrix};$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}\left(r\mu\ \ u_x\right)_x + \left(r\mu\ \ v_x\right)_r - \frac{2}{3}\left(r\mu\ \ v_r\right)_x - \frac{2}{3}\left(\mu\ \ v\right)_x \\ \frac{1}{3}\left(r\mu\ \ v_r\right)_r + \left(r\mu\ \ u_r\right)_x - \frac{2}{3}r\left(\mu\ \ u_x\right)_r - \frac{2}{3}v\ \ \mu_r - \frac{4}{3}\frac{\mu v}{r} \end{bmatrix};$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho urf - \frac{r\mu}{\mathrm{Pr}}\frac{\partial f}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\rho vrf - \frac{r\mu}{\mathrm{Pr}}\frac{\partial f}{\partial r}\right) = 0, \tag{2}$$

где $\mu = \mu_m + \mu_t$ – сумма молекулярной и турбулентной вязкости.

Уравнение (1) описывает гидродинамику процесса; (2) – процесс горения в рамках модели ПХРС [2], в которой используется понятие переноса сохраняющегося свойства *f*, имеющего смысл смесевой доли.

Определив значения *f* во всей расчетной области, можно найти концентрации горючего и окислителя, а также температуру газа T_g:

$$f < f_{st}: \quad C_{gor} = 0, \quad C_v = C_{v0}\frac{f_{st} - f}{f_{st}}, \quad T_g = T_v + \frac{f}{f_{st}}(T_{\text{ад}} - T_v); \tag{3}$$

$$f > f_{st}: \quad C_v = 0, \quad C_{gor} = C_{gor0}\frac{f_{st} - f}{f_{st} - 1}, \quad T_g = T_{gor} + \frac{1 - f}{1 - f_{st}}(T_{\text{ад}} - T_{gor}), \tag{4}$$

где C_{v0}, T_v – концентрация и температура окислителя; C_{gor0}, T_{gor} – концентрация и температура горючего; $f_{st} = \dfrac{\dfrac{C_{v0}}{\chi}}{C_{gor0} + \dfrac{C_{v0}}{\chi}}$ – значение f, определяющее положение фронта пламени; χ определяется стехиометрическим соотношением компонентов; $T_{\text{ад}} = T_v + \left(T_{gor} - T_v + \dfrac{H}{c_p}\right) f_{st}$ – температура в стехиометрической смеси при адиабатных условиях; H – теплота сгорания топлива.

Плотность определяется из уравнения состояния газа:

$$\rho = \frac{p}{RT_g}. \tag{5}$$

Зависимость молекулярного динамического коэффициента вязкости от абсолютной температуры задается формулой Саттерлэнда:

$$\frac{\mu_m}{\mu_{m0}} = \left(\frac{T_g}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + T_S}{T_g + T_S}, \tag{6}$$

где T_S – постоянная Саттерлэнда, имеющая для воздуха значение, близкое к 122 К, T_0 и μ_{m0} – абсолютная температура и коэффициент вязкости, соответствующие некоторому начальному состоянию газа.

Турбулентная вязкость моделируется на основании [2] по формуле

$$\mu_t = 0{,}0256\rho u_a r_{1/2}, \tag{7}$$

где u_a – продольная скорость на оси, $r_{1/2}$ – величина радиуса, при котором продольная скорость в два раза меньше скорости на оси.

Граничные условия для системы (1)–(7):

1) на участках поступления окислителя, в качестве которого выступает воздух, задается его скорость вдува $u = u_v$, температура $T_g = T_v$, начальная концентрация $c_v = c_{v0}$, начальный уровень турбулентности $\mu_t = \mu_{t0}$ и полагается $v = 0$, $c_{gor} = 0$, $f = 0$;

2) в зоне подачи горючего задается величина скорости вдува $u = u_{gor}$, температура подаваемого горючего $T_g = T_{gor}$, его начальная концентрация

$c_{gor} = c_{gor0}$, начальный уровень турбулентности $\mu_t = \mu_{t0}$ и полагается $v = 0$, $c_v = 0$, $f = 1$;

3) на твердых поверхностях для скорости ставятся условия прилипания $u = v = 0$, а для f полагается $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$, где n – нормаль к поверхности;

4) на оси задаются условия симметрии $\frac{\partial u}{\partial r} = 0,\ v = 0,\ \frac{\partial f}{\partial r} = 0$;

5) на участках выхода продуктов горения задано давление $p = p_\infty$, равенство нулю вторых производных для продольной скорости и сохраняющегося свойства $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0,\ \ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$, радиальная скорость полагается равной нулю $v = 0$.

Для численной реализации системы (1)–(7) методом SIMPLE [3] необходимо построить сетку, учитывающую внутреннюю геометрию горелочного устройства инфракрасного нагревателя. Использование криволинейной сетки существенно усложнит исходную систему уравнений, поэтому для проведения численных расчетов используется осесимметричная система координат, а внутреннее строение горелки задается «блокированием» соответствующих областей сетки. «Блокированные» ячейки полагаются непроницаемыми, и для них ставятся те же граничные условия, что и на твердой поверхности: скорость полагается равной нулю, а для температуры первая производная принимается равной нулю.

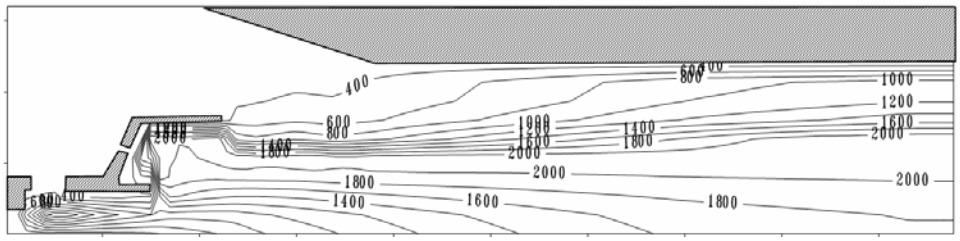
Скорость подачи газа через жиклер D_g определяется по формуле

$$V_g = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_s T_s \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_0 + \Delta p_g} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]},$$

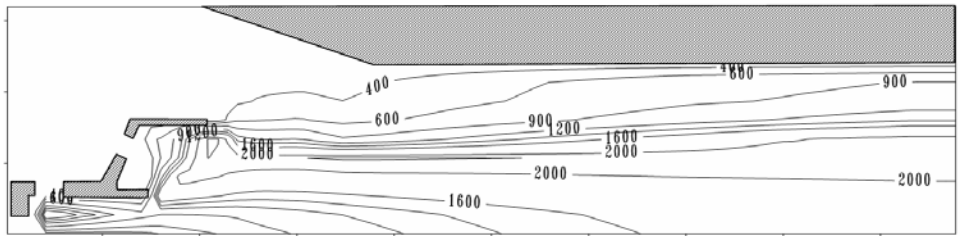
где R_s, T_s, k – газовая постоянная, температура и показатель адиабаты горючего газа; $\Delta p_g, p_0$ – перепад давления на жиклере и атмосферное давление. При перепаде давления $\Delta p_g = 900$ Па для природного газа величина скорости $u_{gor} \approx 50$ м/с, температура подаваемой горючей смеси составляет 300 К, что характерно для большинства горелочных устройств.

Течение симметрично относительно оси, значит, и распределение параметров течения также будет симметрично, поэтому результаты расчетов приводятся только на одном радиусе.

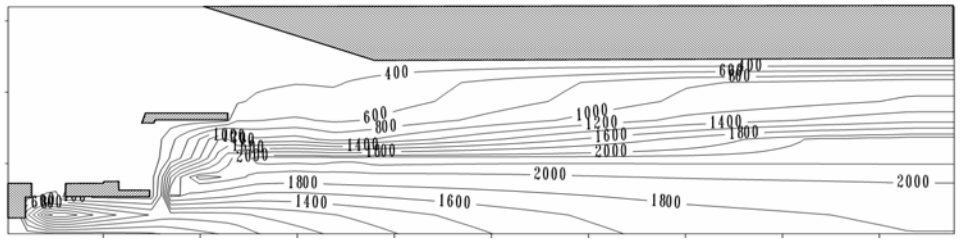
На рис. 2 представлено поле распределения температуры в горелочном устройстве при различных размерах отверстия D_2 (см. схему на рис. 1). Температура газов изменяется в пределах от 300 К до 2200 К. Увеличение размера отверстия D_2 приводит к увеличению расхода воздуха через это отверстие, а чем больше поток воздуха, тем дальше сносится фронт пламени от этого отверстия, что мы и наблюдаем на рис. 2.



а



б

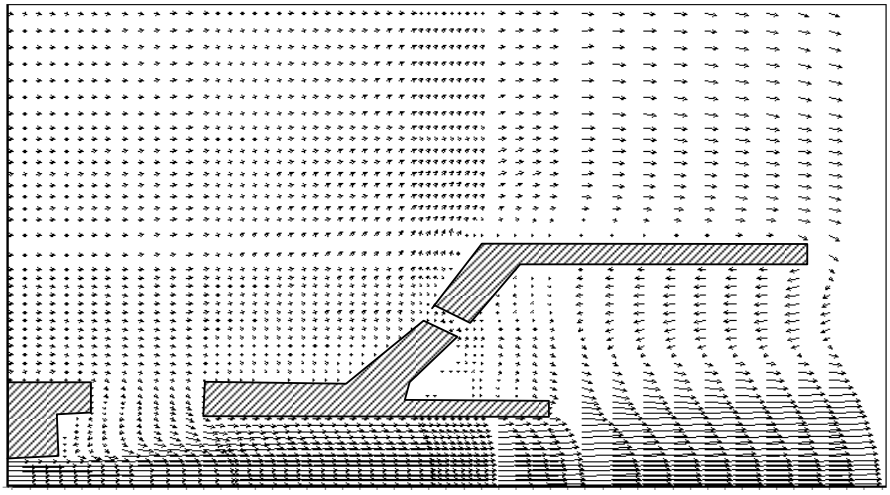


в

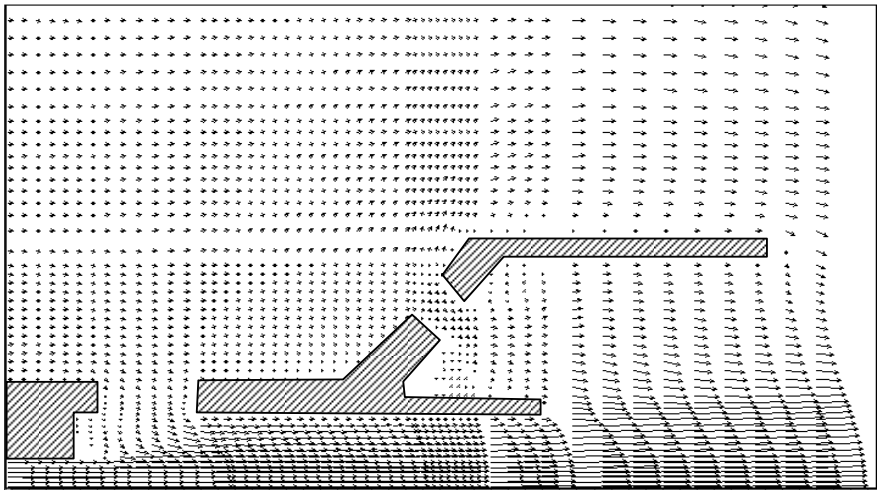
Рис. 2. Распределения температуры в горелке при различных размерах отверстия D_2 :
а – малый, *б* – средний, *в* – максимальный размер D_2

Как правило, высокотемпературная зона формируется на выходе из горелки при смешении с основным потоком воздуха. В случае очень малого размера D_2 этого не происходит, и фронт пламени образуется значительно раньше в пределах горелочного устройства. Это объясняется появлением разрежения в этой зоне вследствие значительного снижения расхода воздуха, поступающего через D_2 , и смесь газов, идущих по D_{01} , выталкивается в зону с меньшим сопротивлением, что приводит к образованию вихря (рис. 3, *а*) и возникновению реакции именно в этой зоне.

При увеличении размера отверстия D_2 вихрь не образуется (рис. 3, *б*).



а



б

Рис. 3. Векторное поле скоростей: *а* – при малом, *б* – при среднем размере D_2

Размеры L_1 и L_2 определяют положение фронта пламени.

На рис. 4 приведено поле распределения температуры в горелочном устройстве при различных размерах L_2 (см. рис. 1). При увеличении данного размера наблюдается смещение характерных изотерм в области оси симметрии в правую сторону, а также снижение средней температуры на стенке трубы излучателя.

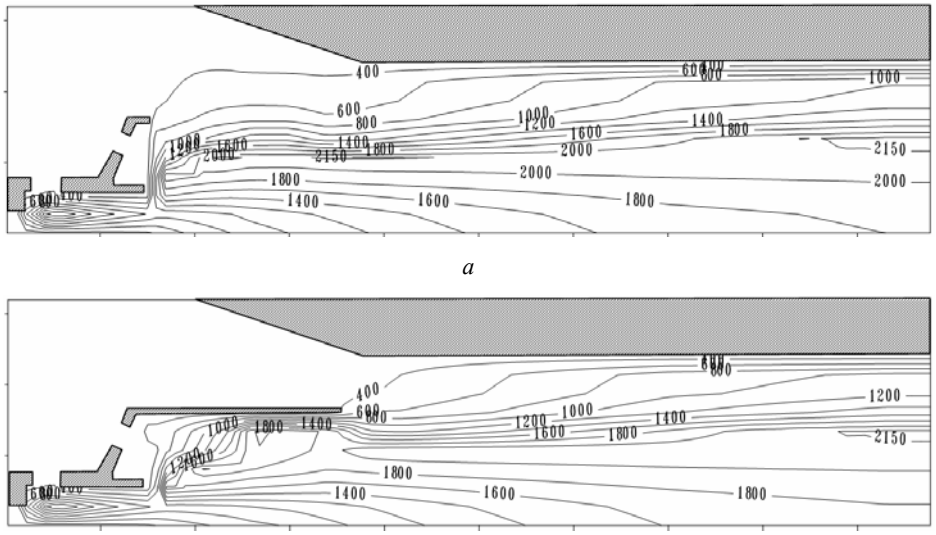


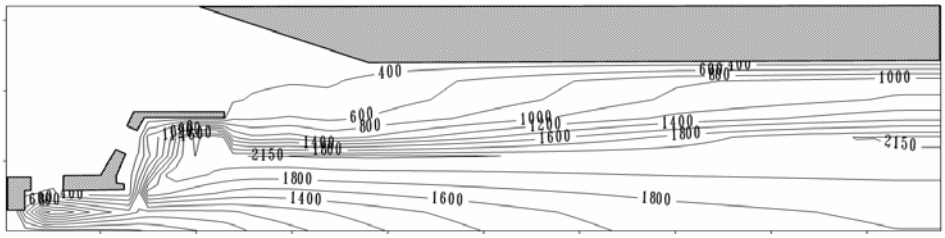
Рис. 4. Поле распределения температуры в горелке при различных размерах L_2:
а – малый размер L_2; *б* – увеличенный размер L_2

При значительном удлинении размера L_2 образуется две высокотемпературные зоны: первая обусловлена реакцией горючей смеси и воздуха, поступившего через D_2, а вторая формируется на выходе из горелки при смешении с основным потоком воздуха.

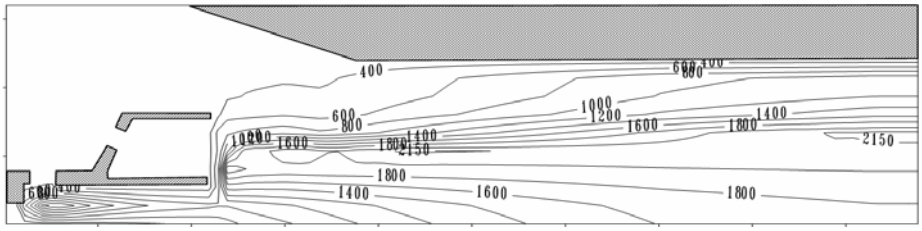
Влияние размера L_1 (см. рис. 1) на распределение температуры в горелочном устройстве отображено на рис. 5. Данный размер определяет, где произойдет второй этап смешения горючего и окислителя, т. е. начнется реакция, поэтому чем он длиннее, тем дальше от входа образуется факел.

На рис. 6 представлено поле распределения температуры при различных расходах подачи горючего. Уменьшении расхода горючего при неизменном расходе воздуха приводит к избытку окислителя и ускорению процесса реакции, поэтому зона горения смещается в сторону отверстия подачи горючего (см рис. 6, *а*) и, соответственно, всего факела в целом.

Полученное поле температуры в случае увеличенного расхода горючего (рис. 6, *б*) объясняется соответствующим ему полем скорости, которое приведено на рис. 7. Увеличение расхода привело к забросу части горючего в область подачи воздуха через отверстие D_1, поскольку газ стремится в область с меньшим сопротивлением, а это приводит к нарушению устойчивого смешения воздуха и горючего и, как следствие, к значительному изменению распределения поля температур. Форма изотерм обусловлена характером вихрей поля скорости.

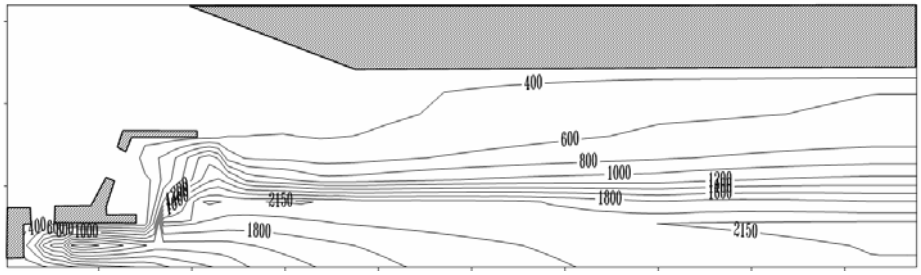


а

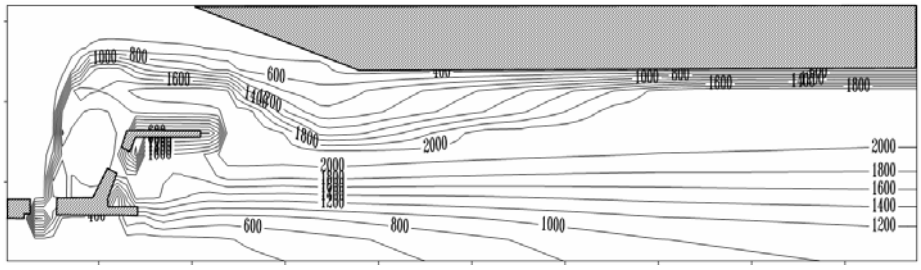


б

Рис. 5. Поле распределения температуры в горелке при различных размерах L_1:
а – малый размер L_1 ; *б* – увеличенный размер L_1



а



б

Рис. 6. Поле распределения температуры в горелке при различных расходах подачи горючего: *а* – малый расход; *б* – увеличенный расход

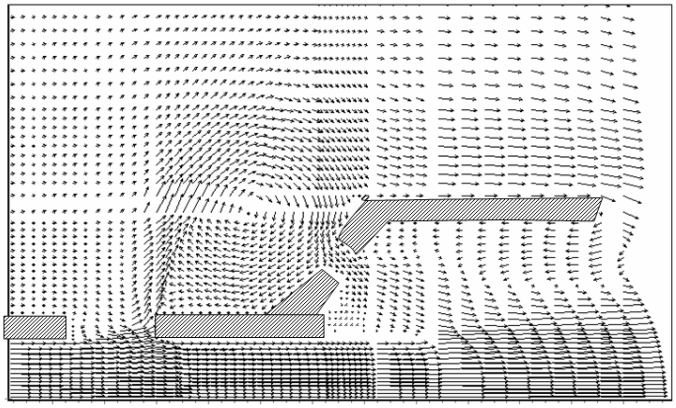


Рис. 7. Поле скорости в горелке при увеличенном расходе

Таким образом, геометрия горелки, а также расход горючего и окислителя оказывают непосредственное влияние на процесс интенсивности смешения данных компонентов, на процесс образования факела пламени, что необходимо учитывать при разработке горелочных устройств.

Список литературы

1. *Лойцянский, Л. Г.* Механика жидкости и газа : учебник для вузов / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

2. *Сполдинг, Д. Б.* Горение и массообмен / Д. Б. Сполдинг ; пер. с англ. Р. Н. Гизатуллина, В. И. Ягодкина ; под ред. В. Е. Дорошенко.– М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.

3. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М. : Энергоиздат, 1984. – 136 с.

УДК 621.9.02.001.2

В. И. Костяев, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Автомобили и металлообрабатывающее оборудование»
Ижевский государственный технический университет

ТЕОРИЯ ВИНТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КАК МЕТОДИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

В основе процесса формообразования деталей инструментом лежат их относительные движения, которые в общем случае являются винтовыми. Изложенные в статье положения винтовой теории позволяют более полно исследовать характер взаимодействия контактирующих поверхностей различных технологических пар. С помощью метода лучевого комплекса автором создана методика проектирования накатных инструментов для получения трехмерного рельефа на цилиндрических поверхностях.

В основе процесса формообразования деталей, как и любого другого процесса обработки инструментом, лежат их относительные движения, которые в самом общем случае являются винтовыми, т. е. определяются некоторым винтом $\Phi_{отн}(p_{отн})$. Под

© Костяев В. И., 2009