

## РАСЧЕТ ДОЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

А.Л. Железнякова<sup>1</sup>, С.Т. Суржиков<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва<sup>2</sup>Институт проблем механики Российской академии наук, Москва

## Аннотация

Представлены результаты расчета обтекания газом атмосферного давления локализованной области тепловыделения, температура в которой достигает ~10000 К. Отличительной особенностью решаемой задачи является трехмерный численный анализ медленных конвективных процессов, возникающих в окрестности локальной области тепловыделения.

С использованием численных методов решается задача движения вязкого теплопроводного газа на основе уравнений Навье–Стокса при фиксированных параметрах области тепловыделения. Выполнены систематические расчеты течения газа при разных мощностях тепловыделения. Найденны режимы движения газа, при которых наблюдаются конвективные неустойчивости за областью тепловыделения, носящие регулярный характер.

## NUMERICAL SIMULATION OF GAS FLOW THROUGH LOCALIZED HEAT RELEASE REGION

Results of numerical study of gas flow through localized heat release region in three dimensional geometry are presented. Temperature inside the heat release region is achieved 10000 K. Numerical simulation is based on three dimensional Navier–Stokes equations for fixed parameters of heat release. It is shown that at some intensities of heat release gas dynamic instabilities are observed in flow field.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость изучения газодинамической структуры дозвукового потока, обтекающего локализованную в пространстве область тепловыделения, возникает в связи с исследованием лазерных волн горения (в этом случае газовый поток обтекает локализованную область низкотемпературной плазмы) и изучением закономерностей взаимодействия газовых потоков с разрядами различной природы или локализованными областями горения в дозвуковых газовых потоках.

В двумерных расчетах, выполненных в работе [1] было показано, что при обтекании локализованной области тепловыделения дозвуковым потоком газа, могут наблюдаться различные режимы течения: ламинарное обтекание области тепловыделения (с частичным протеканием), а также движение газа с образованием завихренностей в регулярном и хаотическом режиме. Было установлено, что при определенных режимах обтекания и мощностях тепловыделения наблюдается явление бифуркации газодинамических конфигураций (существование различных режимов течения при одинаковых граничных условиях, со скачкообразным переходом из одного состояния в другое), а также явление гистерезиса газодинамических конфигураций. При этом, было подчеркнuto, что решаемая задача является весьма чувствительной к различным возмущениям, вносимым в решение (в том числе, к численным).

В данной работе представлены результаты трехмерных (пространственных) расчетов дозвукового обтекания области тепловыделения. Проводится сопоставление с результатами выполненных ранее двухмерных расчетов обтекания области тепловыделения вязким, теплопроводным, излучающим и поглощающим газом [1].

## 2. ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

## 2.1. Расчетная схема и постановка задачи

Расчетная схема задачи показана на рис. 1. Задача формулируется в прямоугольной декартовой системе координат. Локальная область тепловыделения размещается на центральной оси расчетной области. Центр области энергосвыделения расположен в точке  $A$  с координатами  $(x = 0.1, y = 0, z = 0)$ . Мощность тепловыделения распределена в пространстве по закону Гаусса и не изменяется во времени:

$$Q_V(x, y, z) = Q_0 \cdot \exp \left[ -\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{R_0^2} \right], \quad (1)$$

где  $Q_0$  – величина объемной мощности энергосвыделения;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты центра области тепловыделения в прямоугольной декартовой системе координат;  $x, y, z$  – текущие координаты;  $R_0$  – характерный размер области тепловыделения.

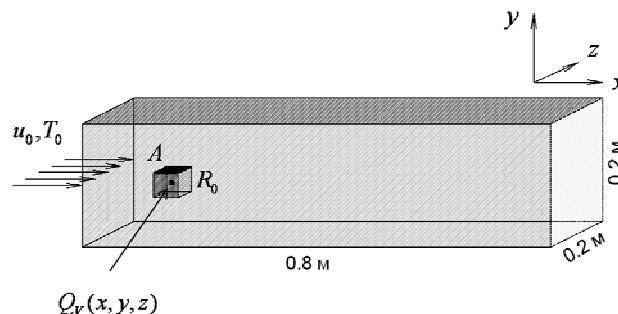


Рис. 1. Схема задачи обтекания локальной области тепловыделения дозвуковым потоком газа

Для решения задачи о динамике газа в окрестности области энерговыделения используется следующая система уравнений: неразрывности, Навье – Стокса и сохранения энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{V}) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{V}) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{V}) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right], \quad (5)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{V} \text{grad} T = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + Q_V \quad (6)$$

## 2.2. Граничные условия

На входе в расчетную область задаются параметры невозмущенного газового потока: скорость  $u_0$  и температура  $T_0$ . Остальные термодинамические параметры определяются из уравнения состояния совершенного газа с показателем адиабаты  $\gamma = 1.4$ .

## 2.3. Физическая модель

В расчете использовалась модель фиксированной области тепловыделения, т.е. исключено влияние переменности самой области тепловыделения.

Мощность энерговыделения определяется только пространственными переменными и не зависит ни от времени, ни от каких либо газодинамических функций в каждой заданной точке пространства. В реальном случае, когда решается задача о распространении лазерных волн горения, мощность энерговыделения весьма сильно зависит от распределения газодинамических параметров. Однако, как это показано в [1], модель фиксированной области энерговыделения вполне адекватно описывает реальные газодинамические процессы.

В качестве исследуемого газа выбран термодинамически совершенный газ, который предполагается вязким и теплопроводным. Задача решается в нестационарной, трехмерной постановке.

Из-за сравнительно малых скоростей газа в уравнении сохранения энергии не включены слагаемые, описывающие тепловыделение, обусловленное сжимаемостью.

Результаты расчетов, представленные в данной работе, получены с использованием программного комплекса FLUENT 6.1 в нестационарной трехмерной постановке.

## 3. РАСЧЕТНАЯ СЕТКА

В трехмерной расчетной области была построена гексагональная сетка общей размерностью 1516320

ячеек. Сетка имеет сгущение в области следа за областью тепловыделения. Фрагмент расчетной сетки показан на рис. 2.

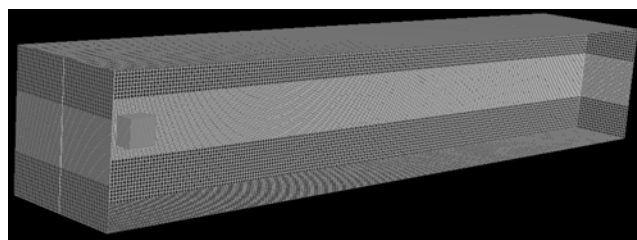


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

В ходе численного моделирования были выполнены систематические расчеты дозвукового движения газа сквозь область локального тепловыделения.

Расчеты проводились для неизменной скорости набегающего потока  $u_0 = 50$  м/с.

Характерный размер области энерговыделения полагали равным  $R_0 = 0.03$  м. Величина объемной мощности энерговыделения изменялась в диапазоне  $Q_0 = 10^9 \div 15 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> с шагом в  $0.5 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>. Наибольшая величина  $Q_0$  ограничивалась предельным значением температуры (около 20 000 К), допустимым в данной модели. Очевидно, что модель идеального совершенного газа (с неизменным показателем адиабаты) является весьма приближенной при высоких температурах, однако, как уже отмечалось выше, в работе [1] возможность использования такой модели, с целью анализа закономерностей дозвукового движения газа, обоснована сравнением с реальными расчетами движения вязкого, теплопроводного, химически реагирующего, излучающего и поглощающего газа.

Из представленного на рис. 3 поля температур в центральном сечении, видно, что в начальный момент времени на фоне равномерно-движущейся среды в локальной области тепловыделения создается температурное распределение типа Гаусса с максимальной температурой в центре около 2000 К и температурой на периферии 700 К.



Рис. 3. Поле температур в центральном сечении в начальный момент времени при  $Q_0 = 5 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

Численные расчеты показали, что при фиксированной скорости газового потока  $u_0 = 50$  м/с и величине мощности энерговыделения меньшей значения  $Q_0 = 4 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> у рассматриваемой задачи существует полностью стационарное решение. В ходе компьютерного моделирования был получен режим те-

чения, при котором, наблюдалось плавное обтекание потоком воздуха локальной области тепловыделения, и, частичное протекание через нее (рис. 4–6). Поле температур не менялось с течением времени. На рис. 4, рис. 5 и рис. 6 представлены поля температур при значениях параметра мощности тепловыделения  $Q_0 = 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>,  $Q_0 = 2 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> и  $Q_0 = 3 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> соответственно. Из рисунков видно, что при относительно небольших величинах мощности энерговыделения, меньших значения, указанного выше, наблюдается стационарный режим плавного обтекания.

При дальнейшем увеличении мощности энерговыделения до величины порядка  $Q_0 = 4 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> происходил переход от режима плавного обтекания горячей области к режиму автоколебаний. При величине параметра  $Q_0 = 5 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> наблюдались заметные конвективные неустойчивости за фронтом ЛВГ, носящие регулярный характер, которые проявлялись в том, что за областью тепловыделения возникали периодические колебания (рис. 7).

При дальнейшем росте мощности энерговыделения колебания поля температур становились более выраженными (рис. 8–10). При этом нестационарность течения при заданных значениях мощности тепловыделения определялась не внешними условиями, а собственными свойствами потока обтекающей область тепловыделения.

На рис. 10 показано мгновенное поле температур после установления режима автоколебаний ( $Q_0 = 15 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>). За областью тепловыделения образуется пульсирующий горячий след. Вновь возникающие волны сносятся вниз по потоку.

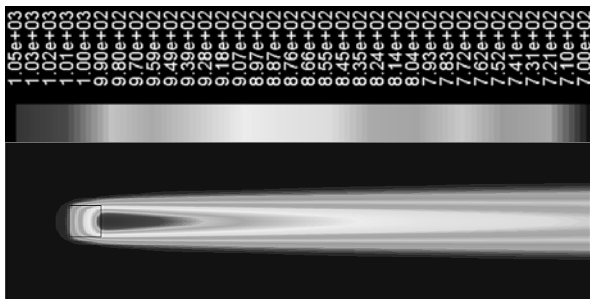


Рис. 4. Мгновенное распределение температур в центральном сечении. Стационарный режим плавного обтекания.  $Q_0 = 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

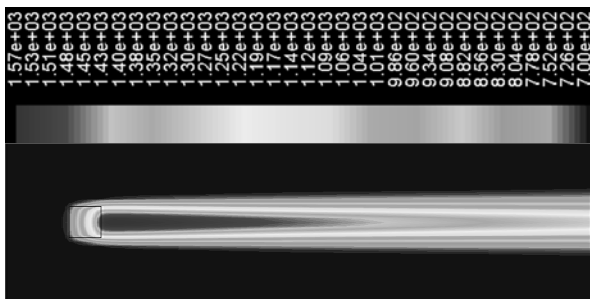


Рис. 5. Мгновенное распределение температур в центральном сечении. Стационарный режим плавного обтекания.  $Q_0 = 2 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

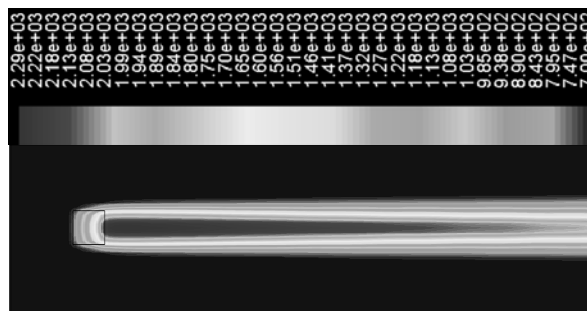


Рис. 6. Мгновенное распределение температур в центральном сечении. Стационарный режим плавного обтекания.  $Q_0 = 3 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

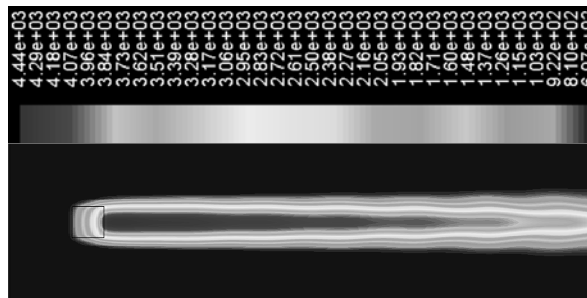


Рис. 7. Мгновенное распределение температур в центральном сечении после установления режима автоколебаний  $Q_0 = 5 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

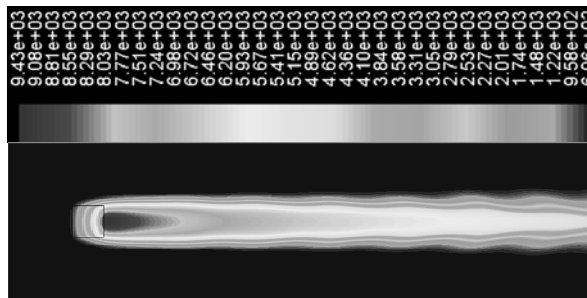


Рис. 8. Мгновенное распределение температур в центральном сечении после установления режима автоколебаний  $Q_0 = 8 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

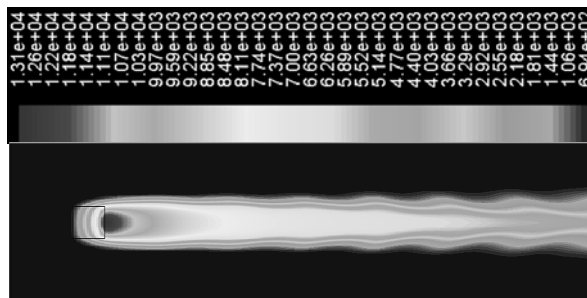


Рис. 9. Мгновенное распределение температур в центральном сечении после установления режима автоколебаний  $Q_0 = 10 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

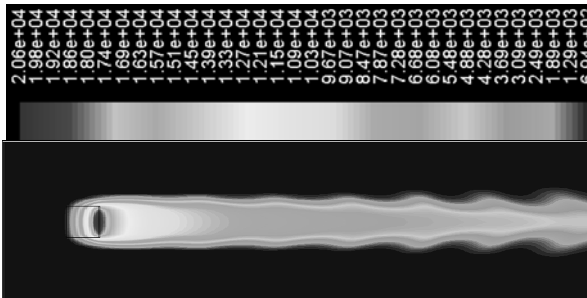


Рис. 10. Мгновенное распределение температур в центральном сечении после установления режима автоколебаний  $Q_0 = 15 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>

На рис. 11 показано развитие нестационарного колебательного процесса от начального момента времени при  $Q_0 = 15 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>.

Полученные здесь данные подтверждает выводы работы [1].

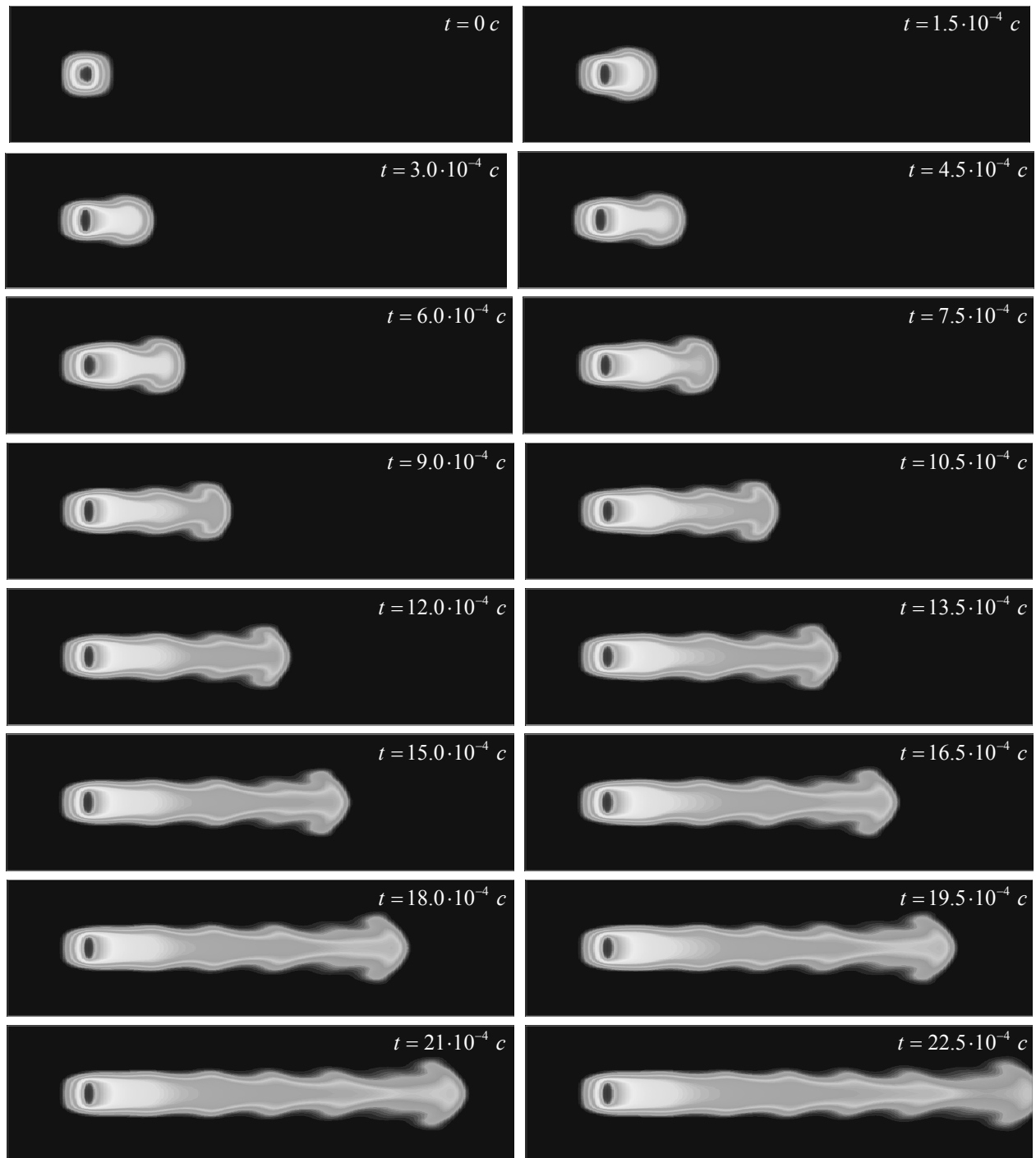


Рис. 11. Развитие неустойчивости за фронтом ЛВГ при значении параметра объемной мощности тепловыделения  $Q_0 = 15 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>. Распределение температур в центральном сечении. Результат численного моделирования

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием программного комплекса FLUENT6.1 выполнено трехмерное моделирование дозвукового обтекания области локального тепловыделения.

В ходе численного моделирования выполнены систематические расчеты полей газодинамических

функций, обусловленных наличием в газовом потоке локальных областей энерговыделения.

Найдены режимы движения газа, при которых наблюдается устойчивое стационарное течение, и режимы при которых наблюдаются конвективные неустойчивости за фронтом области энерговыделения, носящие регулярный характер.

Выводы данной работы, полученные в результате трехмерного (пространственного) моделирования газодинамических конфигураций подтверждают результаты двумерных расчетов [1].

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 07-01-00133 и программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  
 $p$  — давление, Па;  
 $Q_0$  — величина объемной мощности энерговыделения, Вт/м<sup>3</sup>  
 $Q_R$  — объемная мощность тепловыделения, связанная с переносом теплового излучения, Вт/м<sup>3</sup>  
 $Q_V$  — распределение мощности тепловыделения в локальной области, Вт/м<sup>3</sup>

$R_0$  — характерный размер области тепловыделения, м  
 $T$  — температура, К  
 $T_0$  — температура набегающего потока, К  
 $t$  — время, с  
 $u_0$  — скорость набегающего потока, м/с  
 $u, v, w$  — составляющие скорости по осям  $x, y, z$  соответственно, м/с  
 $\vec{V}$  — вектор скорости, м/с  
 $x, y, z$  — текущие координаты, м  
 $x_0, y_0, z_0$  — координаты центра области тепловыделения в прямоугольной декартовой системе координат, м  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)  
 $\mu$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суржиков С.Т. Бифуркация дозвукового газового потока при обтекании локализованного объема низкотемпературной плазмы // ТВТ. Т. 40. № 4. 2002. С. 591–602.