

УДК 532.58

# ОБТЕКАНИЕ СТЕНКИ, СОПРОВОЖДАЕМОЕ ВДУВОМ ГОРЯЧЕЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

*О. Р. Нурисламов*

Бирская государственная социально-педагогическая академия, Бирск

**Аннотация.** В работе рассматривается задача о пристеночном течении с образованием тонкого парогазового слоя вблизи ее поверхности. Исследуется возможность снижения сопротивления движению жидкости посредством организации вдува горячей парогазовой смеси с ее поверхности.

**Ключевые слова:** пристеночное течение, сопротивление, вдув, горячий газ, модель

---

## 1. Введение

При движении надводных и подводных объектов основную долю от общего сопротивления составляет гидродинамическое сопротивление. Поэтому всегда важной проблемой была возможность снижения гидродинамического сопротивления движению тел. В связи с тем, что динамическая вязкость парогазовой смеси почти на два порядка ниже, чем жидкости, предполагается, что наличие такой парогазовой «смазки» может способствовать существенному снижению срыва вихрей и тем самым препятствовать образованию кильватерного потока.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим пристеночное течение жидкости, сопровождаемое вдувом горячей парогазовой смеси. В результате образуются две области: область

течения парогазовой смеси вблизи пластины и область течения жидкости. Течение считаем установившимся. Будем предполагать, что плотности, вязкости, теплопроводности и теплоемкости сред не зависят от температуры. Требуется определить распределение скоростей и температур в пространстве, оценить величину снижения сопротивления в зависимости от температуры вдуваемого газа и температуры окружающей среды.

### 3. Основные уравнения

Основные уравнения, описывающие движение парогазовой смеси ( $x > 0$ ,  $0 < y < y_s(x)$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{gv}}{\partial x} + \frac{\partial v_{gv}}{\partial y} &= 0, \\ \rho_{gv} \left( u_{gv} \frac{\partial u_{gv}}{\partial x} + v_{gv} \frac{\partial v_{gv}}{\partial y} \right) &= \mu_{gv} \frac{\partial^2 u_{gv}}{\partial y^2}, \\ u_{gv} \frac{\partial k_v}{\partial x} + v_{gv} \frac{\partial k_v}{\partial y} &= D \frac{\partial^2 k_v}{\partial y^2}, \\ \rho_{gv} c_{gv} \left( u_{gv} \frac{\partial T_{gv}}{\partial x} + v_{gv} \frac{\partial T_{gv}}{\partial y} \right) &= \lambda_{gv} \frac{\partial^2 T_{gv}}{\partial y^2} + \mu_{gv} \left( \frac{\partial u_{gv}}{\partial y} \right)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Основные уравнения, описывающие движение жидкости ( $x > 0$ ,  $y > y_s(x)$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_\ell}{\partial x} + \frac{\partial v_\ell}{\partial y} &= 0, \\ \rho_\ell \left( u_\ell \frac{\partial u_\ell}{\partial x} + v_\ell \frac{\partial v_\ell}{\partial y} \right) &= \mu_\ell \frac{\partial^2 u_\ell}{\partial y^2}, \\ \rho_\ell c_\ell \left( u_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial x} + v_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial y} \right) &= \lambda_\ell \frac{\partial^2 T_\ell}{\partial y^2} + \mu_\ell \left( \frac{\partial u_\ell}{\partial y} \right)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где нижние индексы  $\ell$  и  $gv$  относятся соответственно к жидкости и парогазовой смеси.

### 4. Граничные условия

Условие на поверхности стенки ( $x > 0$ ,  $y = 0$ ):

$$u_{gv} = 0, \quad v_{gv} \sim \frac{1}{\sqrt{x}}, \quad T_{gv} = T_w, \quad k_v = k_{v0}. \quad (3)$$

Условие вдали от стенки ( $y \rightarrow \infty$ ):

$$u_\ell = U, \quad T_\ell = T_0. \quad (4)$$

Условие на границе «парогазовая смесь–жидкость» ( $y = y_s(x)$ ):

$$\begin{aligned} u_{gv} = u_\ell, \quad \mu_{gv} \frac{\partial u_{gv}}{\partial y} = \mu_\ell \frac{\partial u_\ell}{\partial y}, \quad T_{gv} = T_\ell = T_s(p), \\ -\lambda_{gv} \frac{\partial T_{gv}}{\partial y} + \lambda_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial y} = j_\ell, \quad j = \rho_v (\vec{v}_v \vec{n}), \\ \vec{v}_v = \vec{v}_{gv} - D \operatorname{grad}(k_v), \quad \rho_{gv} v_{gvn} = \rho_\ell v_{\ell n}, \\ \frac{p_v(T_s)}{p} = \frac{k_v R_v}{k_v R_v + (1 - k_v) R_g}, \quad p_v(T_s) = p_* e^{-\frac{T_s}{T_*}}. \end{aligned} \quad (5)$$

## 5. Переход к автомодельным переменным

Эта задача при данной постановке является автомодельной. Для удобства решения дифференциальных уравнений (1)–(2) с граничными условиями (3)–(5) следует перейти к автомодельной и безразмерным переменным

$$\xi = \frac{y}{\sqrt{x\nu_\ell/U}}, \quad \theta_{gv}(\xi) = \frac{T_{gv}}{T_0}, \quad \theta_\ell(\xi) = \frac{T_\ell}{T_0}.$$

Введем функцию тока и представим ее в виде:

$$\psi_i = \sqrt{\nu_\ell U x} \cdot \varphi_i(\xi) \quad (i = gv, \ell).$$

При этом решение системы уравнений (1)–(2) сводится к решениям уравнений в автомодельных переменных. Предыдущие уравнения в новых переменных примут вид:

в области течения парогазовой смеси

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_{gv} = -\tilde{\nu} \varphi_{gv} \dot{\varphi}_{gv}, \quad \ddot{k}_v + \frac{1}{2} \frac{\nu_\ell}{D} \varphi_{gv} \dot{k}_v = 0, \\ \ddot{\theta}_{gv} = -\tilde{\nu} \operatorname{Pr}_{gv} \left( \frac{1}{2} \dot{\theta}_{gv} \varphi_{gv} + \frac{Ec_{gv}}{\tilde{\nu}} \dot{\varphi}_{gv}^2 \right) \\ \left( \tilde{\nu} = \frac{\nu_\ell}{\nu_{gv}}, \quad Ec_{gv} = \frac{U^2}{c_{gv} T_0} \right); \end{aligned} \quad (6)$$

в области течения воды

$$\ddot{\varphi}_\ell = -\frac{1}{2} \varphi_\ell \dot{\varphi}_\ell, \quad \ddot{\theta}_\ell = -\operatorname{Pr}_\ell \left( \frac{1}{2} \dot{\theta}_\ell \varphi_\ell + Ec_{\ell} \dot{\varphi}_\ell^2 \right) \quad \left( Ec_\ell = \frac{U^2}{c_\ell T_0} \right). \quad (7)$$

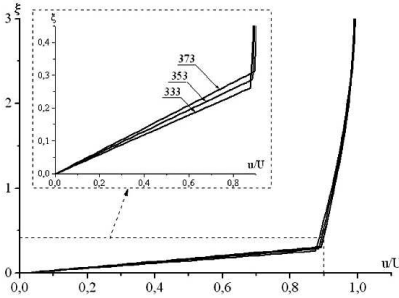


Рис. 1. Распределение скорости при обтекании стенки жидкостью с температурой 293 К

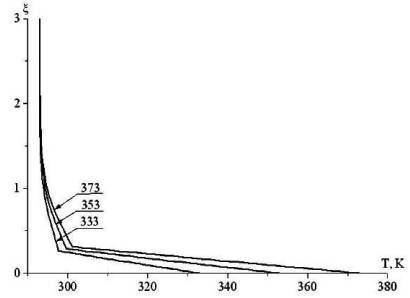


Рис. 2. Распределение температуры при обтекании стенки жидкостью с температурой 293 К

Граничные условия (3)–(5) при переходе к автомодельным переменным приобретают следующий вид:

условия на поверхности пластины ( $\xi = 0$ )

$$\dot{\varphi}_v = 0, \quad \varphi_v = \varphi_{v0}, \quad \theta_{gv} = \theta_w, \quad k_v = k_{v0}; \quad (8)$$

условия вдали от стенки ( $\xi \rightarrow \infty$ )

$$\dot{\varphi}_\ell = 1, \quad \theta_\ell = \theta_0 = 1; \quad (9)$$

условия на границе «парогазовая смесь–жидкость» ( $\xi = \xi_s$ )

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{gv} &= \dot{\varphi}_\ell, \quad \ddot{\varphi}_{gv} = \tilde{\mu} \ddot{\varphi}_\ell, \quad \theta_{gv} = \theta_\ell = \theta_s(p), \\ -\dot{\theta}_{gv} + \tilde{\lambda} \dot{\theta}_\ell &= \frac{1}{2} \tilde{\nu} k_v \frac{\text{Pr}_{gv}}{\text{Ja}_{gv}} \varphi_{gv}, \quad \varphi_\ell = \frac{k_v}{\tilde{\rho}} \left( \varphi_{gv} + 2 \frac{D}{\nu_\ell} \dot{k}_v \right) \\ k_v &= 1 / \left( \left( \frac{p}{p_*} \frac{R_v}{R_g} e^{\frac{T_*}{\theta_s T_0}} - \left( \frac{R_v}{R_g} - 1 \right) \right) \left( \tilde{\mu} = \frac{\mu_\ell}{\mu_{gv}}, \tilde{\nu} = \frac{\nu_\ell}{\nu_{gv}} \right) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, решение системы уравнений (1)–(2) с граничными условиями (3)–(5) сводятся к решению системы уравнений (6)–(7) с граничными условиями (8)–(10).

## 6. Численный анализ

Численное решение задачи осуществляется пристрелкой с применением метода Рунге-Кутты. Пристрелка осуществляется по неизвестным параметрам  $\dot{\varphi}_{gv}(0)$ ,  $\theta_{gv}(0)$  и  $\dot{k}_v(0)$  до тех пор, пока граничные условия (9) не выполняются с заданной точностью.

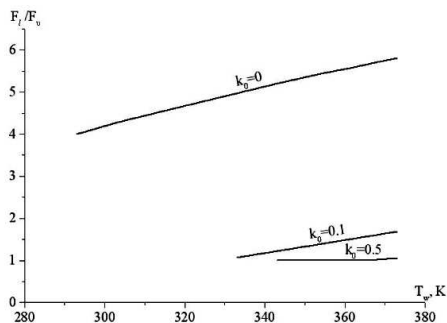


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента снижения сопротивления от температуры вдуваемой парогазовой смеси

В качестве жидкости примем воду, а в качестве газа — воздух. На Рис. 1, 2 представлены профили скоростей и температур при обтекании стенки жидкостью с температурой  $T_0 = 293$  К и со скоростью  $U = 1$  м/с. Числа на кривых соответствуют температуре  $T_w$  вдуваемой парогазовой смеси в Кельвинах. На Рис. 3 иллюстрируется зависимость коэффициента снижения сопротивления для различных «начальных» концентрации пара от температуры вдуваемой парогазовой смеси.

## 7. Вывод

Исходя из полученных результатов можно заключить, что увеличение температуры вдуваемой парогазовой смеси не приводит к заметному уменьшению значения коэффициента снижения сопротивления даже при малых концентрациях пара во вдуваемой парогазовой смеси ( $k_{v0} \approx 0.1$ ). Наиболее яркий эффект снижения сопротивления наблюдается при  $k_{v0} = 0$ .

В зависимости от температуры и концентрации пара во вдуваемой парогазовой смеси, а также температуры на границе фазовых переходов в области тонкого парогазового слоя возможно появление другого эффекта — образование парогазокапельной смеси.

## Список литературы

- [1] Черный Г. Г. Ламинарное движение газа и жидкости в пограничном слое с поверхностью разрыва // Изв. АН СССР, ОТН. 1954. № 12. С. 38–67.