

## ГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нигора В.Н., Литвиненко А.М., Манк В.В., Купчик М.П.

*Украинский государственный университет пищевых технологий.*

Одним из эффективных способов интенсификации процесса гидро-струйной очистки поверхностей является обработка их импульсными потоками моющей жидкости. Оценить влияние импульсного потока на качество очистки можно по касательным напряжениям трения, возникающим в турбулентном пограничном слое /ТПС/ на очищаемой поверхности [1].

Анализ работ по исследованию пульсирующих потоков [1] свидетельствует о том, что они носят, в основном, экспериментальный характер и не позволяют достичь однозначного понимания этого сложного гидродинамического явления.

В данной работе предпринята попытка разработать приближенную, но достоверную модель формирования касательных напряжений в пристенном пограничном слое под воздействием пульсаций скорости.

При взаимодействии пульсирующего потока с плоскостью выбираем параметры в ТПС осредненными по времени, при этом интегральное уравнение импульсов можно записать в следующем виде [2] :

$$u_0 \frac{\partial \delta}{\partial x} \int_0^\delta \bar{u} dy - \frac{\partial \delta}{\partial x} \int_0^\delta \bar{u}^2 dy - \frac{\partial \delta}{\partial x} \int_0^\delta \Delta \bar{u}^2 dy = \frac{\tau_{cm}}{\rho} \quad (1)$$

где  $\bar{u}, \bar{u}_0$  - осредненная скорость соответственно в ТПС и в набегающем потоке;  $\Delta \bar{u}^2$  - среднеквадратичная продольная составляющая пульсации скорости;  $x, y$  - координаты ТПС;  $\tau_{cm}$  - касательное напряжение на плоскости;  $\delta$  - толщина ТПС.

Для определения третьего члена в уравнении (1) воспользуемся степенной зависимостью для профиля скоростей

$$u = u_0 (y/\delta)^m, \quad (2)$$

где  $m$  зависит от пульсаций скорости в потоке и определяется

$$m = \frac{1 - K / (1 + K)}{1/m_1 + K / (1 + K)} \quad (3)$$

здесь  $K = \sqrt{\Delta \bar{u}_0^2 / \bar{u}_0^2}$  - константа Кармана;  $m_1$  - показатель степени в профиле скоростей при отсутствии пульсаций скорости.

Для определения последнего члена в (1) необходимо найти закон изменения амплитуды пульсирующей составляющей скорости  $\Delta u$  по сечению ТПС. Пренебрегая силами вязкости, уравнение движения для наложенного пульсирующего потока можно представить в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (4)$$

Определяя турбулентное касательное напряжение равенством  $\tau = \rho \nu du/dy$  и принимая коэффициент турбулентной вязкости  $\nu = \text{const}$  по сечению ТПС, получим:

$$\frac{du}{dt} = \nu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (5)$$

С учетом граничных условий: при  $y=0$   $u=0$ ; при  $y=\delta$

$u = \Delta u_0 e^{i\omega t}$  решение интеграла (5) имеет вид:

$$u = \frac{\Delta u_0}{\sin \sqrt{K_c}} \sin \left( \sqrt{K_c} \frac{y}{\delta} \right) e^{i\omega t} \quad (6)$$

где  $K_c = \pi \delta^2 / \nu$  - безразмерный параметр.

При малых частотах  $\pi K_c \rightarrow 0$  из уравнения (6), раскрывая неопределенность, получаем:

$$u = \Delta u_0 (y/\delta) e^{int} \quad (7)$$

Для условия  $\Delta u_0 = \text{const}$  с учетом уравнения (7) имеем:

$$\frac{1}{u_0^2} \frac{\partial}{\partial x} \delta \int_0^\delta \Delta u^2 d\left(\frac{y}{\delta}\right) = \frac{K^2}{6} \frac{d\delta}{dx} \quad (8)$$

$$\tau_{cm} = \rho 8,7^{\frac{2}{3m+1}} u_0^2 (u_0 \delta / \nu)^{\frac{2m}{3m+1}} \quad (9)$$

Подставляя уравнения (2), (8) и (9) в уравнение (1) и интегрируя, получаем:

$$\frac{\delta}{x} = \left( \frac{3m+1}{m+1} \right)^{\frac{1+m}{3m+1}} \frac{8,7^{\frac{2}{3m+1}}}{\left[ m/(1+m)(1+2m) - K^2/6 \right]^{\frac{1+m}{3m+1}}} \text{Re}_x^{\frac{2}{3m+1}} \quad (10)$$

где  $\text{Re}_x = \rho(u_0 x / \mu)$

Из (9) с учетом уравнения (10) получаем зависимость для коэффициента турбулентного трения

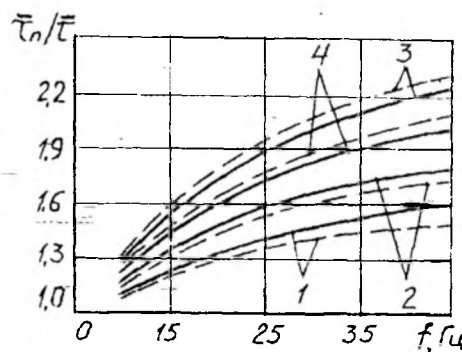
$$\begin{aligned} & 2 \left( \frac{1+m}{1+3m} \right)^{\frac{2m}{3m+1}} 8,7^{\frac{2}{3m+1}} \left[ \frac{m}{(1+m)(1+2m)} \right]^{\frac{2m}{3m+1}} \times \\ & \times \left[ 1 - \frac{(1+m)(1+2m)K^2}{m \cdot 6} \right]^{\frac{2m}{3m+1}} \text{Re}_x^{\frac{2m}{3m+1}} \end{aligned} \quad (11)$$

Введя новые переменные  $\bar{\tau}_* = \tau_{cm} / \rho u_0^2$ ;  $\bar{\text{Re}} = \text{Re}_x / \bar{\tau}_*$ , где  $\text{Re}_x = \rho u_0 \delta^* / \mu$ ;  $\delta^*$  - толщина потери импульса и выполнив ряд преобразований с зависимостями (2), (9) и (11) с учетом того, что  $m_1 = 1/7$ , получим уравнение касательного напряжения:

$$\bar{\tau}_* = 8,7^{\frac{7+8K}{3-4K}} \left[ \frac{7+8K}{(8+8K)(9+8K)} \right]^{\frac{1}{5-4K}} \quad (12)$$

Предполагая, что пульсации скорости внутри цилиндрического канала оказывают на касательные напряжения такое же влияние, как и при обтекании пластины, и выполнив ряд преобразований, получим:

$$\bar{\tau}_* = \frac{0,141 \text{Re}_x^{\frac{2}{7-5K}}}{(1+K^2)(1-n) \left\{ 1 - K^2/6 \left[ m/(m+1)(2m+1) \right] \right\}} \quad (13)$$



На рисунке приведены величины касательных напряжений, рассчитанных по (13) /сплошная линия/ и экспериментальных /штриховая линия/ при значениях безразмерного объема импульса жидкости  $\bar{V} = V/d^3 = 0,018(1); 0,034(2); 0,059(3); 0,076(4)$ . Анализ кривых показывает удовлетворительное совпадение результатов расчета по предложенной модели пульсирующего потока с экспериментальными данными. Причем касательные напряжения  $\bar{\tau}_0$ , создаваемые пуль-

сирующим потоком, более чем в два раза превосходят касательные напряжения стационарного потока  $\bar{\tau}$ , что свидетельствует об эффективности гидро-импульсной очистки технологического оборудования.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев М.М., Кузьмин В.В., Фафурин А.В., Классификация пульсирующих турбулентных течений. Инж.-физ.журнал. - 1990. -59, N5.- с. 725-735.
2. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.:Машиностроение, 1982. - 240 с.