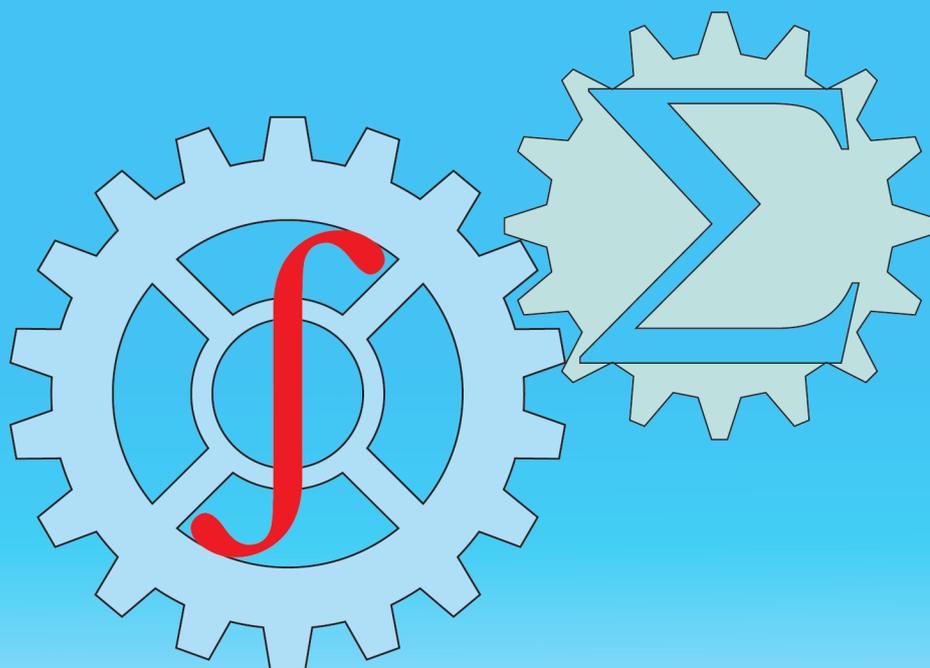




ISSN: 2010-7250
Published from 1992

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
Mechanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti

МЕХАНИКА МУАММОЛАРИ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ PROBLEMS OF MECHANICS



2025
Volume 34
No: 4

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

МЕХАНИКА
МУАММОЛАРИ

O‘ZBEKISTON
JURNALI

4

2025

УЗБЕКСКИЙ
ЖУРНАЛ

ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ

Журнал под таким названием издается с января 1992 г.

Ташкент – 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – докт. физ.-мат. наук, проф. К.С. СУЛТАНОВ
Заместитель главного редактора – докт. физ.-мат. наук Р.А. АБИРОВ
Заместитель главного редактора – PhD Н.А. НИШОНОВ
Ответственный секретарь – докт. тех. наук М.М. ХАМДАМОВ

Абдикаримов Р.А. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Мирсаидов М. д.т.н., проф., акад. АН РУз (Ташкент)
Абдусаттаров А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Мухаммадиев Д.М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Азимов Д. д.т.н., проф. (США)	Панахов Г.М. д.т.н., проф., член-корр. НАНА (Баку)
Алдошин Н.В. д.т.н., проф. (Москва)	Паровик Р. д.ф.-м.н. (Петропавловск-Камчатский)
Алимухамедов Ш.П. д.т.н., проф. (Ташкент)	Ризаев А.А. д.т.н., проф. (Ташкент)
Ахмедов А.Б. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Сагдиев Х.С. к.т.н. (Ташкент)
Бахадиров Г.А. д.т.н., проф. (Ташкент)	Сирожиддинов З. д.т.н., проф. (Самарканд)
Быковцев А.С. д.ф.-м.н., проф. (США)	Старовойтов Э.И. д.ф.-м.н. (Гомель, Беларусь)
Ватин Н.И. д.т.н., проф. (Санкт-Петербург)	Тохилов Ш.М. к.ф.-м.н. (США)
Дусматов О.М. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)	Тухтакузиев А.Т. д.т.н., проф. (Ташкент)
Зубарев А.Ю. д.ф.-м.н., проф. (Екатеринбург)	Юлдашев Ш.С. д.т.н., проф. (Наманган)
Исмоилова С.И. д.т.н., проф. (Ташкент)	Худайкулиев Р.Р. к.т.н. (Ташкент)
Казанцев С.П. д.т.н., проф. (Москва)	Хужаев И.К. д.т.н., проф. (Ташкент)
Кузнецов С.В. д.ф.-м.н., проф. (Москва)	Хужаёров Б.Х. д.ф.-м.н., проф. (Самарканд)
Маликов З.М. д.т.н., проф. (Ташкент)	Хусанов Б.Э. д.т.н. (Ташкент)
Мамасаидов М.Т. д.т.н., проф., акад. НАН КР (Ош)	Шардаков И.Н. д.ф.-м.н., проф. (Пермь)
Мардонов Б.М. д.ф.-м.н., проф. (Ташкент)	Эргашов М. д.т.н., проф. (Ташкент)
Матвеев В.П. д.т.н., проф., акад. РАН (Пермь)	Ювмитов А.С. д.т.н., с.н.с. (Ташкент)

Адрес редакции:

*100125, Ташкент, Академгородок, Дурмон йули, 40.
Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева АН РУз*

*Телефон: +99855 520-02-45
+99855 520-04-46*

E-mail: instmechofficial@gmail.com

Технический редактор: Михайлова В.В.

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006 г.
Регистрационный номер 0050.

Номер одобрен на заседании редакционной коллегии журнала 25.12.2025

Сдано в набор 15.12.2025. Подписано в печать 29.12.2025.

Формат 60×84 1/8. Гарнитура Times New Roman. Ризография.

Усл.- печ. л. 6.5. Уч.-изд. л. 6.82. Тираж 130.

Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО “Munis design group”:

100170, г. Ташкент, ул. Буз-2, презд, дом 17-А.

МНОГОФАЗНЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДИСПЕРСНЫХ СМЕСЕЙ С ТУРБУЛЕНТНЫМИ ПОТОКАМИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Худайкулов С., Каниев Ж., Абдувахобов А.

Ташкентский международный университет Кимё, Ташкент, Узбекистан
E-mail: xudaykulov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается распределение малых возмущений при истечении дисперсной смеси из полуограниченной трубы в затопленное пространство, состоящее из другой дисперсной смеси. Получены распределения скоростей и давлений в обоих потоках дисперсных смесей.

Ключевые слова: дисперсная смесь, двухфазный поток, метод малых возмущений, устойчивость течения, модель рахматулина, колебания межфазной границы.

При истечении струи дисперсной смеси из трубы в затопленное пространство, наблюдается образование волн на поверхности раздела двух потоков; нарушается устойчивость потока, что приводит к распаду смеси жидкости на отдельные части [1,7]. С целью теоретического исследования устойчивости и условий потери устойчивости ниже применяется метод малых возмущений. Для модели дисперсной смеси обоих слоев выбрана модель взаимодействующих взаимопроникающих сред Х.А. Рахматулина [2,6].

Рассмотрим задачу об истечении дисперсной смеси вязких жидкостей из полу-бесконечной цилиндрической трубы радиуса R_0 в затопленное пространство. Цилиндрическая поверхность границы раздела потоков, состоящих из различных фаз дисперсной смеси, вследствие взаимодействия обеих слоев и фаз смеси, становится волнообразной [1].

Предположим, что при малых возмущениях возникают малые изменения динамических характеристик потока дисперсной смеси и формы образующей меняются в интервале:

$$L_0 (r_c(t) = R_0 \pm h(x,t)), R_0 \gg h(x,t).$$

Для задач о течении двухслойного потока дисперсной смеси в областях

$$G_1 \{0 < r < r_c(x,t)\}, 0 < x < \infty, G_2 \{0 < x < \infty, (R_0 - h(x,t)) < r < R_0 + h(x,t)\}$$

имеем соответствующие уравнения движения и неразрывности в виде [2,3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \hat{u}_n^{(m)}}{\partial t} + u_n^{(m)} \frac{\partial \hat{u}_n^{(m)}}{\partial x} &= - \frac{1}{\rho_{ni}^{(m)}} \frac{\partial p^{(m)}}{\partial x} + f_{no}^{(m)} \mu u_{n0}^{(m)} \nabla^2 \tilde{u}_n^{(m)} \\ \frac{\partial \tilde{v}_n^{(m)}}{\partial t} + u_n^{(m)} \frac{\partial \hat{u}_n^{(m)}}{\partial x} &= - \frac{1}{\rho_{ni}^{(m)}} \frac{\partial p^{(m)}}{\partial r} + f_{no}^{(m)} \mu u_{n0}^{(m)} \nabla^2 v_n^{(m)} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\partial(u_n^{(m)} r)}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}_n^{(mr)}}{\partial r} = 0 \tag{1}$$

$$f_1^{(m)} + f_2^{(m)} = 1, \quad \rho_n^{(m)} = \rho_{ni}^{(m)} \cdot f_n^{(m)},$$

$$\rho^{(1)} = \rho_1^{(1)} \cdot \rho_2^{(1)}, \quad \rho^{(11)} = \rho_1^{(11)} \cdot \rho_2^{(11)},$$

где $\rho_n^{(m)}, \rho_{ni}^{(m)}, f_n^{(m)}, \tilde{V}_n^{(m)}$ – приведенные и истинные плотности, и вектор скорости частиц объемной концентрации n -ой фазы дисперсной смеси в области G_m .

Рассматривается, что обе фазы дисперсной смеси в обоих слоях G_1 , и G_2 несжимаемы, а также концентрации постоянны:

$$\rho_{ni}^{(1)} = const, \quad \rho_{ni}^{(11)} = const,$$

$$f_n^{(1)} = const, \quad f_n^{(11)} = const.$$

Вводятся малые возмущения:

$$\begin{aligned} u_n^{(m)} &= u_n^{(m)} + \tilde{u}_n^{(m)}, v_n^{(m)} = \tilde{v}_n^{(m)}, \\ \rho_{ni}^{(m)} &= \dot{\rho}_{ni}^{(m)} + \tilde{\rho}_{ni}^{(m)}, f_n^{(m)} = f_{n0}^{(m)} + \tilde{f}_n^{(m)} \end{aligned} \quad (2)$$

Введем функции тока $\psi_n^{(m)}$ в виде, удовлетворяющем уравнению неразрывности (1).

$$\hat{u}_n^{(m)} = \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \psi_n^{(m)}}{\partial \hat{r}}, \quad \hat{v}_n^{(m)} = -\frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \psi_n^{(m)}}{\partial \hat{x}} \quad (3)$$

Проведем дифференцирование по \hat{r} и \hat{x} и другие преобразования. Уравнения (1) с учетом равенства (3) приводятся к виду:

$$\frac{\partial(D\psi_n^{(m)})}{\partial \tau} + u_{n0}^{(m)} \frac{\partial D\psi_n^{(m)}}{\partial \hat{x}} = \frac{v^{(m)}}{\text{Re}_0} D(\partial \psi_n^{(m)}) \quad (4)$$

$$x = R_o \hat{x}, r = R_o \hat{r}, \tilde{u}_n^{(m)} = u_0, v_n^{(m)} = V_o \hat{v}_n^{(m)},$$

где

$$u_0 = \max\{u_n^{(1)}; u_n^{(11)}\}; t = \frac{R_o}{V_o} \tau,$$

$$u_{no}^{(m)} = \frac{u_n^{(m)}}{u_o}, \quad \hat{v}_n^{(m)} = \frac{v_n^{(m)}}{v_o},$$

здесь

$$v_0 = \max\{v_n^{(m)}\}, \quad \text{Re} = \frac{v_0 R_o}{\gamma_0}.$$

Полученное уравнение эквивалентно уравнениям:

$$\frac{\partial \psi_n^{(m)}}{\partial \tau} + u_{n0}^{(m)} \frac{\partial \psi_n^{(m)}}{\partial \hat{x}} - \dot{v}_n^{(m)} D\psi_n^{(m)} = 0 \quad (5)$$

$$D\psi_n^{(m)} = 0 \quad (6)$$

$$\dot{v}_n^{(m)} = \frac{v^{(m)}}{\text{Re}_0}$$

С учетом равенства (6) вводим потенциал скорости и решение искомой задачи представим в виде [3]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{u}_n^{(m)} &= \frac{\partial \varphi_n^{(m)}}{\partial \hat{x}} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \hat{\psi}_n^{(m)}}{\partial \hat{r}} \\ \hat{v}_n^{(m)} &= \frac{\partial \varphi_n^{(m)}}{\partial \hat{r}} - \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \hat{\psi}_n^{(m)}}{\partial \hat{x}} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Функцию потенциала скорости и тока находим в виде:

$$\begin{aligned} \varphi_n^{(m)} &= R_n^{(m)}(r) \cdot \exp[i(k_o \hat{x} - \omega_o \tau)] \\ \psi_n^{(m)} &= F_n^{(m)}(r) \cdot \exp[i(k_o \hat{x} - \omega_o \tau)] \end{aligned} \quad (8)$$

где $k_0 = kR_0$, $\omega_0 = \omega \cdot u_0 / R_0$, k , ω – волновое число, ω – частота колебания.

Распределение скоростей и давлений в обоих слоях каждой фазы дисперсной смеси определяется из равенств:

$$\begin{aligned}
u_n^{(m)} &= \left\{ ik_o A_n^{(m)} I_0(k_o \hat{r}) + A_n^{(m)} K_0(k_o \hat{r}) - \lambda_n^{(m)} [C_n^{(m)} I_0(\lambda_n^{(m)} \hat{r}) - D^{(m)} \hat{K}_0(\lambda_n^{(m)} \hat{r})] \right\} \\
&\times \exp[(k_o \hat{x} - \omega_o \tau) i]. \\
v_n^{(m)} &= \left\{ k_o [A_n^{(m)} I_1(k_o \hat{r}) - B_n^{(m)} K_1(k_o \hat{r}) + ik_o [C_n^{(m)} I_1(\lambda_n^{(m)} \hat{r}) + D^{(m)} \hat{K}_1(\lambda_n^{(m)} \hat{r})] \right\} \\
&\exp[i(k_o \hat{x} - \omega_o \tau)] \\
P^{(m)} &= \left[\rho^{(m)} A^{(m)} I_0(k_o \hat{r}) + \rho^{(m)} C_0^{(m)} K_0(k_o \hat{r}) \right] [i\omega_o - K_0 u^{(m)}] \\
&\exp[i(k_o \hat{x} - \omega_o \tau)] + const.
\end{aligned} \tag{9}$$

где: $\rho^{(m)} A^{(m)} = \sum_{n=1}^2 \rho_n^{(m)} A_n^{(m)}$, $C^{(m)} \rho^{(m)} = \sum_{n=1}^2 \rho_n^{(m)} C_n^{(m)}$.

Коэффициенты $A_n^{(m)}$, $B_n^{(m)}$, $C_n^{(m)}$, $D_n^{(m)}$ определяются из граничных условий обоих слоев. Характеристические уравнения для волновых чисел имеют вид:

$$(\lambda_n^{(m)})^2 = k_o^2 - i \frac{\omega_o - k_o u_n^{(m)}}{V_n^{(m)}}. \tag{10}$$

В зависимости динамических и кинематических условий в потоке внешней среды и струи дисперсной смеси возникают различные характеристики волновых движений двухслойного потока и закрутка потока.

Закрутка потока проводится завихрителем, расположенным вблизи коаксиальных труб с радиусами R_1 , R_2 ($R_1 < R_2$). Течение ламинарное, стационарное, осесимметричное. У входа в зазор даются входные условия для гидродинамических параметров потока дисперсной смеси. Предполагается, что радиальные скорости каждой фазы смеси малы относительно тангенциальной и осевой скоростей. Каждая фаза жидкости несжимаемая, концентрации постоянны. В качестве модели дисперсной примеси принята модель многофазной взаимопроникающей взаимодействующей смеси сред Х.А. Рахматулина [5,6]. При этих предположениях уравнения движения и неразрывности в цилиндрических координатах в Озееновом приближении будут иметь вид:

$$\frac{\partial \hat{u}_{n\theta}}{\partial \hat{z}} = \frac{1}{\text{Re } \nu_1} \left[\frac{\partial^2 \hat{u}_{n\theta}}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \hat{u}_{n\theta}}{\partial \hat{r}} - \frac{\hat{u}_{n\theta}}{\hat{r}^2} \right] + k_{0n} (\hat{u}_{p\theta} - \hat{u}_{n\theta}) \tag{11}$$

$$\frac{\partial p}{\partial \hat{r}} = \frac{1}{\hat{r}} (\hat{\rho}_1 \hat{u}_{1\theta}^2 + \hat{\rho}_2 \hat{u}_{2\theta}^2)$$

$$\frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial^2 \hat{u}_{nz}^2}{\partial \hat{z}^2} = - \frac{\partial}{\partial \hat{z}} \left(\frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}} \right) + \frac{1}{\text{Re } \nu_1} \frac{\partial}{\partial \hat{r}} \left(\frac{1}{\hat{r}} \left(\frac{\partial}{\partial \hat{r}} \left(\hat{r} \frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}} \right) \right) \right) + k_{0n} (\hat{u}_{pz} - \hat{u}_{nz}),$$

где $\hat{u}_{n\theta} = \frac{\tilde{u}_{n\theta}}{V_{10}}$, $\hat{u}_{nz} = \frac{\tilde{u}_{nz}}{V_{10}}$, $\hat{u}_{nr} = \frac{\tilde{u}_{nr}}{V_{10}}$ V_{10} - средняя осевая скорость смеси, $u_{n\theta}$, u_{nr} , u_{nz} - компоненты вектора скорости частиц каждой фазы смеси.

$$\frac{\partial(\hat{r} \hat{u}_{nr})}{\partial \hat{r}} + \frac{\partial(\hat{r} \hat{u}_{nz})}{\partial \hat{z}} = 0 \quad V_{10} = \frac{f_1 \tilde{V}_{10} + f_2 \hat{\rho} \tilde{V}_{20}}{f_1 + \hat{\rho} f_2}, \tag{12}$$

где \tilde{V}_{k0} - средняя осевая скорость частиц каждой фазы у входа в трубу, $\hat{\rho} = \frac{\rho_{2i}}{\rho_{1i}}$, f_n , ρ_{ni} - объёмная концентрация и истинные плотности каждой фазы смеси [5-7].

Граничные условия (для свободного входа вихря).

При $z = 0$ $\hat{u}_{n\theta} = \frac{\Gamma_{n0}}{\hat{r}}$.

При $z = L$ $\hat{u}_{n\theta} = 0$, $\frac{\partial u_{nz}}{\partial \hat{r}} = 0$.

Введем в рассмотрение циркуляцию скорости $\Gamma_n = \hat{r}\hat{u}_{n\theta}$ и функцию момента осевой компоненты скорости n -ой фазы $\Phi_n = \hat{r} \frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}}$ и новую переменную $y = \frac{\text{Re } \hat{r}^2}{4\hat{z}}$. Тогда уравнения (1) и (3) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} y \left[\frac{v_n}{v_1} \Gamma_n'' + \Gamma_n' \right] - k_{0n} (\Gamma_n - \Gamma_s) &= 0 \\ y \left[\frac{v_n}{v_1} \Phi_n'' + \Phi_n' \right] - k_{0n} (\Phi_n - \Phi_s) &= y \frac{d\hat{u}_{n\theta}^2}{dy}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $v_n = \frac{\mu_n}{\rho_{ni}}$ - кинематические коэффициенты вязкости каждой фазы смеси. Для решения уравнения (6) с учётом условий (5) имеем:

$$\text{при } y \rightarrow \infty \Gamma_n = \Gamma_{n0}, \text{ при } y = y_1 \Gamma_n = 0, \text{ где } y_1 = \frac{\text{Re } \hat{r}^2}{4L}. \quad (14)$$

Решение уравнения (6) при малых коэффициентах взаимодействия имеет вид:

$$\Gamma_n = \Gamma_{n0} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_1}{v_n}(y_1 - y)\right) \right]$$

Откуда находим тангенциальную скорость n -ой фазы смеси:

$$\hat{u}_{n\theta} = \frac{\Gamma_{n0}}{\hat{r}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_1}{v_n}(y_1 - y)\right) \right].$$

Общее решение уравнения (11) получим в виде:

$$\Phi_n(y) = \exp\left(-\frac{v_1}{v_n}y\right) \left[\int \exp\left(\frac{v_1}{v_n}y\right) (c_{n3} - \hat{u}_{n\theta}^2) dy + c_{n4} \right].$$

Осевую скорость определяем из равенства

$$\hat{u}_{nz} = \frac{1}{\hat{r}} \int \Phi_n(y) \frac{dy}{y} + c_{n5} \quad (11)$$

Коэффициенты c_{n3}, c_{n4}, c_{n5} определяются из граничных условий:

$$\left. \frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}} \right|_{y \rightarrow \infty} = 0, \quad \left. \frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}} \right|_{y=y_1} = -4\hat{r} \quad \text{и} \quad \int_{R_1}^{R_2} \hat{u}_{nz} \hat{r} d\hat{r} = Q_n = \text{const} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Phi_n(y) &= \frac{v_1}{v_n} \frac{\Gamma_{n0}^2}{2\hat{r}^2} - \left(4\hat{r}^2 + \frac{v_1}{v_n} \frac{\Gamma_{n0}^2}{2\hat{r}^2} \right) \exp\left(-\frac{v_1}{v_n}(y_1 - y)\right) - \\ &- \frac{v_1}{v_n} \frac{\Gamma_{n0}^2}{2} \exp\left(-\frac{v_1}{v_n}y\right) \left[Ei\left(\frac{v_1}{v_n}y\right) - 2Ei\left(\frac{v_1}{v_n}y_1\right) + Ei\left(\frac{v_1}{v_n}(2y_1 - y)\right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

где $Ei(x)$ - интегрально-показательная функция [6] и при $\hat{z} \geq \frac{v_l Re}{v_n 32} \hat{r}^2$ имеет разложение

ряд по сдвинутым функциям Чебышева I рода $T_n^*\left(\frac{v_l y}{v_n 8}\right)$ в виде [8]:

$$Ei\left(\frac{v_l}{v_n} y\right) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n T_n^*\left(\frac{v_l y}{v_n 8}\right) - \left[\gamma + \ln\left(\frac{v_l y}{v_n 8}\right)\right],$$

γ - постоянная Эйлера-Маклорена, $T_n^*\left(\frac{v_l y}{v_n 8}\right) = T_n\left(\frac{v_l y}{v_n 4}\right) - 1$.

Радиальная скорость определяется из уравнения неразрывности (3) с учётом равенств (4), (10) и (12):

$$\hat{u}_{nr} = \frac{1}{\hat{r}} \left[\frac{Re}{4\hat{z}} \hat{u}_{nz} \left(\frac{Re}{4\hat{z}} - y \hat{u}_{nz}(y) - \int_{\hat{r}}^1 \hat{u}_{nz}(y) dy \right) \right] \quad (14)$$

Распределение давления в трубе определяется в виде:

$$P(y) = P_{\infty} - \int_y^{\infty} (\rho_1 u_{1\theta}^2 + \rho_2 u_{2\theta}^2) dy \quad (15)$$

Касательные напряжения определяются равенствами:

$$\tau_{nr\theta} = f_n \mu_n \left(\frac{\partial \hat{u}_{n\theta}}{\partial \hat{r}} - \frac{\hat{u}_{n\theta}}{\hat{r}} \right), \quad \tau_{nrz} = f_n \mu_n \left(\frac{\partial \hat{u}_{nz}}{\partial \hat{r}} - \frac{\partial \hat{u}_{nr}}{\partial \hat{z}} \right), \quad \tau_{nz\theta} = f_n \mu_n \frac{\partial \hat{u}_{n\theta}}{\partial \hat{z}}.$$

Пользуясь распределениями скоростей (10), (14) и давлений (15), можно определить диссипативную энергию потока дисперсной смеси в виде:

$$E_{дисп} = 2\pi \int_{R_1}^1 d\hat{r} \int_0^L N_{дисп} d\hat{z},$$

где: $N_{дисп} = 2\mu_n f_n \left[p_{nrr}^2 + p_{nzz}^2 + \tau_{n\theta\theta}^2 + \frac{1}{2} \tau_{nz\theta}^2 + \frac{1}{2} \tau_{nr\theta}^2 + \frac{1}{2} \tau_{nzz}^2 \right]$.

Коэффициент разложения определяется из табл. 1.

Таблица 1

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8 и далее
α_n	1.6739	1.2285	-0.3138	0.03178	-0.026	0.0067	-0.0016	0.00034	$\alpha_n \leq 10^{-4}$

Выводы:

1. При малых возмущениях возникают малые изменения динамических характеристик потока дисперсной смеси и формы образующей меняются в конкретных интервалах.

2. Скорость затухания вращательного движения смеси зависит от входных параметров и касательных напряжений, нарушается устойчивость потока, что приводит к распаду смеси жидкости на отдельные части.

3. Распределение скоростей и скорость изменения давлений в трубе зависит от входных параметров.

4. Появляются зоны резкого изменения осевой скорости, в продолжение которых и за пределами этой зоны поток перегруппируется в закрученный поток и происходит устойчивое движение смеси. Эти процессы происходят за счёт уменьшения тангенциальной скорости с удалением от входа в трубу.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гольдитик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск, 1981.
 [2] Гостинцев Ю.А., Покил П.Ф., Успенский О.А. Поток Громеко-Бельтрами в полу-бесконечной цилиндрической трубе // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. 1971, №2, стр. 3-10.

- [3] *Лышевский А.С.* Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками, Новочеркасск, 1961.
- [4] *Розанова Н.Н., Янгиев А.А.* Кинематические характеристики закрученного потока в цилиндрическом и конфузорных участках отводящего водовода высоконапорного вихревого шахтного водосброса // Труды М. ТМИ, 1990.
- [5] *Рахматулин Х.А.* Основы газовой динамики взаимодействующих движений сплошных сред // ПИММ. 1956, Т. 20, №2, стр. 184-195.
- [6] *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред, часть 1. 1978, 464 с.
- [7] *Хамидов А.А., Худайкулов С.И.* Теория смеси вязких жидкостей. Ташкент, Фан, 2003, 140 с.

Дата поступления
20.09.2025

Xudayqulov S., Kaniev J., Abduvakhobov A. Dispers aralashmalar turbulent oqimlar bilan o'zaro ta'sirlashganda ko'p fazali to'liqlar va ularning qo'llanilishi.

Annotatsiya. Dispers aralashmaning yarim cheksiz silindrik quvurdan boshqa dispers aralashma ichida (kichik qo'zg'alishli) tarqalish masalasi ko'tarilgan. Har ikkala qatlamdagi dispers aralashmalar tezliklar va bosimlar taqsimoti olinadi.

Kalit so'zlar: dispers aralashma, ikki fazali oqim, kichik buzilishlar usuli, oqim barqarorligi, rahmatulin modeli, fazalararo chegara tebranishlari.

Khudaykulov S., Kaniev J., Abduvakhobov A. Multiphase waves in the interaction of dispersed mixtures with turbulent flows applications.

Abstract. The distribution of small disturbances during the flow of a dispersed mixture from a semi-infinite pipe into a submerged space containing another dispersed mixture is examined. Velocity and pressure distributions in both dispersed mixture flows are obtained.

Keywords: dispersed mixture, two-phase flow, small disturbance method, flow stability, rakhmatulin model, interphase oscillations.

УДК. 532

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ 3D КРЫЛА ONERA M6 НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ SA И SST

Мадалиев М.Е.

*Ферганский государственный технический университет, Фергана, Узбекистан
E-mail: Madaliev.me2019@mail.ru, m.e.madaliyev@ferpi.uz*

Аннотация. В статье представлено исследование моделей турбулентности SA и SST в пакете программ Comsol Multiphysics для задачи обтекания стреловидного крыла с профилем ONERA M6 на участках размаха с углом атаки 3,06 градусов и числом Маха $M_\infty=0.84$. В работе для численной реализации уравнений турбулентности использован метод конечных элементов. Для стабилизации дискретизированных уравнений использована стабилизация по методу наименьших квадратов Галеркина. Полученные результаты сопоставлены с результатами экспериментальных данных. Результаты модели турбулентности SA показали лучшую сходимость с экспериментальными данными, чем модель SST.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, отрывное течение, модель SST, модель SA, Comsol Multiphysics, NASA.

Введение. В современном мире моделирование аэродинамических характеристик играет важную роль в разработке и оптимизации различных летательных аппаратов. Одним из ключевых инструментов в этой области является использование компьютерных программ для создания трехмерных моделей и проведения численного анализа. В данном контексте особое внимание привлекает 3D модель крыла ONERA M6, разработанная Французским национальным центром аэрокосмических исследований (ONERA). ONERA M6 является одним из наиболее широко используемых стреловидных крыльев в аэродинамическом сообществе для проверки и сравнения различных численных методов и программных средств [1–5]. Ее особенность заключается в сложной геометрии, которая включает в себя комбинацию угловых и криволинейных поверхностей. Эта модель предоставляет уникальную возможность проверить точность и эффективность методов расчета аэродинамических характеристик [6–8].

Для проведения численного анализа аэродинамических характеристик модели ONERA M6 широко применяются различные методы вычислений, включая метод конечных объемов (Finite Volume Method, FVM) [9], метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [10], метод конечных разностей (Finite Difference Method, FDM) [11] и другие. Однако, в последние годы наибольшее внимание уделяется методам высокого порядка точности, таким как метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) на основе па-

СОДЕРЖАНИЕ

K.C.Султанов, М.М.Мирсаидов, А.Нуьмонов, З.Уразмухамедова. Напряженное состояние Кызылсайской грунтовой плиты под действием статических нагрузок	3
М.К.Усаров, Д.К.Шамсиев, Ф.А.Усанов. Продольные колебания многоэтажного здания с пространственным фундаментом на основе континуальной пластинчатой пространственной модели	11
З.Сирожидинов, Х.А.Гуломова. Вероятностно-статистический анализ результатов испытаний прочности бетона.....	21
К.Мамасолиев, Э.А.Исмоилов. Математическое моделирование продольно-радиальных колебаний трансверсально-изотропных цилиндрических оболочек, нестационарно взаимодействующих с внутренней вязкой жидкостью.....	30
Ш.И.Норматов. Определение минимального коэффициента устойчивости откосов грунтовых плотин методом кругло-цилиндрической поверхности скольжения с применением автоматизированного алгоритма нахождения центра окружности.....	38
А.Э.Кудратов. Устойчивость упругого стержня с гасителями колебаний при поперечных колебаниях.....	47
Ф.А.Усанов. Оценка напряженно-деформированного состояния пластины под действием касательных нагрузок на основе бимоментной теории.....	54
Б.Х.Хужаёров, Ж.Р.Туйгунов. Задача аномальной фильтрации жидкости в кусочно-неоднородной пористой среде.....	60
С.Худайкулов, Ж.Каниев, А.Абдувахобов. многофазные волны при взаимодействии дисперсных смесей с турбулентными потоками и их применение.....	71
М.Е.Мадалиев. Численный анализ 3d крыла Onera M6 на основе моделей турбулентности SA и SST.....	76
Д.С. Яхшибаев. Динамика перемешивания стратифицированных потоков туямуянского водохранилища.....	82
Т.Р.Пулатов, Ж.А.Умрзоков. Математическое моделирование движения жидкости в гидроаккумуляторе гидрорекуперационной тормозной системы.....	86
Г.А.Юсупходжаева, Д.С.Бекчанова. Технология по производству смесовой пряжи из вторичных отходов натурального шелка.....	91
Ш.Т.Равутов. Обоснование параметров зубчатого привода хлопкоуборочного аппарата, оснащенного малогабаритными эллиптическими барабанами	96
О.С. Норкузиев. Расчетный анализ процесса съема хлопка со шпинделей хлопкоуборочных машин.....	103
Л.Э.Турсунбоев. Определение сил реакции опор прижимного устройства шлифовальной машины.....	110
Абдукаримов А., Рахмонов Х.Н. Синтез комбинированных зубчато-рычажных дифференциальных передаточных механизмов.....	117
Д.М.Мухаммадиев, Х.А.Ахмедов, Б.Х.Примов, О.Х.Абзоиров. Экспериментальное исследование привода пильного волоконотделителя с семяотводящим устройством.....	130

MUNDARIJA

K.S.Sultanov, M.M.Mirsaidov, A.Nu'monov, Z.Urazmuhamedova. Qizilsoy gruntli to'g'onining statik kuchlar ta'sirida kuchlanishini baholash.....	3
M.K.Usarov, F.A.Usanov, D.K.Shamsiyev. Kontinual plastinali fazoviy model asosida fazoviy poydevorga ega ko'p qavatli binoning bo'ylama tebranishlari	11
Z.Sirojiddinov, X.A.Gulomova. Beton mustahkamligi sinovlari natijalarining ehtimollik-statistik tahlili.....	21
K.Mamasoliyev, E.A.Ismoilov. Ichki qovushoq suyuqlik bilan o'zaro nostatsionar ta'sirlashuvchi transversal-izotrop silindrik qobiqning bo'ylama-radial tebranishlarini matematik modellashtirish	30
Sh.I. Normatov. Aylana markazini avtomatlashtirilgan aniqlash algoritmini qo'llab, gruntli to'g'on qiyaliklari ustuvorligini minimal ustuvorlik koeffitsiyentini doiraviy-silindrik siljish sirti usuli bilan aniqlash	38
A.E. Kudratov. Dinamik so'ndirgichlar o'rnatilgan elastik sterjenning ko'ndalang tebranishlari ustuvorligi.....	47
F.A. Usanov. Bimoment nazariyasi asosida urinma yuklar ta'siridagi plastinaning kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini baholash.....	54
B.Xujayorov, J.R.Tuyg'unov. Bo'lakli bir jinsli bo'lmagan g'ovak muhitda suyuqliklarning anomal sizish masalasi.....	60
S.Xudayqulov, J.Kaniev, A.Abdurahobov. Dispers aralashmalar turbulent oqimlar bilan o'zaro ta'sirlashganda ko'p fazali to'lqinlar va ularning qo'llanilishi.....	71
M.E. Madaliyev. SA va SST turbulent modeli asosida Onera M6 3D qanotining sonli tahlili	76
D.S. Yaxshiboyev Tuyamuyun suv omboridagi qatlamli oqimlar dinamika aralashishi.....	82
J.A.Umrzoqov, T.R. Pulatov. Hidroreperativ tormoz tizimidagi gidroakkumulyator ichidagi suyuqlik harakatini matematik modellashtirish	86
G.A.Yusupxodjayeva, D.S.Bekchanova. Tabiiy ipakning ikkilamchi chiqindilaridan aralash yigirilgan ip ishlab chiqarish texnologiyasi	91
Sh.T. Ravutov. Kichik gabaritli elliptik barabanlar bilan jihozlangan paxta terish apparati tishli yuritmasi parametrlarini asoslash ...	96
O.S.Norqo'ziyev. Paxta terim mashinalarining shpindel yuzasidagi paxta o'ramidan tozalash jarayonining hisobiy tahlili.....	103
L.E. Tursunboyev. Jilvirlash mashinasi uzatuvchi qurilmasining tayanchlaridagi reaksiya kuchlarini tadqiq qilish.....	110
A.Abdukarimov, X.N. Raxmonov. Kombinatsiyalangan tishli-richagli differensial uzatish mexanizmlarini sintez qilish.....	117
D.M.Muhammadiyev, H.A.Axmedov, B.X.Primov, O.X. Abzoirov. Chigiti chiqaruvchi qurilmali arrali tola ajratgich harakat uzatish tizimining eksperimental tadqiqoti.....	130