

Заключение. Представленные в работе прогрессивные конструкции инструментов для упрочняющей обработки отверстий, валов и плоских поверхностей, а также разработанная классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения позволяют выбрать наиболее приемлемую конструкцию инструментов для применения в условиях производства при решении технологических задач повышения долговечности выпускаемых изделий.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довгалев, А.М. Основы классификации способов и инструментов для ППД в магнитном поле / А.М. Довгалев // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. –113 с.
2. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое упрочнение плоских поверхностей / А.М. Довгалев, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирипа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Бел. – Рос. ун-т, 2007. – Ч.1. –93 с.
3. Пат. 2052331 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Способ поверхностного пластического деформирования поверхности вращения и инструмент для его осуществления/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4854644/08. Заявлено 27.07.90; Опубл. 20.01.96, Бюл.№2.-бс.; ил.
4. Пат. 2000918 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4855503/27. Заявлено 30.07.90; Опубл. 15.10.93, Бюл.№37-38.-4с.; ил.
5. Пат. 2068769 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4733445/08. Заявлено 28.08.89; Опубл. 10.11.96, Бюл.№31.-4с.; ил.
6. Пат. 2003455 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4941052/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл.№43-44.-4с.; ил.
7. Пат. 2047470 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4732047/08. Заявлено 22.08.89; Опубл. 10.11.95, Бюл.№31.-3с.; ил.
8. Пат. 1815190 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №473323283/27. Заявлено 28.08.89; Опубл. 15.05.93, Бюл.№18.-3с.; ил.
9. Пат. 2077416 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/ А.М. Довгалёв (РБ). - №4871873/02. Заявлено 08.10.90; Опубл. 20.04.97, Бюл.№11.-3с.; ил.
10. Пат. 2000918 РФ, МКИ⁶ В24В39/04. Инструмент для поверхностного пластического деформирования / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4855503/27. Заявлено 30.07.90; Опубл. 15.10.93, Бюл. № 37-38.– 4с.; ил.
11. Пат. 2003458 РФ, МКИ⁶ В24В39/04. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4941049/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. № 43-44. - 4с.; ил.
12. Пат. 2003459 РФ, МКИ⁶ В24В39/04. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4941987/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. № 43-44. - 4с.; ил.
13. Пат. 2047470 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования / А.М. Довгалёв (РБ). - № 4732047/08. Заявлено 22.08.89; Опубл. 10.11.95, Бюл. №31. - 4с.; ил.
14. Пат. 2003456 РФ, МКИ⁶ В24В39/02. Инструмент для поверхностного пластического деформирования/А.М. Довгалёв (РБ).- №4941052/27. Заявлено 03.06.91; Опубл. 30.11.93, Бюл. №43-44.-4с.; ил.
15. Пат. 10188 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20050605; заявл. 16.06.2005; опубл. 28.02.2008.
16. Пат. 10065 РБ, МПК В 24В 39/02. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20050604; заявл. 16.06.2005; опубл. 30.12.2007.
17. Пат. 11531 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Свирипа, Д.М. Рыжанков; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20060637; заявл. 27.06.2006; опубл. 28.02.2008.
18. Пат. 11536 РБ, МПК В 24В 39/00. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / А.М. Довгалев, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирипа; заявитель и патентообладатель Бел.–Рос. ун-т. - № а20060760; заявл. 20.07.2006; опубл. 28.02.2009.

Материал поступил в редакцию 11.03.09

DOVGALEV A.M., SUCHOCKIJ S.A., SVIREPA D.M., RYZANKOV D.M. Tools for magnetic-dynamic hardening of surfaces of details of machines

In clause the items of information on magnetic-dynamic hardening of a superficial layer of details of machines are submitted, at which plastic warping of a surface carry out warping by elements at the expense of influence on them by a rotated constant or variable magnetic field. For realization of a method the developed classification circuit of existing versions of tools is given. The original designs of tools for durability of processing of apertures, outside surfaces of rotation and flat surfaces are submitted.

УДК 539.3

Сорко С.А., Якушевич С., Хвусевич В.М.

АНАЛИЗ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОТОКА В ТРУБАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Введение. Ламинарные, турбулентные, пульсирующие потоки в трубах являются одними из основных потоков с периодическими изменениями во времени скорости и давления, которые привлекли существенное внимание в области механики жидкости за последние годы. Существуют многочисленные аналитические, численные и экспериментальные исследования в этом направлении. Известно, что такие потоки имеют практическое значение в различных областях: механических разработках, нанотехнологиях, биологии и т.д., которые подобны процессам течения жидкости в случае ламинарных, турбулентных и пульсирующих потоков в трубах.

Большинство работ, посвященных таким исследованиям доступно лишь для течений с приведенным давлением, то есть для ламинарного, турбулентного, пульсирующего потоков в трубах с давлением, изменяющимся во времени.

Формулировка проблемы. В ламинарных однонаправленных потоках несжимаемой и вязкой Ньютонской жидкости через длинные прямые трубы произвольного сечения формируется единственный, не исчезающий компонент скорости в направлении трубопровода (рис. 1).

Сорко Словомир Адам, зав. кафедрой Белостоцкого технического университета, Республика Польша.

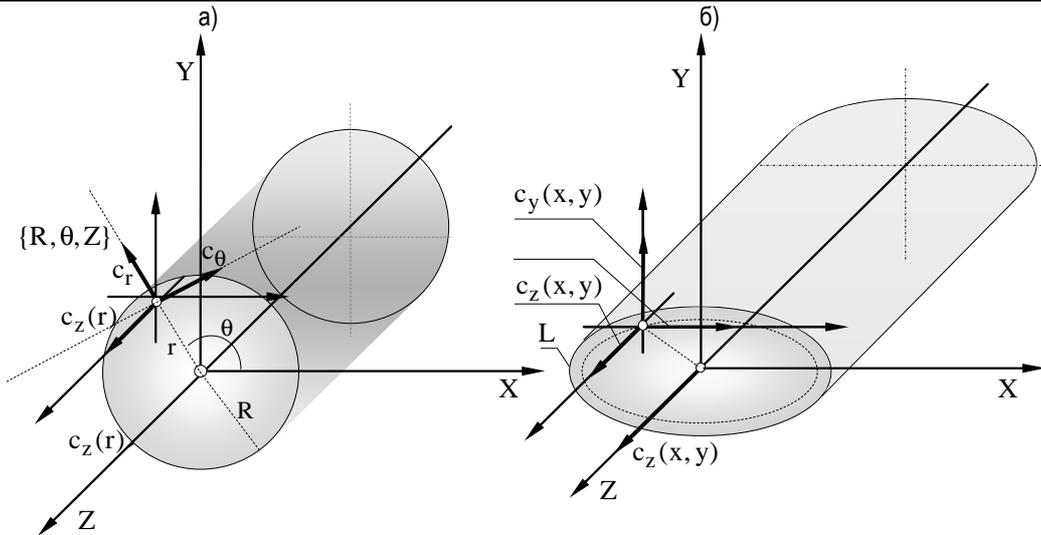


Рис. 1. Однонаправленный поток через трубу:
(а) сечение круглой формы,
(б) сечение произвольной формы

В случае колебательного ламинарного движения Ньютоновской жидкости через прямые трубопроводы формируется осесимметричный поток (рис. 1б) и тогда радиальные и периферийные компоненты скорости будут равны нулю; в отсутствии существенных гравитационных эффектов для компоненты скорости c_z справедливо уравнение [1]:

$$\frac{\partial c_z}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c_z}{\partial r} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

с граничным условием:

$$c_z(R, t) = 0 \quad (1^*)$$

и градиентом напряжений:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -[P_0 + P_\omega \exp(i\omega t)] \quad (1^{**})$$

В случае круглой формы трубопроводов проблема может быть решена аналитически.

Решение для радиальной скоростной компоненты $c_z(r, t)$ приводится в [2]:

$$c_z(r, t) = \Re \left[\frac{P_0}{4\mu} (R^2 - r^2) + \frac{R^2}{\mu W_0^2} \left(1 - \frac{J_0(\sqrt{-i} \cdot W_0 \frac{r}{R^2})}{J_0(\sqrt{-i} \cdot W_0)} \right) P_\omega \exp(i\omega t) \right], \quad (2)$$

где R – радиус трубы, $J_0(\cdot)$ является Бесселевой функцией первого рода нулевого порядка

$$J_0\left(\sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}} r\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{-i\omega}{\nu}} r\right)^{2n} \quad (2^*)$$

и коэффициент W_0 , известный как число Womersley, определяется из выражения $W_0 = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} R$.

Это может интерпретироваться или как отношение колебательной вязкой силы инерции, или как число Рейнольдса для потока, используя ωR как скоростной масштаб.

Обобщенное уравнение жидкого движения внутреннего неустойчивого однонаправленного потока вязкой и несжимаемой жидкости с низким числом Рейнольдса удовлетворяется, если справедливо уравнение [3]:

$$\rho \frac{\partial c_z}{\partial t} - \mu \left(\frac{\partial^2 c_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_z}{\partial y^2} \right) + \wp(x, y) = 0 \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями:

$$c_z(x, y; 0) = 0; \quad (x, y) \in (\Lambda)$$

$$c_z(x, y; t) = \tilde{c}_z(x, y; t); \quad (x, y) \in (L) \quad (3^*)$$

где $\wp(x, y)$ обозначает градиент напряжений.

В случае колебательного движения под давлением, при пульсирующем управляемом потоке, скорость и градиент давления могут быть выражены как реальная или воображаемая часть сложной функции:

$$c_z(x, y; t) = c_z^*(x, y) \exp(i\omega t), \quad (3a)$$

$$\wp(x, y) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = -P(x, y) \cos(\omega t), \quad \text{где } P = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (3b)$$

где ω – угловая частота колебаний, $c_z^*(x, y)$ – постоянная амплитуда колебательного движения и $P(x, y)$ – амплитуда колебания давления.

Замена выражений (3a) (3б) в уравнение (3) позволяет получить уравнения Brinkмана:

$$\left(\frac{\partial^2 c_z^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_z^*}{\partial y^2} \right) - i \frac{\omega}{\nu} c_z^* + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

с граничным условием:

$$c_z^*(x, y) = 0 \quad (x, y) \in (L) \quad (4^*)$$

которое должно быть решено вместе с уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial c_z^*}{\partial x} + \frac{\partial c_z^*}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Интегральное решение задачи

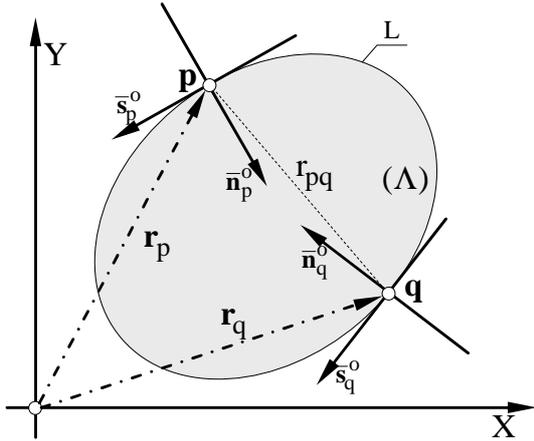


Рис. 2 а. Область (Ω) с границей (L) Эскиз для eqs. (4), (5)

Интегральное решение дифференциального уравнения (4) с граничным условием (4*) может быть представлено во форме:

$$g_z^*(p) + \int_{(L)} g_z^*(q) K(p, q) dL_q = P \iint_{(\Lambda)} E(r_p, r_q) d\Lambda_q, \quad (6)$$

где $g_z^*(q) = \frac{\partial c_z^*(q)}{\partial n} \Big|_q$, $K(r_p, r_q)$ ядро, интегральная функция

$E(r_p, r_q)$ – функция Кельвина первого рода нулевого порядка:

$$K(p, q) = \frac{1}{2\pi} \left[\ker_0 \left(\frac{1}{r_{pq}} Wo_{pq} \right) + i \text{kei}_0 \left(\frac{1}{r_{pq}} Wo_{pq} \right) \right]; \quad (6a)$$

$$r_{pq} = |p - q|$$

$$E(p, q) = \frac{\partial K(p, q)}{\partial n} \Big|_q, \quad (6b)$$

где $Wo_{pq} = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} r_{pq}$ обозначает число Womersley.

Численное решение интегральных уравнений

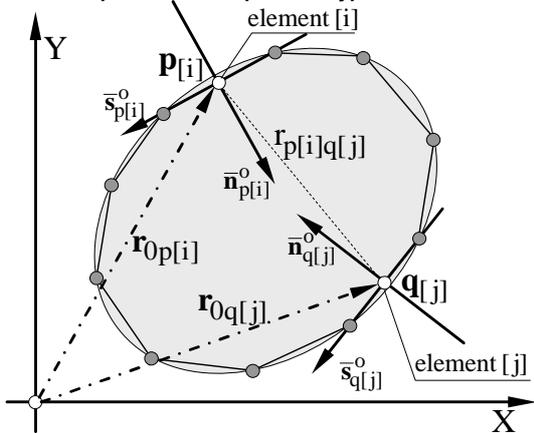


Рис. 2 б. Дискретизация границы (L)

Приближение интегралов по границе (L) с суммой интегралов по прямым элементам линии $L_{[j]}$; $j = \overline{1, J}$, на которых функция $g_z^*(q_{[j]})$ $j = \overline{1, J}$ является постоянной дискретная формулировка интегрального уравнения (6) приводит к системе линейных уравнений:

$$\Re \sum_{j=1}^J g_z^*(q_{[j]}) \int_{(L_{[j]})} K(p_{[i]}, q_{[j]}) dL_{q_{[j]}} = \Re \sum_{j=1}^J P \iint_{(\Lambda_{[j]})} E(r_{p_{[i]}, r_{q_{[j]}}) d\Lambda_{q_{[j]}}. \quad (7)$$

В уравнении (7) обозначение (ℜ) показывает реальные части сложного ядра (6a) и функции (6b).

Интегралы в системе линейных уравнений (7) могут быть вычислены, используя метод косвенной дискретизации области, предложенной в [4].

После определения функции $g_z^*(p_{[i]}) = \left(\frac{\partial c_z^*(p)}{\partial n} \right) \Big|_{[i]}$;

$i = \overline{1, I}$ $p \in (L)$ в точках коллокации на граничном элементе скорости определяются в дискретной форме по формуле (6).

Пример колебательного потока в поперечном сечении овальной трубы. Колебание приведенного давлением однонаправленного ламинарного потока несжимаемой и вязкой жидкости для числа Womersley $Wo=1.0$ и $Wo=8.0$: (рис. 3а) и (рис. 3б) в трубе овального поперечного сечения:

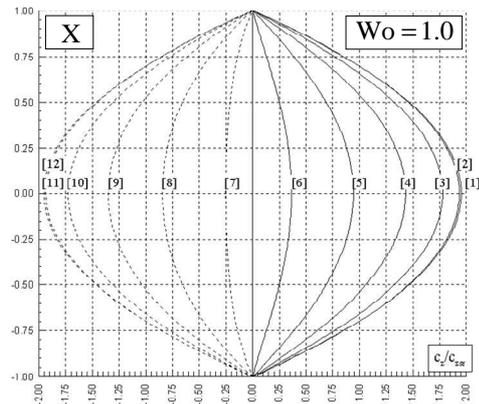


Рис. 3 а. Колебющийся поток $Wo=1.0$, скоростной профиль $c_z(x, y, t)$, коэффициент напряжений $\varphi/2\mu = 1$, (эллипс $a=2, b=1$) сечения $\{Z, Y=0\}$

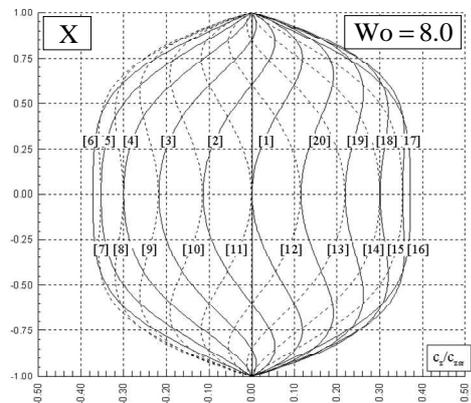


Рис. 3 б. Колебющийся поток $Wo=8.0$, скоростной профиль $c_z(x, y, t)$, коэффициент напряжений $\varphi/2\mu = 1$, (эллипс $a=2, b=1$) сечения $\{Z, Y=0\}$

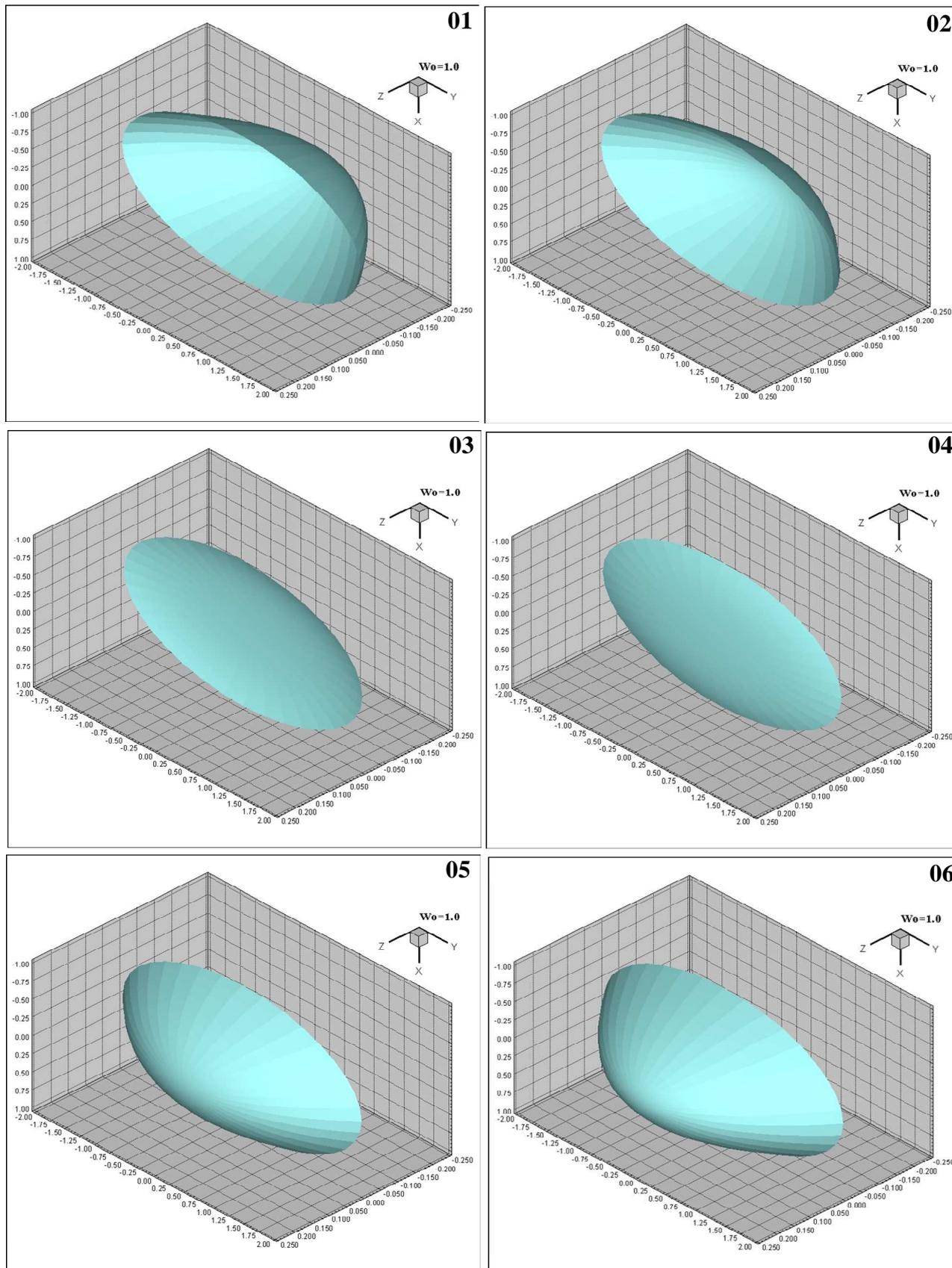


Рис. 4 а. Колеблющийся поток $Wo=1.0$,
 скоростной профиль $c_z(x, y, t)$,
 коэффициент напряжений $\varphi/2\mu = 1$

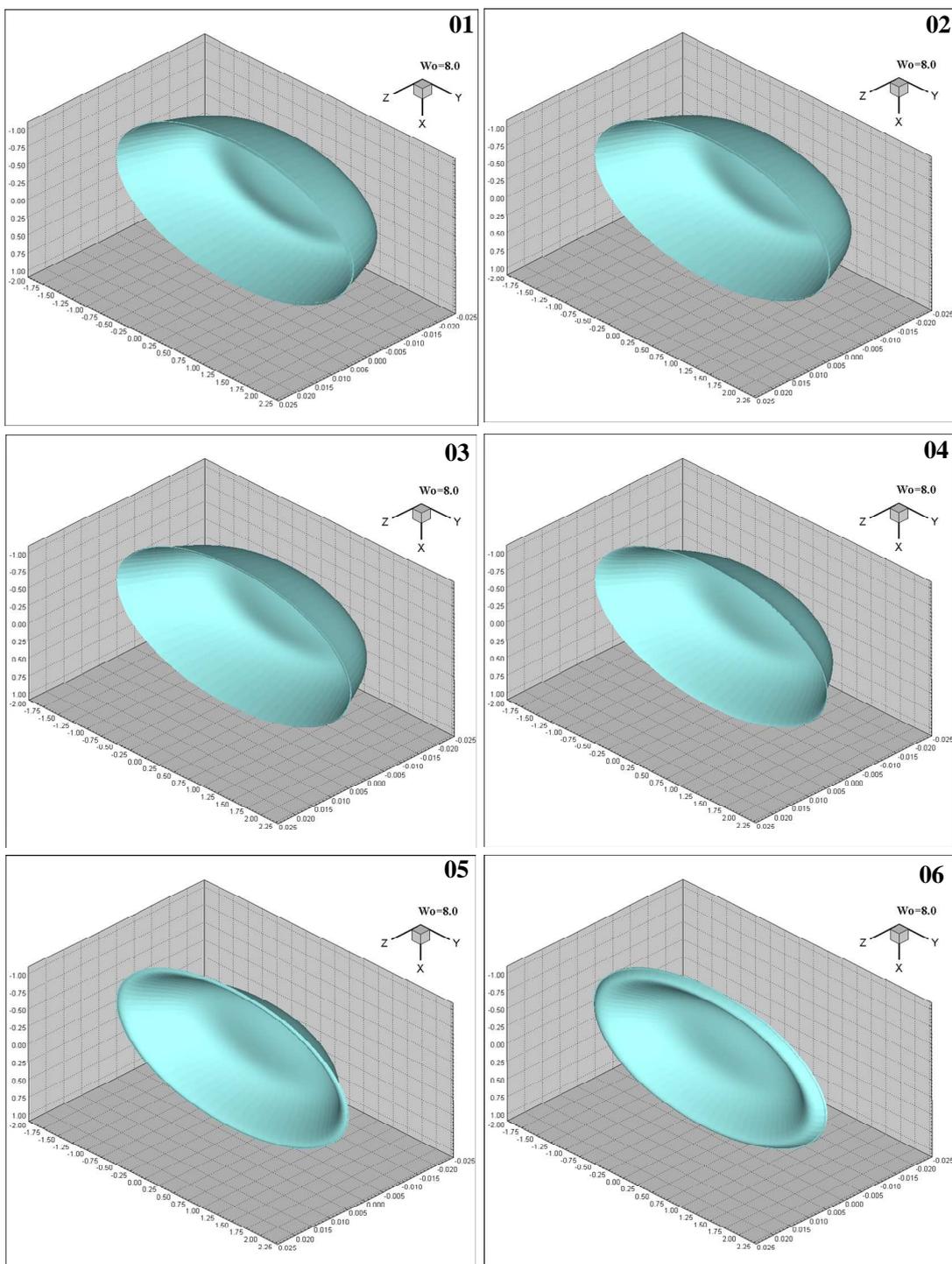


Рис. 4 б. Колеблющийся поток $Wo=8.0$,
 скоростной профиль $c_z(x, y, t)$,
 коэффициент напряжений $\varphi/2\mu = 1$

На графических диаграммах (рис. 4а) (01-06) и (рис. 4б) (01-06) представлены выбранные стадии колебательного движения, показанного на рисунках (рис. 3а) и (рис. 3б) для числа Womersley $Wo=1.0$ и $Wo=8.0$.

Заключение. Построены и численно реализованы интегральные уравнения механики жидкости при движении пульсирующих потоков в прямолинейных трубах различных поперечных сечений.

Предложен способ исследования потоков, созданных пульсацией давления и вибрацией трубы в направлении потока.

Спрогнозировано поведение жидкости в зависимости от соответствующего спектра её частоты и вязкости.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Spurk J.H. Fluid Mechanics Springer, 1997.
2. Fedele F., Hitt D.L., Prabhu R.R. Revisiting the stability of pulsatile pipe flow European Journal of Mechanics B/Fluids 24, 2005.

3. Lions P.L. *Mathematical Topics in Fluid Mechanics* Oxford Sc. Publ., 1996.
4. Rynkowski P. *Metoda elementów brzegowych z pośrednią dyskretyzacją obszaru w rozwiązywaniu zagadnień przewodzenia ciepła* D.Ph. thesis, Białystok Technical University, 2008.

Материал поступил в редакцию 22.10.09

SORKO S.A., YAKUSHEVICH S., CHVISEVICH V.M. The analysis of a varying flow in pipes by method of the boundary integrated equations

In the work, a solution to a problem of oscillatory flow of viscous incompressible liquid in a rectilinear pipe of an arbitrary cross-section shape, completely filled with the liquid was presented.

The way of solving flow generated by pressure pulsation and the pipe oscillation to the flow direction was also-discussed.

The behaviour of the liquid for the selected spectrum of its frequency and viscosity-was further analysed.