

## МЕХАНИКА

УДК 533.17

DOI: 10.31429/vestnik-15-4-17-23

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В КАНАЛЕ С ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ

Валеев А. А., Снигерев Б. А.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF TURBULENT FLOW STRUCTURE IN A CHANNEL WITH SUDDEN EXPANSION

A. A. Valeev, B. A. Snigerev

Institute of Mechanics and Engineering - Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan, 420111, Russia  
e-mail: valei93@mail.ru

*Abstract.* Separation flows are common in many process units, so the question of modeling these flows is relevant to date, just as the search for the most suitable turbulence models for them. In this paper, the structure of a viscous incompressible turbulent flow in a channel with sudden expansion was calculated. To compare the results, the experimental data were taken. The mathematical model is based on the use of the Reynolds averaged Navier-Stokes equation, represented in the Eulerian form. To obtain the results of numerical simulation, the  $k-\epsilon$  turbulence model is chosen. The solution of the task was carried out by the finite volume method in the open package OpenFOAM. The procedure for constructing grids is worked out, where among the three is selected with a rational grid step. The obtained velocity results showed the best result when compared with experiment. The values of turbulent kinetic energy have good indices, however, some disagreements between the data of theory and experiment are observed at the wall in some sections. The reduced pressure coefficient, whose data is obtained along the bottom wall of the channel, showed a deviation of the values towards the obstacle, which is the starting point for future studies and model properties. The attachment area has a length comparable with the results of the experiment. Comparison of the results of numerical simulation with experimental data has shown that this model satisfactorily describes separation currents, and the proposed approach is relevant for the simulation of turbulent flows.

*Keywords:* separation flow, turbulent motion, numerical method.

## Введение

Отрывные течения до сих пор сохраняют интерес для изучения, они присутствуют во многих технологических установках, компрессорах и турбинах, возникают при движении летательных аппаратов, кораблей и других транспортных средств. Подобного рода процессы оказывают влияние на теплообмен, скорость, давление в пристенных областях. Вибрации и шум относятся к негативным явлениям, из-за которых отрывные потоки носят нежелательный характер, но в некоторых случаях их добиваются намеренно [1, 2].

Задача обтекания внезапного расширения является классической задачей, в ней присутствуют характерные для нее зоны: отрыва потока от кромки уступа, присоединения потока к стенкам канала и вихреобразования.

Область рециркуляции, изменение ее длины и формы, количество образующихся вихрей во многом зависят от высоты уступа и числа Рейнольдса.

Изучению отрывных потоков посвящено множество отечественных и зарубежных работ, проведено немало экспериментов. В работе [3] экспериментально исследовано воздействие формы и размеров преграды на отрывное течение и теплообмен, представлены результаты исследования и сравнительного анализа гидродинамической структуры отрывного потока за ребром и уступом, исследована структура течения во вторичной вихревой зоне. Авторы [4] провели экспериментальное исследование характеристик течения воздушного потока в канале с внезапным расширением, получены профили средней скорости

Валеев Айдар Ахатович, аспирант лаборатории моделирования технологических процессов Института механики и машиностроения ФИЦ «КазНЦ РАН»; e-mail: valei93@mail.ru

Снигерев Борис Александрович, д-р тех. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования технологических процессов Института механики и машиностроения ФИЦ «КазНЦ РАН»; e-mail: snigerev@imm.knc.ru

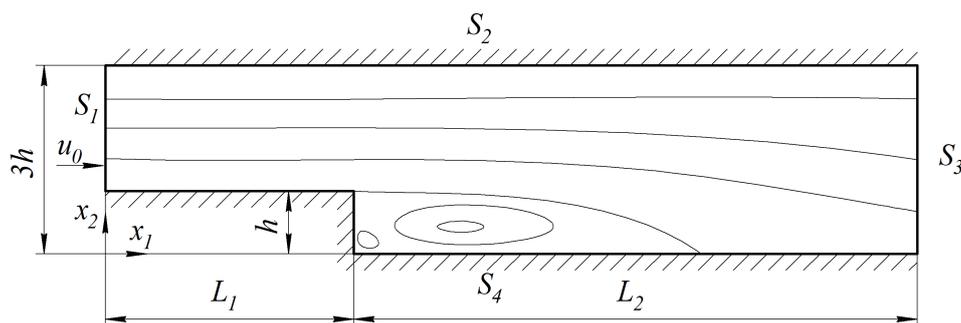


Рис. 1. Расчетная схема канала с внезапным расширением

потока, пульсаций скорости, изменения турбулентности и скорости обратного течения, выполнен также расчет, удовлетворительно совпавший с экспериментом. В эксперименте [5] исследованы характеристики потока в отрывном сдвиговом слое, зоне рециркуляции, зоне восстановления потока.

Важным остается вопрос моделирования отрывных течений. Авторами [6] разработан алгоритм для решения плоских стационарных задач движения вязкой несжимаемой жидкости, предложен способ экстраполяции расчетных величин на границу. В работах [7] приведены решения для задач стационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале при различных числах Рейнольдса, выявлена нестандартная структура первичного вихря за уступом и наличие многочисленных центров вращения как внутри вихря, так и в пристенной области под ним, показан рост центров вращения в первичной рециркуляционной зоне вместе с увеличением значения числа Рейнольдса. Авторы [8–11] представили результаты численного моделирования течений методом конечных объемов с использованием различных моделей турбулентности.

Подход к численному описанию турбулентного переноса основан на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS). Данный метод известен низкими требованиями к ресурсам ЭВМ, что делает его наиболее доступным на сегодняшний день. Для уравнения осредненного турбулентного движения точность описания течений зависит от использованной модели турбулентности. В данном исследовании использована модель  $k - \epsilon$ . Работа посвящена численному исследованию структуры потока во внезапном расширении канала, полученные данные

сопоставлены с экспериментальными данными.

### 1. Постановка задачи

Рассматривается движение двумерного турбулентного стационарного потока вязкой несжимаемой жидкости с постоянными характеристиками плотности  $\rho$  и динамическим коэффициентом вязкости  $\mu$  в канале с внезапным расширением. На рис. 1 показана схема течения:  $h$  — высота уступа,  $L_1$  — длина канала перед внезапным расширением,  $L_2$  — длина канала за внезапным расширением. Обозначение границ:  $S_1$  — входная граница,  $S_2$  — верхняя стенка,  $S_3$  — выходная граница,  $S_4$  — нижняя стенка,  $u_0$  — средняя скорость потока, заданная по всей поверхности участка  $S_1$ .

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1.1)$$

Уравнение Навье–Стокса, осредненное по Рейнольдсу имеет вид

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - u_i u_j \right], \quad (1.2)$$

$$-u_i u_j = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad i, j = 1, 2. \quad (1.3)$$

где  $u_i$  — компоненты вектора скоростей,  $p$  — давление,  $\rho$  — плотность вещества,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\nu_t$  — турбулентная вязкость.

Классическая  $k - \epsilon$  модель, где  $k$  — кинетическая энергия турбулентности,  $\epsilon$  — скорость

турбулентной диссипации, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \\ &= P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \epsilon, \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \\ &= P_\epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где

$$P_k = \nu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 \right],$$

$$P_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k.$$

Постоянные константы модели:  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\epsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\epsilon 2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1,3$ .

Связь турбулентной вязкости с двухпараметрической  $k - \epsilon$  моделью турбулентности (1.4)–(1.5) дает формула Колмогорова

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (1.6)$$

На стенках канала (границы  $S_2, S_4$ ) используются граничные условия прилипания частиц вязкой жидкости к твердой стенке. На выходе из канала  $S_3$  граничное условие свободного выхода.

## 2. Методы решения

OpenFOAM — один из наиболее перспективных пакетов с открытым кодом, который представляет собой набор библиотек, решателей и утилит. Для получения результатов численного моделирования был выбран алгоритм simpleFOAM, применяемый для стационарных несжимаемых, турбулентных потоков и широко используемый при численном решении уравнений Навье–Стокса [12].

В данном методе расчетная область разбивается на конечное число контрольных объемов так, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальное уравнение интегрируется по каждому из контрольных объемов. Для вычисления интегралов используются кусочные профили, описывающие изменение переменной между

узловыми точками. В результате получается дискретный аналог дифференциальных уравнений, в который входят значения переменной в некоторых узловых точках [13]. Для решения системы линейных уравнений давления был использован метод предварительно сопряженных градиентов, где начальное приближение задавалось многосеточным методом, со сглаживанием Гаусс–Зейделя. В качестве метода решения системы линейных уравнений для скорости выбран метод предварительно бисопряженных градиентов с предобуславливателем, основанным на неполной LU-факторизации.

## 3. Результаты расчетов

Экспериментальные данные получены в аэродинамической трубе [5]. Установка состоит из фильтрующего элемента, диффузора, двух испытательных секций, комплекта микроанометров, трубчатых статических датчиков давления и термоанометров. Газ, проходящий через фильтрующий элемент, поступает в диффузор с размерами 1371,6 мм к 76,2 мм. За диффузором расположена первая испытательная секция для сглаживания потока перед внезапным расширением, сконструированным в виде обратного уступа высотой 38,1 мм. Далее газ, проходя через препятствие, отрывается от нижней стенки, поступая во вторую испытательную секцию, тем самым образуя зону присоединения. Вторая секция имеет основное количество измерительных средств и значительную длину для успокоения потока.

Для получения численных результатов рассмотрено движение несжимаемого вязкого газа в двумерном канале с постоянными характеристиками:  $u_0 = 17,8$  м/с;  $\rho = 1,886$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 1,837 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $Re = (\rho u l) / \mu = 46\,000$ . Расчетная область построена исходя из данных эксперимента [5]:  $h = 38,1$  мм;  $L_1 = 30,48$  мм;  $L_2 = 2338,8$  мм. Для получения адекватных результатов и фиксирования значений высоких градиентов вблизи границ препятствия и стенок выбраны минимальные размеры ячеек, задано сгущение сетки. Для минимизации влияния формы сеток на результат проведены численные расчеты на нескольких сетках конечных объемов, состоящих из  $M_{e1} = 36\,000$ ,  $M_{e2} = 114\,000$ ,  $M_{e3} = 151\,000$  ячеек. Результаты, полученные на сетке  $M_{e1}$ , недостаточно точны, решение для сетки  $M_{e3}$  отличается от решений сетки

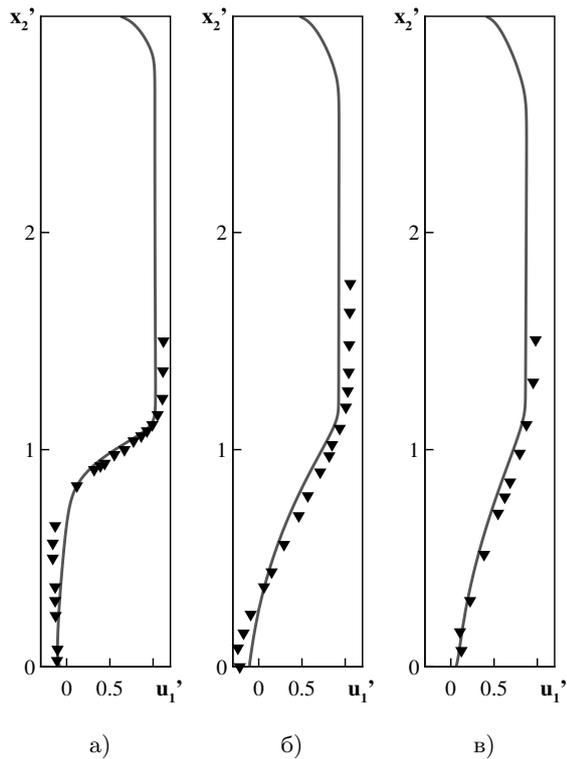


Рис. 2. Сравнение профилей скорости потока с данными эксперимента в сечениях: а)  $x'_1 = 1,33$ ; б)  $x'_1 = 5,33$ ; в)  $x'_1 = 7,11$

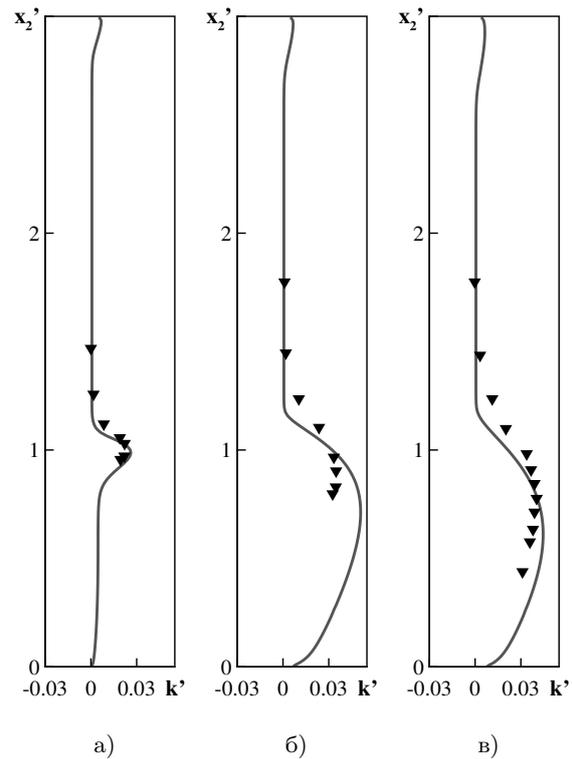


Рис. 3. Сравнение профилей кинетической энергии турбулентности с данными эксперимента в сечениях: а)  $x'_1 = 1$ ; б)  $x'_1 = 4,11$ ; в)  $x'_1 = 6,78$

$Me_2$  менее чем на 3 %, поэтому дальнейшие расчеты представлены для сетки  $Me_2$ .

Представлено сравнение расчетных данных с экспериментальными [5]. Для удобства записи и анализа данных были введены безразмерные соотношения:  $x'_1 = x_1/h$ ,  $u'_1 = u_1/u_0$ ,  $k' = k/u_0^2$ . На рис. 2 показаны сравнительные данные безразмерной скорости потока  $u'_1$  в сечениях  $x'_1 = 1,33$ ,  $x'_1 = 5,33$  и  $x'_1 = 7,11$ , данный тип профиля скорости хорошо показывает встречные и обратные направления. Заметно, что в зоне присоединения присутствует обратное направление скорости потока, по которым можно определить характер и габариты образуемого вихря. Максимальная скорость обратного направления равна около 20 % скорости набегающего потока. Полученные данные скорости потока хорошо согласуются с результатами эксперимента. На рис. 3 показаны значения кинетической энергии турбулентности  $k'$  в сечениях  $x'_1 = 1$ ,  $x'_1 = 4,11$  и  $x'_1 = 6,78$ , максимальные значения которого лежат последовательно по направлению потока, а пик — лежит ближе к нижней стенке. Из-за метода оценки  $k'$  и экспериментальной неопределенности изме-

рений в зоне рециркуляции не ясно, какая часть несоответствия является следствием недостатка модели. Разумеется, за пределами точки привязки соглашение вблизи пика значительно улучшилось. Однако модель  $k - \epsilon$ , по-видимому, испытывает недостаток в уровнях кинетической энергии, предсказанных вблизи края над слоем сдвига. Модель сохраняет резкий разрыв в распределении кинетической энергии, в то время как данные свидетельствуют о том, что  $k'$  значительно диффундирует в эту область или генерируется внутри нее.

Для анализа статического давления вдоль нижней пристенной области второй испытательной секции используется коэффициент давления  $C_p = 2(p - p_0)/(u_0^2 \rho)$  [1], который демонстрирует даже незначительные отклонения давления. Распределение коэффициента, приведенного в удобную форму  $C'_p = C_p - C_p^{min}$ , представлено на рис. 4. Видно, что за уступом давление слабо уменьшается, затем резко увеличивается по направлению потока. Падение давления, разрежение, связано с высокой угловой скоростью вращения главного вихря. Не трудно заметить,

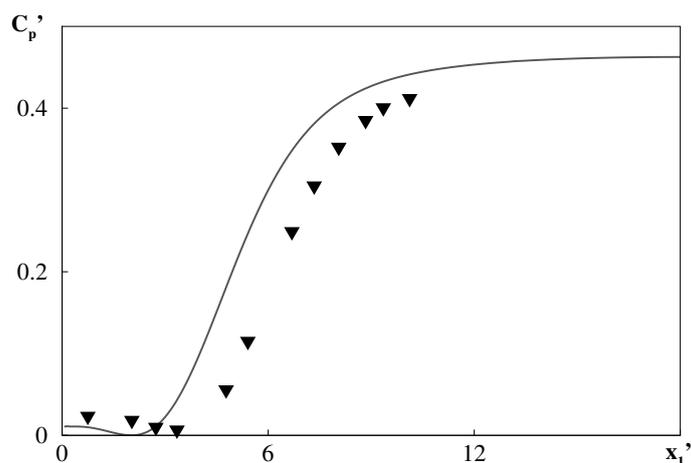


Рис. 4. Коэффициент приведенного давления  $C'_p$

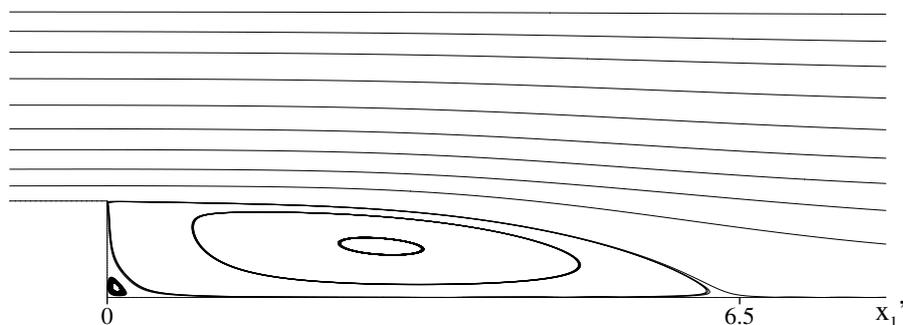


Рис. 5. Структура линий тока при обтекании внезапного расширения, направление потока слева направо

что давление в зоне присоединения определяется на всем промежутке с опережением. Отклонения графиков  $k - \epsilon$  модели от экспериментальных данных были замечены и ранее [10, 11].

Аналогичную структуру потока показывают линии тока на рис. 5, где длина зоны присоединения равна  $x'_1 \approx 6,5$ , что лежит в интервале, указанном в эксперименте [5]  $x'_1 = 7 \pm 1$ . Дополнительно замечен вихрь с небольшой интенсивностью в углу уступа, вращение которого обратно главному вихрю, его размер  $x'_1 \approx 0,2$ . Структура и число вихрей зависят от отношения высоты препятствия к высоте канала перед отрывом. Полная локализация зоны присоединения наблюдается на расстоянии  $x'_1 \approx 20$  после уступа. Несовпадения графиков могут быть связаны с невысокой точностью представленной модели турбулентности, вопросами теплообмена и сжимаемости среды, которые рассмотрены не были. Также отличия могут быть связаны с тем,

что поток, входящий в канал, установившийся в эксперименте, а в расчетах однороден по сечению.

### Заклучение

Представлены результаты численного моделирования турбулентного вязкого несжимаемого потока. Данные безразмерной скорости показали наилучший результат при сопоставлении с экспериментом. Значения безразмерной турбулентной кинетической энергии обладают хорошими показателями, однако у стенки в некоторых сечениях замечены разногласия данных теории и опыта. Приведенный коэффициент давления, данные которого получены вдоль нижней стенки канала, показал отклонение значений по направлению к препятствию, что является отправной точкой для будущих исследований. Область присоединения имеет длину, сопоставимую с результатами эксперимента. Отработана процедура построения сеток, где среди трех вы-

брана сетка с рациональным сеточным шагом. В целом модель показала свою работоспособность при обтекании препятствий, вызванных внезапным расширением канала.

### Литература

1. Рейнольдс А. Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М.: Энергия: Москва, 1979. 406 с.
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х томах. СПб.: Лань, 2004. 1088 с.
3. Терехов В. И., Ярыгина Н. И., Жданов Р. Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43. № 6. С. 126–133.
4. Егоров А. Г., Зоткин В. И., Иванин С. В. Исследование характеристик течения в канале с внезапным расширением // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2008. № 3. С. 85–94.
5. Kim J., Kline S. J., Johnson J. P. Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step // Transactions of the ASME. 1980. Vol. 102. P. 302–308.
6. Бубенчиков А. М., Фирсов Д. К., Котовщицова М. А. Численное решение плоских задач динамической вязкой жидкости методом контрольных объемов на треугольных сетках // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 6. С. 71–85.
7. Фомина А. А., Фомина Л. Н. Численное решение задачи течения несжимаемой жидкости в плоском канале с обратным уступом при больших числах Рейнольдса // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 3. С. 260–275. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.21
8. Жайнаков А. Ж., Калеева А. К., Курбаналиев А. Б. Моделирование стационарных отрывных течений в пакете OpenFOAM // Математика, математическое моделирование и физика. 2014. № 32. № 3. С. 25–29.
9. Казанцев А. А., Анисонян В. Р. Моделирование 3D-течения CFD-кодом OpenFOAM // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 4. С. 183–192.
10. Hackman L. P., Raithby G. D., Strong A. B. Numerical predictions of flows over backward-facing steps // International journal for numerical methods in fluids. 1984. Vol. 4. P. 711–724.
11. Dong H., Li Z., Gao G., Shi Z., Guo J., Tang W. Numerical Investigation of Flow past a Backward-facing Step Using a Multi-scale Turbulence Model // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 654. P. 45–50. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.654.45
12. Weller H. G., Tabor G., Jasak H. A Tensorial

Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object Oriented Techniques // Computers in Physics. 1998. Vol. 12. P. 620–631.

13. Харламов С. Н. Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов. Томск.: ТПУ, 2008. 80 с.

### References

1. Reynolds A. J. *Turbulentnye techeniya v inzhenernykh prilozheniyakh* [Turbulent flows in engineering applications]. Moscow, Energiya Publ., 1979, 406 p. (In Russian)
2. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoy sredy* [Continuum mechanics]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2004, 1088 p. (In Russian)
3. Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov P. F. Osobennosti techeniya i teploobmena pri otryve turbulentnogo potoka za ustupom i rebrom [Peculiarities of flow and heat transfer in the separation of a turbulent flow behind a ledge and an edge]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics], 2002, no. 6, pp. 126–133. (In Russian)
4. Egorov A. G., Zotkin V. I., Ivanin C. V. Issledovaniye kharakteristik techeniya v kanale s vnezapnym rasshireniyem [Investigation of flow characteristics in a channel with sudden expansion]. *Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Aviation and space-rocket technology], 2008, no. 3, pp. 85–94. (In Russian)
5. Kim J., Kline S. J., Johnson J. P. Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step. *Transactions of the ASME*, 1980, vol. 1, pp. 302–308.
6. Bubenchikov A. M., Firsov D. K., Kотовshchikova M. A. Chislennoye reshcheniye ploskikh zadach dinamicheskoy vyzkoy zhidkosti metodom kontrol'nykh ob'yemov na treugol'nykh setkakh [Numerical reconstruction of plane problems of a dynamic viscous fluid by the method of control volumes on triangular grids]. *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical modeling], 2007, vol. 19 no. 6, pp. 71–85. (In Russian)
7. Fomin A. A., Fomina L. N. Chislennoye reshcheniye zadachi techeniya neszhimayemoy zhidkosti v ploskom kanale s obratnym ustupom pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa [Numerical solutions of 2D steady incompressible backward-facing step flow at high Reynolds numbers]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational continuum mechanics], 2017, no. 3, pp. 260–275. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.21 (In Russian)
8. Zhaynakov A. Zh., Kaleeva A. K., Kurbanaliev A. Y. Modelirovaniye statsionarnykh otryvnykh techeniy v pakete OpenFOAM [Simulation of stationary detached flows in the OpenFOAM package]. *Matematika, matematicheskoye modelirovaniye i fizika*

- [Mathematics, mathematical modeling and physics], 2014, no. 32, pp. 25–29. (In Russian)
9. Kazantsev A. A., Anisonyan V. R. Modelirovaniye 3D-techeniya CFD-kodom OpenFOAM [Modeling of the 3D-flow by CFD-code OpenFOAM]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [News of higher education institutions. Nuclear energy], 2010, no. 4, pp. 183–192. (In Russian)
  10. Hackman L. P., Raithby G. D., Strong A. B. Numerical predictions of flows over backward-facing steps. *International journal for numerical methods in fluids*, 1984, vol. 4, pp. 711–724.
  11. Dong H., Li Z., Gao G., Shi Z., Guo J., Tang W. Numerical Investigation of Flow past a Backward-facing Step Using a Multi-scale Turbulence Model. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 654, pp. 45–50. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.654.45
  12. Weller H. G., Tabor G., Jasak H. A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics Using Object Oriented Techniques. *Computers in Physics*, 1998, vol. 12, pp. 620–631.
  13. Harlamov S. N. *Algoritmy pri modelirovanii gidrodinamicheskikh protsessov* [Algorithms for modeling hydrodynamic processes]. TPU, Tomsk, 2008, 80 p. (In Russian)

---

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2018

© Валеев А. А., Снигерев Б. А., 2018

Статья поступила 5 сентября 2018 г.