

International Young Scientists School and Conference
on Computational Information Technologies
for Environmental Sciences
and Information Systems

CITES–2015

26 June – 30 June 2015, Tomsk, Russia



Международная молодежная школа и конференция
по вычислительно-информационным технологиям
для наук об окружающей среде

CITES–2015

26 июня – 30 июня 2015, Томск, Россия



Организаторы CITES 2015

- Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Институт вычислительной математики РАН
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ
Томский государственный университет

Благодарим за финансовую поддержку:

Проект РФФИ 15-35-10151 мол_г
Мегагрант Минобрнауки РФ №14.B25.31.0026
«Внетропический гидрологический цикл в современном и будущем климате: неопределенности и предсказуемость»
(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

CITES 2015 organizers

- Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Institute for Numerical Mathematics RAS
Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Research Computing Center of Moscow State University
Tomsk State University

Acknowledgements:

RFBR project 15-35-10151 mol_g
Mega-grant of Ministry of Education and Science of Russian Federation No14.V25.31.0026
“Extra-tropical hydrological cycle in the current and future climate: uncertainties and predictability”
(P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS)

Mathematical model and computational method for investigation of a river stream

Churuksaeva V.V., Starchenko A.V.

Tomsk State University, Russia

E-mail: chu.vv@mail.ru, starch@math.tsu.ru

Deepth-averaged hydrodynamic models are widely used to numerically predict flows in natural basins. Modeling flow in rivers and coastal areas is a current problem of an environmental hydrodynamics that includes specific treatment of the free surface. The most general approach is to solve the full 3D equations, but as long as behavior of the free surface is influenced much more by the horizontal velocities than the vertical one and because the size of the spatial domain is very large, solving of depth averaged equation is the main approach in environmental problems.

This paper deals with an unsteady depth averaged flow model based on the RANS approach. Averaged turbulent stresses appearing in the model are computed from the depth averaged modification of the widely used model proposed by Launder & Spalding [1]. The staggered structured grid is used to discretize the spatial domain. The convective flux is discretized with MLU-scheme [2] and MUSCL-scheme. Solution of the discrete system is obtained with a SIMPLE iterative algorithm based on coupled correction of the depth and velocity fields on each time step.

To investigate the applicability of the model some numerical predictions were carried out. Two of them are: the open channel flow around bend and side discharge with contaminant into the moving flow. The results shows that the depth averaged model represents flow patterns near the bend, side inflows, and over complex bathymetry correctly and could be applied for modelling a river flow.

The work is performed in the framework of the state assignment with the Ministry of education and science of Russian Federation (No.5.628.2014/K).

References:

1. Launder B.E., Spalding D.B. *The numerical computation of turbulent flows* // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. Vol. 2. No. 3. pp. 269-289.
2. Noll B. *Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computations* // AIAA Journal. 1992. Vol. 30. No. 1. pp. 64-68.

Математическая модель и численный метод для расчета течения в русле реки

Чуруксаева В.В., Старченко А.В.

Томский государственный университет, Россия

E-mail: chu.vv@mail.ru, starch@math.tsu.ru

Осредненные по глубине гидродинамические модели широко применяются для расчета течений в природных водоемах. Для актуальных задач гидродинамики окружающей среды, таких как прибрежные течения в морях и океанах, а также реках, если рассматривать проблему распространения наводнений, необходим учет нестационарного поведения свободной поверхности.

Наиболее общим подходом к расчету таких течений является решение полных трехмерных уравнений гидродинамики с соответствующими условиями для свободной поверхности. Однако поведение свободной поверхности в основном определяется горизонтальной скоростью течения и потому в инженерных приложениях и вычислениях, связанных с исследованием окружающей среды такой подход не является оправданным из-за существенного различия в масштабах происходящих процессов, а также значительных размеров расчетной области. Данный вопрос подробно обсуждается в [1,2]. Обзор литературы также показывает, что полные уравнения или решаются в рамках LES подхода [3,4], или используются для расчета в небольшой области (например, течения в лабораторной установке, как в [4,5]).

Альтернативный подход подразумевает построение турбулентной модели для осредненных течений на основе классических моделей турбулентности для уравнений Рейнольдса. В этом случае генерация турбулентности за счет трения о русловое дно учитывается добавлением источникового члена. Среди осредненных по глубине дифференциальных моделей турбулентности хорошо себя зарекомендовала модификация $k-\epsilon$ модели, предложенная Роди [6].

В данной работе математическая модель руслового течения строится на основе осредненных по глубине уравнений Рейнольдса для вязкой жидкости

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{t}_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{t}_{xy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{xz})_s - (\tau_{xz})_b}{\rho}, \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} &= -gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{t}_{yx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\bar{t}_{yy})}{\partial y} + \frac{(\tau_{yz})_s - (\tau_{yz})_b}{\rho}. \end{aligned}$$

где $h(x, y, t)$ – глубина, \bar{u} – осредненные по глубине значения компонент вектора скорости $w = (u, v)$; $z_b(x, y)$ – рельеф дна; ρ – плотность; $(\tau_{xz})_s - (\tau_{xz})_b$ – трение на поверхности и дне, соответственно.

При этом предполагается, что распределение давления является гидростатическим и характеристики потока слабо меняются по глубине, и глубина значительно меньше горизонтальных размеров области, и, соответственно, ограничивает формирование трехмерных вихрей, определяя двумерный характер турбулентности.

Множество предшествующих работ, посвященных расчетам турбулентных потоков мелкой воды, показывает ключевую роль двумерных вихрей при моделировании турбулентных течений мелкой воды, а также важность задания граничных условий на дне и свободной поверхности [7,8].

Осредненные по глубине значения напряжений $\bar{\tau}_{ij}$ определяются из гипотезы Буссинеска

$$\frac{1}{\rho} \bar{\tau}_{ij} = (\bar{v} + \bar{v}_i) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \bar{k} \delta_{ij},$$

Турбулентная вязкость \bar{k} и кинетическая энергия турбулентности \bar{k} находятся с использованием осредненной по глубине k - ϵ модели [6].

$$\begin{aligned} \bar{v}_i &= c_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\epsilon}}, \\ \frac{\partial(h\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{k})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{k})}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\bar{v}_i}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\bar{v}_i}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{k}}{\partial y} \right) + (P_h + P_{kv} - \bar{\epsilon})h, \\ \frac{\partial(h\bar{\epsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{\epsilon})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{\epsilon})}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\bar{v}_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\bar{v}_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} \right) + \left(c_1 \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} P_h + P_{kv} - c_2 \frac{\bar{\epsilon}^2}{\bar{k}} \right) h, \\ \text{где } P_h &= v_i \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Построенная математическая модель, дополненная уравнением концентрации

$$\frac{\partial(h\bar{c})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{c})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{c})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \bar{c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \bar{c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right),$$

позволяет моделировать возможный сценарий распространения загрязняющих веществ, сбрасываемых различными предприятиями в поверхностные воды рек, что является необходимым для прогнозирования и мониторинга состояния экосистемы реки.

В силу того, что в данной ситуации моделируется распространение примеси относительно небольшой массы (в сравнении с массой текущей воды), поступающей в реку с низкой скоростью, вблизи выброса не возникает трехмерных турбулентных эффектов.

Дискретный аналог уравнений модели строится методом конечных объемов на разнесенной по пространству прямоугольной сетке:

Глубина h определяется в центрах ячеек, а компоненты скорости \bar{u} – на границах. Для аппроксимации конвективных членов используются схемы MLU [9] и MUSCL. В силу того, что характеристики течения мало изменяются с течением времени, для подобной задачи предпочтительнее использовать неявный метод.

Для нахождения решения дискретной системы на основе SIMPLE-алгоритма Патанкара и Спoldingа был построен итерационный алгоритм совместного решения уравнений неразрывности и движения, позволяющий получить корректные численные решения для полей скорости и глубины.

С помощью данного метода были проведены расчеты некоторых тестовых сценариев, иллюстрирующих различные режимы течения, влияние на него трения и рельефа дна.

В качестве валидации математической модели и численного метода приведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, а также расчетами, приведенными в [10]. Сравнение позволяет судить о том, насколько гипотеза мелкой воды применима для подобных случаев.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Одним из самых распространенных приложений двумерной модели мелкой воды является расчет течения в открытых каналах. Резкое изменение направления течения может вызывать проявление трехмерного характера турбулентности, что может ухудшить достоверность численного прогноза с использованием осредненных уравнений.

В качестве расчетной области использовался канал с поворотом под прямым углом. Входной участок имеет ширину 0.86 м и ровное дно. Сразу перед поворотом уровень дна понижается на 0.013 м. Выходной участок имеет ширину 0.72 м и ровное дно. Средняя глубина воды $h \approx 0.175$ м, величина продольной компоненты скорости ≈ 0.2 м/с.

На рисунке 1 приведено сравнение полученных результатов с расчетом из [10], где авторы исследуют течение в открытом канале с применением аналогичной модели.

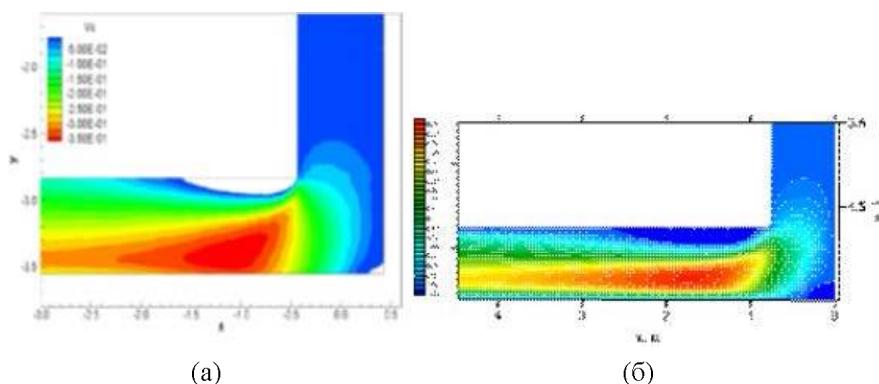


Рисунок 1. Течение в канале с поворотом, продольная компонента скорости \bar{u} , (а) – расчет из [10], (б) – расчет по рассматриваемой модели.

Из рисунка видно, что модель успешно обнаруживает циркуляционную зону за поворотом.

Для более детального сравнения полученных численных расчетов и исследования влияния расчетной сетки на решение, рассмотрим изменение продольной скорости и кинетической энергии турбулентности в поперечном сечении канала с $x = 1.8$ м, где образуется область циркуляционного течения.

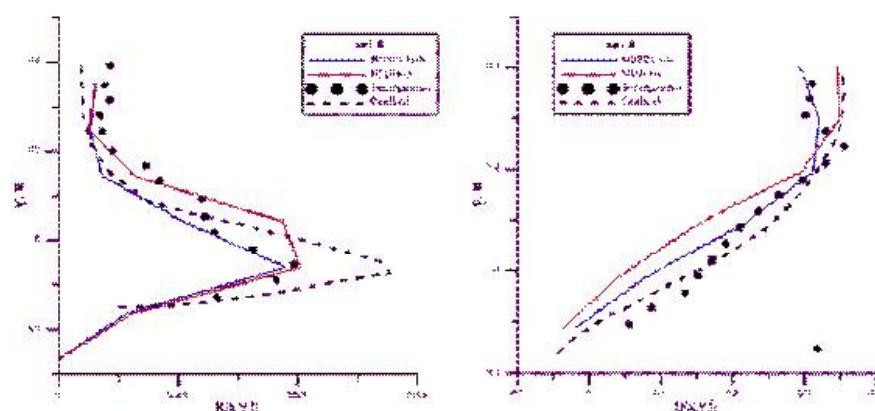


Рисунок 2. Кинетическая энергия турбулентности и продольная компонента скорости в сечении $x = 1.8$ м.

Предложенная модель и численный метод также могут быть использованы при решении задачи расчета распространения бокового выброса в движущийся поток. На основе данных о глубине реки и скорости течения был проведен расчет поля концентрации.

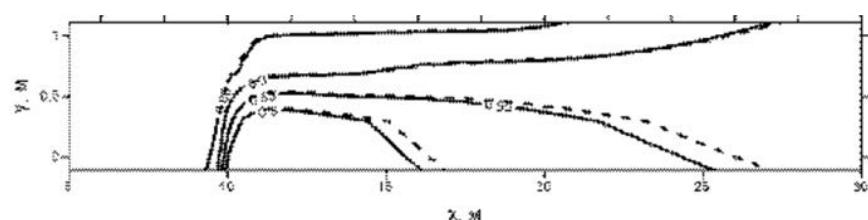


Рисунок 3. Концентрация примеси при боковом выбросе в поток (сплошная линия – расчет по схеме MUSCL, пунктирная – по схеме MLU).

Приведенные результаты для поля концентрации качественно согласуются с расчетами из [6].

Проведенное тестирование показывает, что выбор осредненных по глубине уравнений и соответствующей модели турбулентности позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными для случаев течения с резким изменением направления потока, а также при моделировании выброса в движущуюся струю. Оба этих вида течения характерны для движения воды в русле реки, что позволяет применить представленный подход к моделированию речного течения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 5.628.2014/К.

Литература:

1. Duc B., Wenka T., and Rodi W. Numerical Modeling of Bed Deformation in Laboratory Channels // *Journal of Hydraulic Engineering*. Сентябрь 2004. Vol. 9. pp. 894-904.
2. Uijtewaal W.S.J. Hydrodynamics of shallow flows: application to rivers // *Journal of Hydraulic Research*. 2014. Vol. 52. No. 2. pp. 157-172.
3. Chaouat B., Schiestel R. Reynolds stress transport modelling for steady and unsteady channel flows with wall injection // *Journal Of Turbulence*. 2002. Vol. 3. pp. 1-16.
4. Kang S., Lightbody A., Hill C., and Sotiropoulos F. High-resolution numerical simulation of turbulence in natural waterways // *Advances in Water Resources*. 2011. Vol. 34. pp. 98-113.
5. Kang S., Sotiropoulos F. Numerical modeling of 3D turbulent free surface flow in natural waterways // *Advances in Water Resources*. 2012. No. 40. pp. 23-36.
6. Роди [11] В. Модели турбулентности окружающей среды // In: Методы расчета турбулентных течений. Москва: Мир, 1984. pp. 276-278.
7. Chu V.H., Babarutsi S. Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988. Vol. 10. No. 114. pp. 1257-1274.
8. Uijtewaal W., Booij R. Effects of shallowness on the development // *Physics of Fluids*. 2000. Vol. 2. No. 12. pp. 392-402.
9. Noll B. Evaluation of a bounded high-resolution scheme for combustor flow computations // *AIAA Journal*. 1992. Vol. 30. No. 1. pp. 64-68.
10. Cea L., Puertas J., and Vazquez-Cendon M.E. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts // *Archives of computational methods in engineering*. September 2007. Vol. 14. No. 3. pp. 303-341.

Numerical study of water-atmosphere gas exchange for a boreal lake

¹Guseva S.P., ²Stepanenko V.M.

¹ Lomonosov Moscow State University, Geography Faculty, Russia

² Lomonosov Moscow State University (Research Computing Center), Russia

E-mail: gussonlost@gmail.com, stepanen@srcc.msu.ru

Web: www.geogr.msu.ru, www.srcc.msu.ru

Since preindustrial era atmospheric methane concentration has increased about 1.5 times. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, methane is the second greenhouse gas in its contribution to modern global warming. Though lakes occupy only 1,3 – 1.8% of a terrestrial surface, methane emission from lakes (by different estimates) - is about 25% of the total flux of natural biogenic sources. Taking into account this fact, it is obviously important to consider contribution of lakes to regional empirical estimates of methane fluxes, as well as to develop specific models of methane emissions from lakes, in particular, for their subsequent inclusion in climatic models.

For the quantitative and qualitative description of methane emission it is necessary to have detailed understanding of the mechanisms of regulation of this process and to predict it in the future. As the main research tool we use the lake numerical model LAKE (Stepanenko *et al.*, 2011).

In this work the LAKE model was applied to the small thermokarst lake Seida (Republic of Komi). An attempt to consider the physical processes occurring in the lake was made and thus to obtain a satisfactory agreement with observations. Another important direction of this research was the review and realization in the model of various parametrizations of gas exchange at the air-water interface, which govern the magnitude of methane diffusive flux. The most uncertain element of this parameterization is the gas transfer velocity, k , that is determined by a complex of insufficiently understood physical processes. These processes characterize a state of the atmospheric surface layer above the water and the top thin layer of the lake.