

УДК 519.63; 519.684

Исахов А.А.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы
E-mail: alibek.issakhov@gmail.com

Оценка воздействия функционирования тепловой электростанции на окружающую среду методами математического моделирования

В работе представлена оценка воздействия функционирования тепловой электростанции на окружающую среду методами математического моделирования, которая решается уравнениями Навье - Стокса и температуры для несжимаемой жидкости в стратифицированной среде, основанные на методе расщепления по физическим параметрам, которые аппроксимируются методом контрольного объема. Численный алгоритм для решения уравнений Навье-Стокса и переноса температуры выглядит таким образом: на первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится 5-шаговым методом Рунге - Кутта. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. Уравнение Пуассона для поля давления решается методом Якоби. На третьем этапе предполагается, что перенос осуществляется только за счет градиента давления. На четвертом шаге численно решается уравнения переноса температуры также как уравнения движения 5-шаговым методом Рунге - Кутта. Алгоритм задачи распараллелен на высокопроизводительной системе. Полученные численные результаты трехмерного стратифицированного турбулентного течения позволяет выявить качественно и приближенно количественно основные закономерности гидротермических процессов происходящих в водоемах-охладителях.

Ключевые слова: стратифицированная среда, уравнения Навье-Стокса, эксплуатационная мощность, Экибастузский ГРЭС-2, метод конечных объемов, метод Рунге-Кутта, озеро Шандаксор.

Issakhov A.A.

Assessing the operation impact of thermal power plants on the environment by mathematical modeling method

The paper presents an assessment of the operation impact of thermal power plants on the environment by mathematical modeling method, which is solved by the Navier - Stokes and temperature equations for an incompressible fluid in a stratified medium, based on the projection method which are approximated by control volume method. A numerical algorithm for solving the Navier-Stokes and the temperature transport equations are as follows: in the first stage it is assumed that the transfer of momentum is carried out only by convection and diffusion. The intermediate velocity field is solved by 5-step Runge - Kutta method. In the second stage, based on the found intermediate velocity field, is solved the pressure field. Poisson equation for the pressure field is solved by Jacobi method. In a third step it is assumed that the transfer is carried out only by the pressure gradient. The fourth step numerically solved temperature transfer equation as the momentum equation by 5-step Runge - Kutta method. The algorithm is parallelized on high-performance systems. The obtained numerical results of three-dimensional stratified turbulent flow reveals qualitatively and quantitatively approximate the basic laws of hydrothermal processes occurring in the aquatic environment.

Key words: stratified environment, the Navier-Stokes equations, operational capacity, Ekibastuz GRES-2, finite volume method, Runge-Kutta method, Shandaksor lake.

Исахов А.А.

Математикалық модельдеу әдісі арқылы қоршаған ортаға жылу электр станцияларының жұмысының әсерін бағалау

Жұмыста ақырлы көлем әдісімен аппроксимацияланатын, физикалық параметрлер бойынша ыдырау әдісіне негізделген, стратификацияланған ортадағы сығылмайтын сұйыққа арналған Навье - Стокс және температура теңдеулерімен шешілетін, математикалық модельдеу арқылы қоршаған ортаға жылу электр станцияларының жұмысының әсерін бағалау ұсынылды. Навье-Стокс және температура теңдеулерін шешу үшін арналған сандық алгоритмы осылай болып табылады: бірінші кезеңде қозғалыс санының ауысуы конвекция мен диффузияның есебінен ғана болады деп болжанады. Аралық жылдамдық өрісі 5- қадамды Рунге - Кутта әдісімен табылады. Екінші кезеңде табылған аралық жылдамдық өрісі арқылы қысым өрісі табылады. Қысым өрісі үшін Пуассон теңдеуі Якоби әдісімен шығарылады. Үшінші кезеңде алмастыру қысым градиенті арқылы жүзеге асады деп болжаймыз. Төртінші кезеңде температура теңдеуі қозғалыс теңдеуі сияқты 5-қадам Кутта Рунге әдісі арқылы сандық шешіледі. Есептің алгоритмі жоғары өнімді жүйеде параллелденген. Алынған үшөлшемді стратификацияланған турбулентті ағыстың сандық нәтижелері су қоймаларында болып жатқан гидротермиялық процесстердің негізгі заңдылықтарын сапалы және айтарлықтай жуықтап алуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: стратификацияланған орта, Навье-Стокс теңдеуі, операциялық қуаты, Екі-бастұз ГРЭС-2, ақырлы көлем әдісі, Рунге-Кутта әдісі, Шандаксор көлі.

1 Введение

Взаимодействие энергетических предприятий с окружающей средой происходит на всех стадиях добычи и использования топлива, переработки и передачи энергии. В составе загрязнителей - взвешенные вещества, нефтепродукты, хлориды, сульфаты, соединения тяжёлых металлов, сероводород, формальдегид и др. Основными потребителями воды на ТЭС и АЭС являются конденсаторы турбин. Расход воды зависит от параметров пара и от системы технического водоснабжения. По некоторым оценкам в перспективе будет затрачиваться воды на охлаждение конденсаторов: на ТЭС - 120 кг/(кВт. ч), на АЭС - 220 кг/(кВт. ч). Большие удельные расходы пара на АЭС определяют и большие удельные расходы воды. При промывке поверхностей агрегатов образуются разбавленные растворы соляной кислоты, едкого натра, аммиака, солей аммония, железа и других веществ. Кроме того, сбросы охлаждающей воды ядерных энергетических установок АЭС не исключают поступления радионуклидов в водную среду. Ежегодное расходование электроэнергии в индустриально развитых странах с каждым годом только растёт, что повлекло за собой рост мощностей энергетических блоков ТЭС или АЭС. Для того чтобы происходила конденсация пара охлажденная вода подается в конденсаторы. Расходы охлаждающих технических или циркуляционных вод огромны, которые составляют до 95 % от общего расхода воды на нужды ТЭС, и до 90% на нужды АЭС. ТЭС с охлаждающей водой сбрасывают 4 - 7 кДж теплоты на 1 кВт/ч вырабатываемой электроэнергии. Но по санитарным нормам сбросы теплой воды с ТЭС не должны повышать температуру водоема выше, чем на 3 °С в летнее время и на 5 °С в зимнее. Распространение тепловых выбросов от ТЭС зависит от нескольких факторов: рельефа местности, температуры окружающей среды, скорости ветра, облачности, осадок и т.д. А также ускоряет распространение и увеличивает площадь теплового загрязнения гидрометеорологические условия. В водохранилищах нуждаются как тепловые, так и атомные электростанции. Для работы этих станций требуется большое количество воды для

охлаждения агрегатов, в среднем 35-40 м. куб/сек на 1 млн. кВт установленной мощности. Отсюда становится очевидным, что для тепловой электростанций мощностью 2-4 млн. кВт требуется 70-160 м. куб. воды ежесекундно. Поэтому при выборе места строительства ТЭС и АЭС важнейшее значение приобретают вопросы их водоснабжения. Естественно, что крупные тепловые электростанции должны располагаться на берегах больших рек, водоемов и озер или искусственных водохранилищ. В качестве примера теплового воздействия ТЭС на водную среду взята Экибастузская ГРЭС-2, расположенная в поселке Солнечный, около 40 км севернее города Экибастуз, Павлодарская область, Казахстан. Экибастузская ГРЭС-2 вырабатывает электроэнергию из высококалорийного экибастузского угля двумя энергоблоками по 500 МВт, имеет установленную мощность 1000 МВт. Два её энергоблока вырабатывают сегодня около 12 % всей электроэнергии, производимой в республике.

Техническое водоснабжение Экибастузской ГРЭС-2 осуществляется по схеме обратного технического водоснабжения с искусственно созданным наливным водохранилищем-охладителем. Водоохранилище-охладитель создано на базе горько-соленого, пересыхающего, не имеющего народно-хозяйственного значения озера Шандаксор. Обратная схема водоснабжения: холодная вода забирается глубинным водозабором из водохранилища-охладителя и по подводному каналу поступает на блочную насосную станцию, и далее на теплообменники электростанции. Теплая вода от теплообменников по отводящему каналу сбрасывается рассредоточено в водохранилище-охладитель. Максимальные размеры водохранилища-охладителя примерно является 7,2x7,7 км.

2 Математическая модель

Многие годы в изучении гидродинамики озер и водоемов имелись два независимых направления, одно из них анализ данных натуральных наблюдений, а другое - математическое моделирование [1-8]. Натурные эксперименты - наблюдения, хотя и выполненные при разнообразном комплексе условий, были пассивными, так как не позволяли активно управлять экспериментом, при этом не представлялось возможным прогнозирование на их основе гидрофизических процессов. Одним из наиболее эффективных методов исследования гидродинамики озерных вод является метод математического моделирования. В некоторых случаях этот метод может быть единственным средством прогноза изменений гидрологического режима и экосистем озер, например при изучении изменений, которые могут произойти при территориальном перераспределении вод, строительстве гидротехнических сооружений и при других мероприятиях, связанных с использованием водных объектов.

В водоемах-охладителях пространственное изменение температуры невелико. Поэтому стратифицированное течение в водоеме-охладителе можно описать уравнениями в приближении Буссинеска. Для математического моделирования рассматриваются системы уравнений, включающие уравнение движения, уравнение неразрывности и уравнение для температуры. Рассматривается развитое пространственное турбулентное течение в стратифицированном водоеме-охладителе. Для моделирования распространения температуры в водоеме используется трехмерная математическая модель [1-12, 17]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \beta g_i (T - T_0) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

где $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$, g_i – ускорение свободного падения, β – коэффициент объёмного расширения, u_i – компоненты скорости, χ – коэффициент температуропроводности, T_0 – равновесная температура, T – отклонение температуры от равновесия.

Для замыкания системы уравнений (1) – (3) используется модель турбулентности Смагоринского [13].

Для дискретизации системы уравнений (1) – (3) используется метод контрольного объема. Для этого представим уравнения Навье - Стокса и уравнение для температуры в виде интегральных законов сохранения для произвольного фиксированного объема Ω с границей $d\Omega$ [14, 15]:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} - B_i \right) d\Omega = 0, \quad (4)$$

где

$$U = \begin{pmatrix} 0 \\ u_j \\ T \end{pmatrix}, \quad F_i = \begin{pmatrix} u_i \\ u_i u_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij} \\ v_i T \end{pmatrix}, \quad G_i = \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ \chi \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \beta g_i (T - T_0) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Уравнения (4) можно записать в следующем виде

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B \right) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (F_i + G_i) n_i d\Gamma = 0. \quad (5)$$

Приведем уравнения (5) такому виду

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (F_i + G_i) n_i d\Gamma = \int_{\Omega} B_i d\Omega. \quad (6)$$

Сеточные функции будут определяться в центре ячейки, а значения потоков через границу в дробных ячейках. Объем ячейки обозначим через сеточные функции.

Теперь произведем дискретизацию уравнения (6) по контрольному объему (CV) и контрольной поверхности (CS)

$$\sum_{CV} \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} \right) \Delta \Omega + \sum_{CS} (F_i + G_i) n_i \Delta \Gamma = \bar{B}_i \Delta \Omega \quad (7)$$

или можно будет написать уравнение (7) в таком виде:

$$\sum_{CV} \Delta U \Delta \Omega + \sum_{CS} \Delta t (F_i + G_i) n_i \Delta \Gamma = \Delta t \bar{B}_i \Delta \Omega. \quad (8)$$

3 Численный алгоритм

Для численного решения уравнения (1) - (3) используется схема расщепления по физическим параметрам [14-16]. Для численной реализации системы (1) - (3) используется дискретизация вида (8). На первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится 5-шаговым методом Рунге - Кутта [11, 12, 14, 15]. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. Уравнение Пуассона для поля давления решается методом Якоби [14, 15]. На третьем этапе предполагается, что перенос осуществляется только за счет градиента давления. На четвертом шаге численно решаются уравнения переноса температуры также как уравнения движения 5-шаговым методом Рунге - Кутта. При решении уравнения для температуры также применяется метод конечных объемов и аналогичные вычисления как для уравнения движения [11, 12]. Алгоритм задачи распараллелен на высокопроизводительной системе. Расчеты проводились на кластерных системах URSA и T-Cluster ДГП НИИ Математики и Механики при КазНУ им. аль-Фараби.

$$I) \int_{\Omega} \frac{\vec{u}^* - \vec{u}^n}{\tau} d\Omega = -\oint_{\partial\Omega} (\nabla(\vec{u}^n \vec{u}^* - \tau_{ij}) - \nu \Delta \vec{u}^*) n_i d\Gamma,$$

$$II) \oint_{\partial\Omega} (\Delta p) d\Gamma = \int_{\Omega} \frac{\nabla \vec{u}^*}{\tau} d\Omega,$$

$$III) \frac{\vec{u}^{n+1} - \vec{u}^*}{\tau} = -\nabla p,$$

$$IV) \int_{\Omega} \frac{T^* - T^n}{\tau} d\Omega = -\oint_{\partial\Omega} (\nabla \vec{u}^n T^* - \nu \Delta T^*) n_i d\Gamma.$$

4 Результаты численного моделирования

Для численного решения задач были заданы начальные и граничные условия. Начальные условия для скорости и температуры задаются в следующем виде: $u_j = 0$, ($j =$

1, 2, 3), $T = T_0$. Граничные условия для скорости на дне и боковой границе задаются условием прилипания, а для температуры - адиабатические условия. На поверхности для скорости и температуры задаются условия Неймана. А также ставятся дополнительные граничные условия для скорости и температуры в боковой границе водосброса в зависимости от эксплуатационной мощности Экибастузской ГРЭС-2. В расчетах использовалась вычислительная сетка, имеющая более 800 000 вычислительных узлов. На рисунке 1 представлена вычислительная сетка для Экибастузского ГРЭС-2. На рисунке 2 изображены расчетный пространственный контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-2, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 700 МВт. На рисунке 3 показаны контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-2, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 900 МВт.

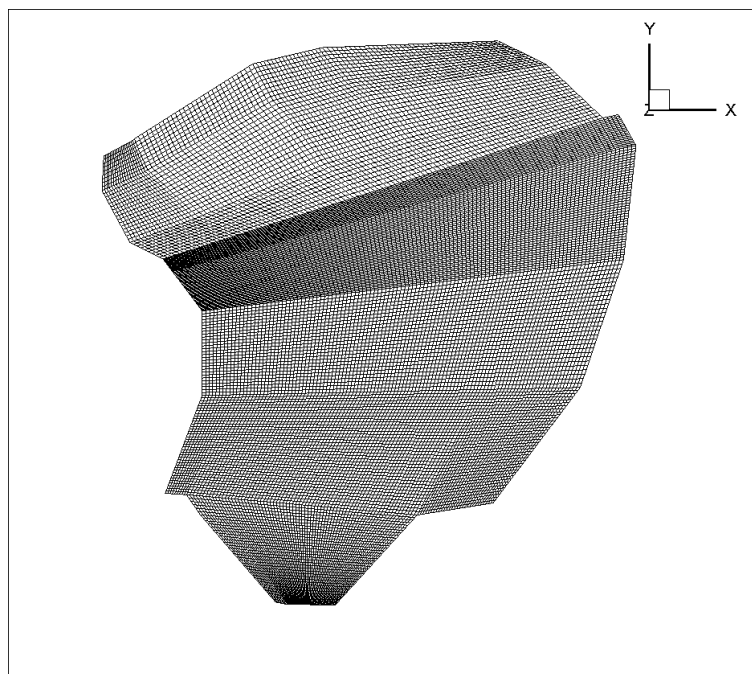


Рисунок 1 – Вычислительная сетка для Экибастузского ГРЭС-2.

На обоих рисунках 2-3 видно, что распределения температуры с удалением от стока приближается к изотермическому состоянию. Полученные результаты показывают, что распределения температуры распространяется на большую площадь. Как видно из рисунков 2-3, при повышении эксплуатационной мощности ГРЭС-2, площадь теплового воздействия становится направленным в одну сторону, и приводит к подогреву воды с одной части водоема, что отрицательно сказывается на работоспособности ГРЭС-2. При эксплуатационной мощности 900 МВт, температура распределяется в северную часть водоема и приближенно использует только половину водоема для охлаждения горячей воды с ГРЭС-2. При повышении эксплуатационной мощности Экибастузской ГРЭС-2 водоем-охладитель работает не эффективно, подогревая северную часть водоема, а остальная часть водоема практически не участвует при охлаждении подогретой воды из ГРЭС-2.

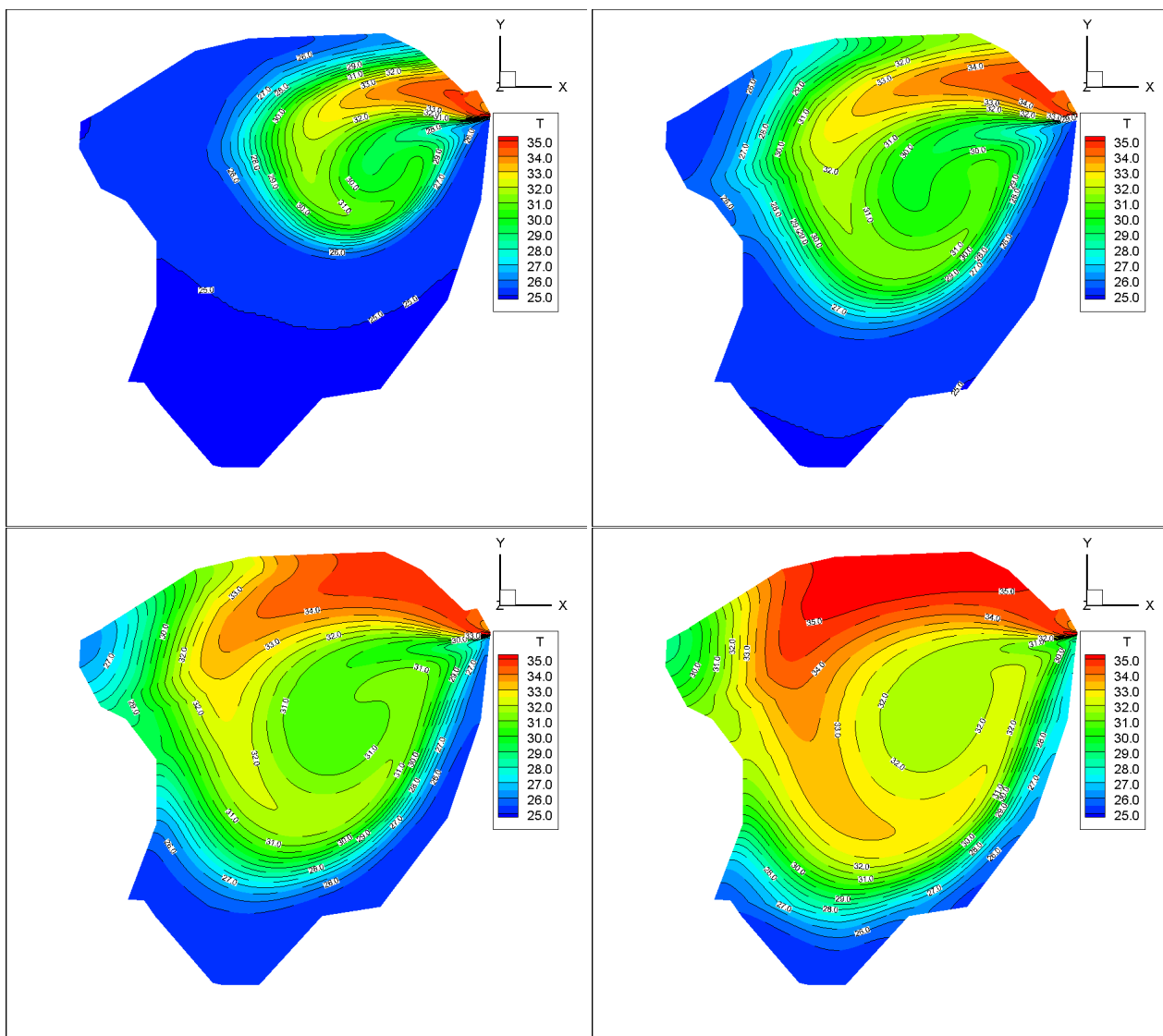


Рисунок 2 – Контур и изолиний распределения температуры через 22.5 ч., 50 ч., 72.5 ч. и 90 ч. после старта работы Экибастузского ГРЭС-2, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 700 МВт.

5 Заключение

В этой работе было проведено прогнозное моделирование для минимизирования тепловой нагрузки на озеро Шандаксор, возле которой расположена Экибастузская ГРЭС-2. Целью данной работы заключается в том, чтобы определить размеры и пространственные распределения температуры теплой воды от водосбросного канала для различных эксплуатационных мощностей электростанции. Прогностическая математическая модель, разработанная для данного исследования, показали участки термического факела, в котором температура понижается, когда отдалается от водосбросного канала и температура факела приближается к значениям температуры водоема-охладителя. Таким

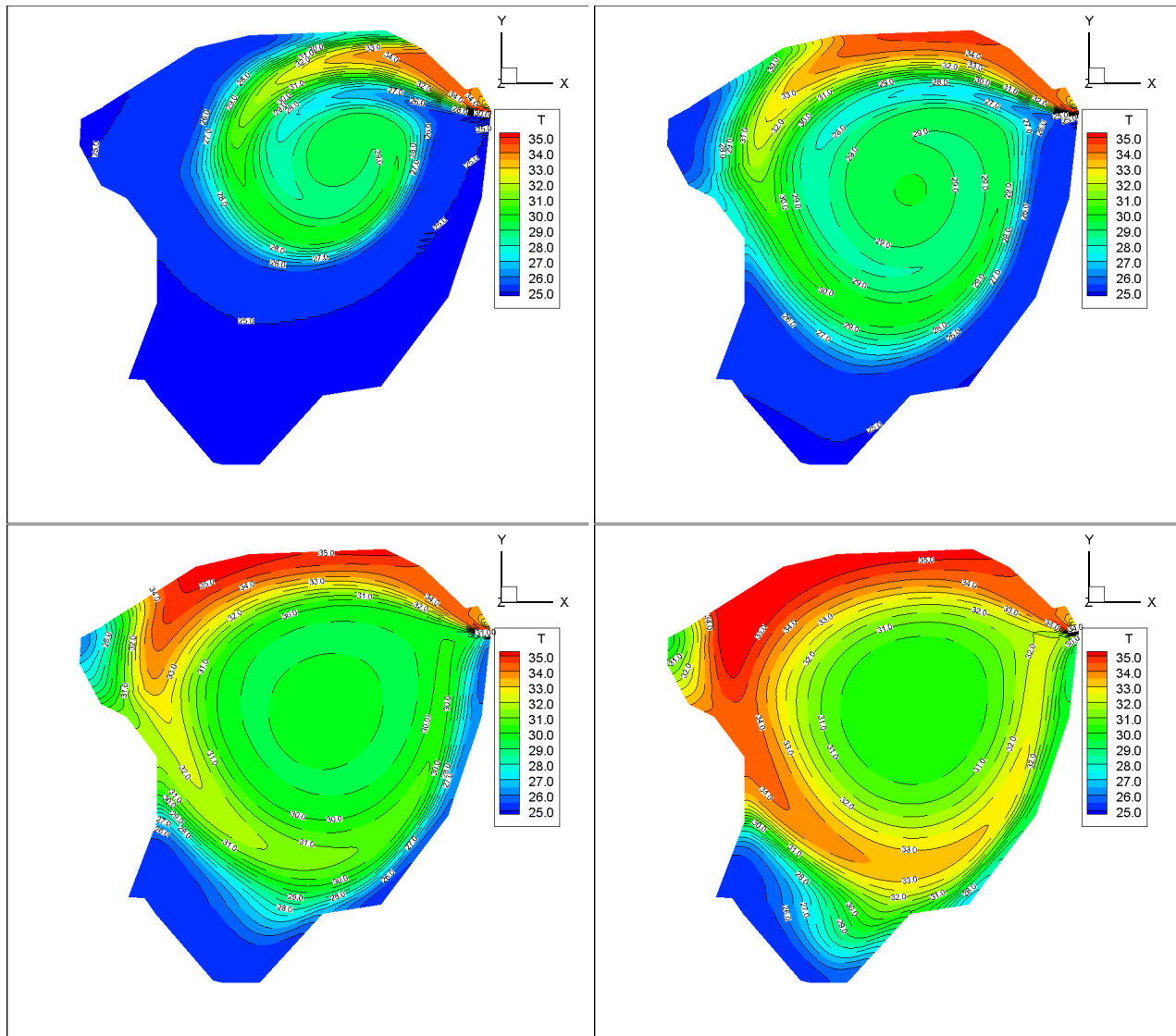


Рисунок 3 – Контур и изолиний распределения температуры через 22.5 ч., 50 ч., 72.5 ч. и 90 после старта работы Экибастузского ГРЭС-2, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 900 МВт.

образом, развитая модель трехмерного стратифицированного турбулентного течения позволяет выявить качественно и приближенно количественно основные закономерности гидротермических процессов, происходящих в водоеме Шандаксор.

6 Примечание

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Комитетом науки МОН РК, грант No 2017/ГФ4

Литература

- [1] Z. Yang , T. Khangaonkar Modeling Tidal Circulation and Stratification in Skagit River Estuary Using an Unstructured Grid Ocean Model // Ocean Modelling. 2008. 28(1-3), – 34-49 pp.
- [2] C. Chen , H. Liu , R. C. Beardsley An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. 20(1), – 159-186 pp.
- [3] L. Zheng , C. Chen, H. Liu A modeling study of the Satilla River estuary, Georgia. I: Flooding-drying process and water exchange over the salt marsh-estuary-shelf complex // Estuaries and Coasts. 2003. 26(3), – 651-669 pp.
- [4] A. Isobe , R. C. Beardsley An estimate of the cross-frontal transport at the shelf break of the East China Sea with the Finite Volume Coastal Ocean Model // Journal of Geophysical Research. 111:C03012. doi:10.1029/2005JC 003290.
- [5] K. Aoki , A. Isobe Application of finite volume coastal ocean model to hindcasting the wind-induced sea-level variation in Fukuoka bay // Journal of Oceanography. 2007. 63(2), – 333-339 pp.
- [6] R. H. Weisberg , L. Zheng The circulation of Tampa Bay driven by buoyancy, tides, and winds, as simulated using a finite volume coastal ocean model // Journal of Geophysical Research. 111:C01005, doi:10.1029/2005JC003067, 2006.
- [7] W. Lick Numerical models of lakes currents. EPA-60013-76-020, 1976. – 140 p.
- [8] Y. Sheng , W. Lick , R.T. Gedney , F.B. Molls ANumerical computation of three-dimensional circulation of Lake Erie: A comparison of a free-surface model and rigid-Lid. Model. // J. of Phys. Ocean. 1978. 8, – 713 - 727 pp.
- [9] A. Issakhov Mathematical Modelling of the Influence of Thermal Power Plant on the Aquatic Environment with Different Meteorological Condition by Using Parallel Technologies // Power, Control and Optimization. Lecture Notes in Electrical Engineering.2013. 239, – 165-179 pp.
- [10] A.Issakhov Mathematical modelling of the influence of thermal power plant to the aquatic environment by using parallel technologies // AIP Conf. Proc. 2012. 1499, –15-18 pp. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4768963>
- [11] A. Issakhov Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant // International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. 16(5), – 1082-1096 pp.
- [12] A. Issakhov Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities // Applied Mathematical Modelling. 2016. 40(2), – 229-238 pp.
- [13] M. Lesieur , O. Metais , P. Comte Large eddy simulation of turbulence. New York, Cambridge University Press, 2005. – 219 p.
- [14] T. J. Chung Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002. – 1012 p.
- [15] J. H. Ferziger, M. Peric Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer; 3rd edition, 2013, –426 p.
- [16] A. Issakhov Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. 318(4), –1282-1288 p., 042051. doi:10.1088/1742-6596/318/4/042051
- [17] Issakhov A. Mathematical modeling of influence of the thermal power plant with considering the meteorological condition at the reservoir-cooler // Вестник КазНУ, 2012. – No 3(74), - С. 50-59.

References

- [1] Z. Yang , T. Khangaonkar Modeling Tidal Circulation and Stratification in Skagit River Estuary Using an Unstructured Grid Ocean Model // Ocean Modelling. 2008. 28(1-3), – 34-49 pp.
- [2] C. Chen , H. Liu , R. C. Beardsley An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. 20(1), – 159-186 pp.
- [3] L. Zheng , C. Chen, H. Liu A modeling study of the Satilla River estuary, Georgia. I: Flooding-drying process and water exchange over the salt marsh-estuary-shelf complex // Estuaries and Coasts. 2003. 26(3), – 651-669 pp.

-
- [4] A. Isobe , R. C. Beardsley An estimate of the cross-frontal transport at the shelf break of the East China Sea with the Finite Volume Coastal Ocean Model // Journal of Geophysical Research. 111:C03012. doi:10.1029/2005JC 003290.
- [5] K. Aoki , A. Isobe Application of finite volume coastal ocean model to hindcasting the wind-induced sea-level variation in Fukuoka bay // Journal of Oceanography. 2007. 63(2), – 333-339 pp.
- [6] R. H. Weisberg , L. Zheng The circulation of Tampa Bay driven by buoyancy, tides, and winds, as simulated using a finite volume coastal ocean model // Journal of Geophysical Research. 111:C01005, doi:10.1029/2005JC003067, 2006.
- [7] W. Lick Numerical models of lakes currents. EPA-60013-76-020, 1976. – 140 p.
- [8] Y. Sheng , W. Lick , R.T. Gedney , F.B. Molls ANumerical computation of three-dimensional circulation of Lake Erie: A comparison of a free-surface model and rigid-Lid. Model. // J. of Phys. Ocean. 1978. 8, – 713 - 727 pp.
- [9] A. Issakhov Mathematical Modelling of the Influence of Thermal Power Plant on the Aquatic Environment with Different Meteorological Condition by Using Parallel Technologies // Power, Control and Optimization. Lecture Notes in Electrical Engineering.2013. 239, – 165-179 pp.
- [10] A.Issakhov Mathematical modelling of the influence of thermal power plant to the aquatic environment by using parallel technologies // AIP Conf. Proc. 2012. 1499, –15-18 pp. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4768963>
- [11] A. Issakhov Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant // International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. 16(5), – 1082-1096 pp.
- [12] A. Issakhov Mathematical modeling of the discharged heat water effect on the aquatic environment from thermal power plant under various operational capacities // Applied Mathematical Modelling. 2016. 40(2), – 229-238 pp.
- [13] M. Lesieur , O. Metais , P. Comte Large eddy simulation of turbulence. New York, Cambridge University Press, 2005. – 219 p.
- [14] T. J. Chung Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, 2002. – 1012 p.
- [15] J. H. Ferziger, M. Peric Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer; 3rd edition, 2013, –426 p.
- [16] A. Issakhov Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. 318(4), –1282-1288 p., 042051. doi:10.1088/1742-6596/318/4/042051
- [17] Issakhov A. Mathematical modeling of influence of the thermal power plant with considering the meteorological condition at the reservoir-cooler // Bulletin KazNU. 2012. 3(74), p. 50-59.