

УДК 004.051

А.А. ИСАХОВ

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

## Математическое моделирование тепловой нагрузки на водную среду при различных эксплуатационных мощностях ТЭС

В работе представлена математическая модель тепловой нагрузки на водную среду при различных эксплуатационных мощностях ТЭС, 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. На первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится 5-шаговым методом Рунге - Кутты. 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. 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.

**Ключевые слова:** стратифицированная среда, уравнения Навье-Стокса, эксплуатационная мощность ТЭС, метод конечных объемов, метод Рунге-Кутты.

*A. Issakhov*

## Mathematical modeling of the thermal discharge on the aquatic environment under various operational capacities of TPP

This paper presents a mathematical model of the thermal discharge on the aquatic environment under various operational capacities of TPP, which is solved by the equations of Navier - Stokes and temperature for an incompressible fluid in a stratified medium based on the method of splitting by physical parameters that can be discretize by the control volume method. In the first step it is assumed that the transfer of momentum carried out only by convection and diffusion. Intermediate velocity field is solved by 5-step Runge - Kutta method. At 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. Finally at the third step is assumed that the transfer is carried out only by pressure gradient. 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 medium, Navier-Stokes equations, operational capacity of TPP, finite volume method, Runge-Kutta method.}

А.А. Исахов

### ЖЭС - тің әртүрлі эксплуатациялық қуаттылығы кезіндегі сулы ортаға түсетін жылу салмағының математикалық моделі

Жұмыста соңғы көлем әдісімен аппроксимацияланатын, физикалық параметрлер бойынша ыдырау әдісіне негізделген, Навье - Стокс және стратификацияланған ортадағы сығылмайтын сұйыққа арналған температура теңдеуімен шешілетін, ЖЭС - тің әртүрлі эксплуатациялық қуаттылығы кезіндегі сулы ортаға түсетін жылу салмағының математикалық моделі ұсынылды. Бірінші кезеңде қозғалыс санының ауысуы конвекция мен диффузияның есебінен ғана болады деп болжанады. Аралық жылдамдық өрісі Рунге - Куттаның бес қадамды әдісімен табылады. Екінші кезеңде табылған аралық жылдамдық өріс арқылы қысым өрісі табылады. Қысым өрісі үшін Пуассон теңдеуі Якоби әдісімен шығарылады. Үшінші кезеңде алмастыру қысым градиенті арқылы жүзеге асады деп болжаймыз. 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, ЖЭС - тің эксплуатациялық қуаттылығы, ақырлы көлем әдісі, Рунге-Кутта әдісі.}

#### Введение

Окружающая среда - основа жизни человечества, а вырабатываемая из ресурсов энергия является основой современного мира. Однако производство электроэнергии оказывает пагубное влияние окружающей нас среде, ухудшая условия жизни. Основой энергетики являются разные типы электростанций. Производство электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭС), гидроэлектростанциях (ГЭС) и атомных электростанциях (АЭС) сопряжена с отрицательными воздействиями на окружающую среду. Взаимодействия энергетики и окружающей среды приобрела новые черты, распространяя влияние тепла на реки и озера.

Раньше о влиянии ТЭС или АЭС на окружающую среду не задумывались, так как главной целью было получение электроэнергии. Технология производства электроэнергии на ТЭС связана с большим количеством тепловых выбросов в окружающую среду. Отрицательное влияние энергетики на окружающую среду сегодня становится важной проблемой, так как загрязнение окружающей среды с каждым годом все увеличивается.

Сегодня важно найти выгодные источники электроэнергии. Одним из таких источников является ТЭС. На ТЭС сжигается топливо, т.е. уголь, газ или нефтепродукты. Произведенное тепло превращает воду в пар, который приводит в движение турбины, а затем электрогенераторы. Водяной пар охлаждают, и снова превращают в воду, опять нагревают и т.д. А на маленьких ТЭС помимо так называемых ископаемых топлив, т.е. угля, природного газа или нефти, можно также применять и другие топлива, например, солону или быстрорастущие деревья.

ТЭС делятся на конденсационные (КЭС), предназначенные для выработки только электрической энергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), производящие кроме электрической энергии еще тепловую в виде горячей воды или пара. Крупные КЭС районного значения получили название государственных районных электростанций (ГРЭС).

Выработка электроэнергии в ТЭС происходит посредством последовательных этапов. Вначале топливо сжигается (уголь, газ и т.д.) в паровом котле, при этом выде-

ляется тепло, которое превращает воду в пар. Постоянно поступающее давление пара вращает ротор турбины, который передает энергию вращения на вал генератора, и в результате производится электрический ток. Пар, после прохождения через турбину, конденсируется и вновь превращается в воду, которая дополнительно проходит через систему подогревателей и вновь попадает в паровой котел.

Все электростанций отрицательно воздействует на окружающую среду. Воздействие ТЭС на водную среду проявляется в таких основных моментах: сливы жидких загрязняющих веществ в водные объекты; оседание на поверхности водоемов твердых частиц при их выбросах в атмосферу; тепловое загрязнение водоемов и т.д.

Для охлаждения приборов конденсаторов паровых турбин, водо-, воздуха- и т.д. охладителей в ТЭС используется вода, которая забирается из водоемов или рек. Полученная подогретая вода вносит в водоемы или реки большое количество тепловых выбросов. Из конденсаторов турбин отводится приблизительно до  $2/3$  от всего количества тепла, получаемого при сгорании угля, нефтепродукта и т.д. Поэтому с охлаждением конденсаторов связывают тепловые загрязнения водоемов или рек сбросными водами из ТЭС. Количество тепла, отводимого с охлаждающей водой из ТЭС можно определить по установленным мощностям ТЭС. Горячая вода охлаждается в градирнях, затем подогретая вода сбрасывается в водоем или реку. В результате сброса подогретой воды в водоем или реку, что влияет отрицательно на водную среду, и приводит к снижению концентрации кислорода, бурному развитию водорослей, вымиранию водной флоры и фауны. Необходимо также сказать о том, что тепловые отходы приводят к изменению микроклимата водоема или рек. Так, вода, испаряющаяся из градирен, повышает влажность окружающего атмосферного воздуха, что приводит к образованию туманов и облаков.

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  $3^{\circ}\text{C}$  в летнее время и на  $5^{\circ}\text{C}$  в зимнее.

Распространение тепловых выбросов от ТЭС зависит от нескольких факторов: рельефа местности, температуры окружающей среды, скорости ветра, облачности, осадков 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 электростанции мощностью 2-4 млн. кВт требуется 70-160 м. куб. воды каждую секунду. 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-1, расположенная в Павлодарской области в 17 км. к северо-востоку от г. Экибастуз, Казахстан.

Техническое водоснабжение ГРЭС-1 осуществлялось по оборотной схеме с охлаждением циркуляционной воды. Поверхность водохранилища расположена на уровне 158.5 м, площадь равна 19.6 кв. км, максимальные размеры 4\*6 км, средняя глубина 4.6 м,

максимальная глубина у водозабора 8.5 м, объем водоема составляет 80 млн.куб.м. В водоеме использован селективный водозабор и водосброс совмещенного типа. Отработанная вода поступает в предварительный канал-смеситель, откуда через фильтрационную дамбу равномерно поступает в водоем-охладитель. Водозабор производится на расстоянии 40 метров от дамбы с глубины 5 м. Проектный расход воды 120 куб.м в секунду, а фактический расход колеблется в зависимости от эксплуатационной мощности ГРЭС в пределах 80-120 куб.м/сек.

### Математическая модель

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 [1,2,3]:

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

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

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

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

Для замыкания системы уравнений (1) – (3) используется модель турбулентности Смагоринского [4].

Для численного моделирования используется метод контрольного объема. Для этого представим уравнения Навье - Стокса и уравнение для температуры в виде интегральных законов сохранения для произвольного фиксированного объема  $\Omega$  с границей  $d\Omega$  [6,7,8,9,10]:

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

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)

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

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

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

### Численный алгоритм

Для решения уравнения (1) - (3) используется схема расщепления по физическим параметрам [5,6,7]. 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 - Кутты. 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. Алгоритм задачи распараллелен на высокопроизводительной системе. Расчеты производились на кластерных системах URSA и Cluster ДГП НИИ Математики и Механики при КазНУ им. аль-Фараби. При решении уравнения для температуры также применяется метод конечных объемов и аналогичные вычисления как для уравнения движения [11].

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

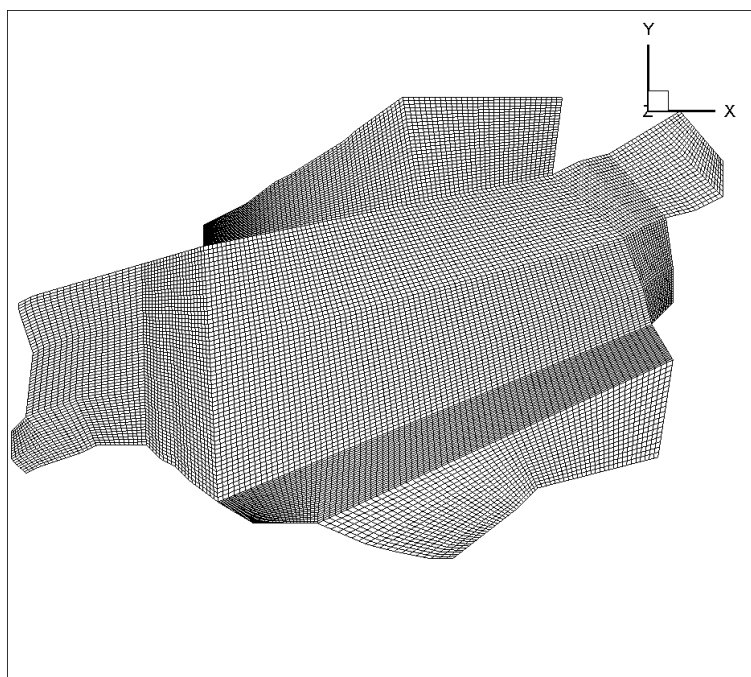
$$\text{II) } \oint_{\partial\Omega} (\Delta p) d\Gamma = \int_{\Omega} \frac{\nabla \vec{u}^*}{\tau} d\Omega,$$

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

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

### Результаты численного моделирования

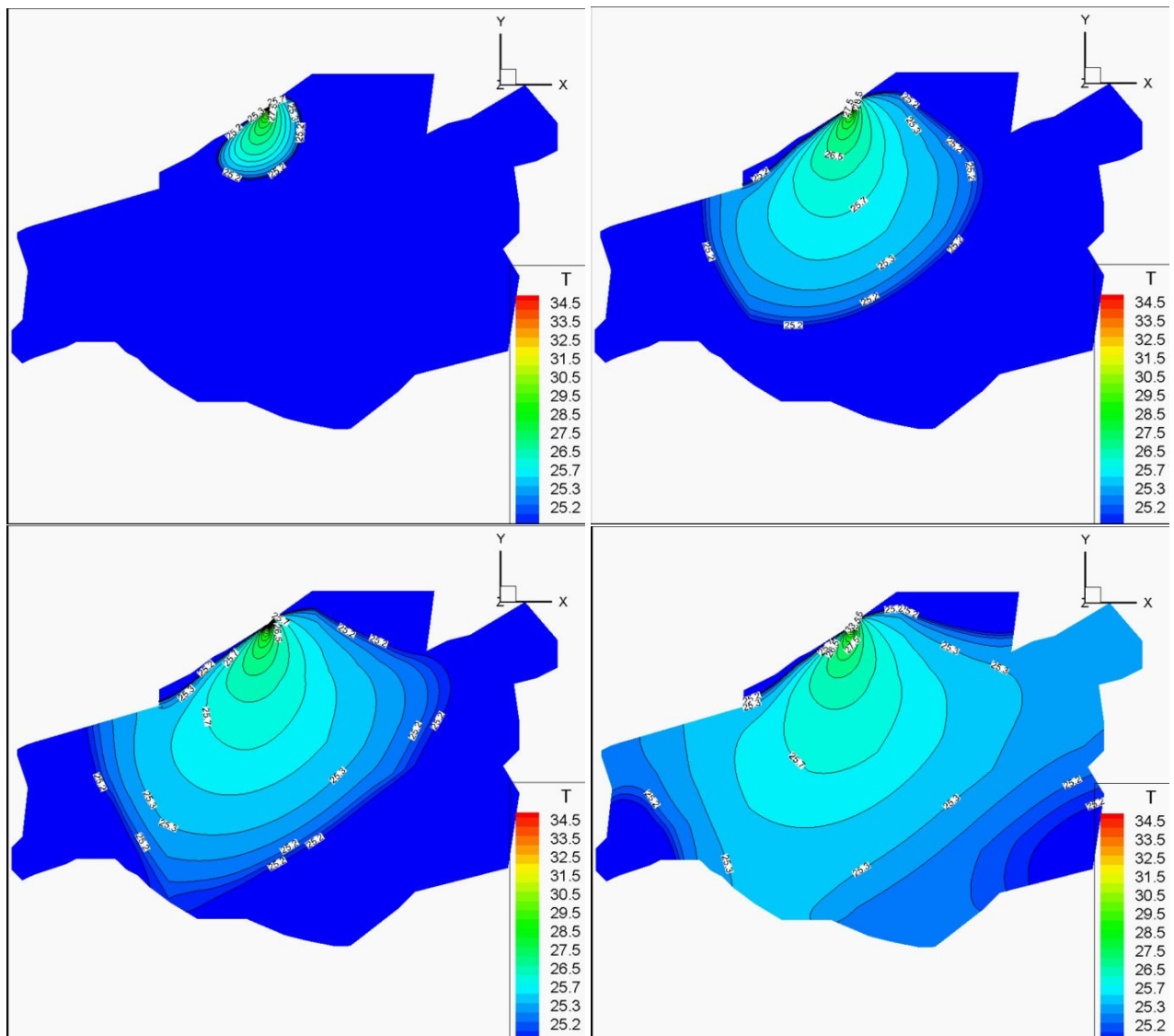
Для решения задач были заданы начальные и граничные условия. Начальные условия для скорости и температуры задаются в следующем виде:  $u_j = 0$ ,  $(j = 1, 2, 3)$ ,  $T = T_0$ . Граничные условия для скорости на дне и боковой границе задаются условием прилипания, а для температуры – адиабатические условия. 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-1.



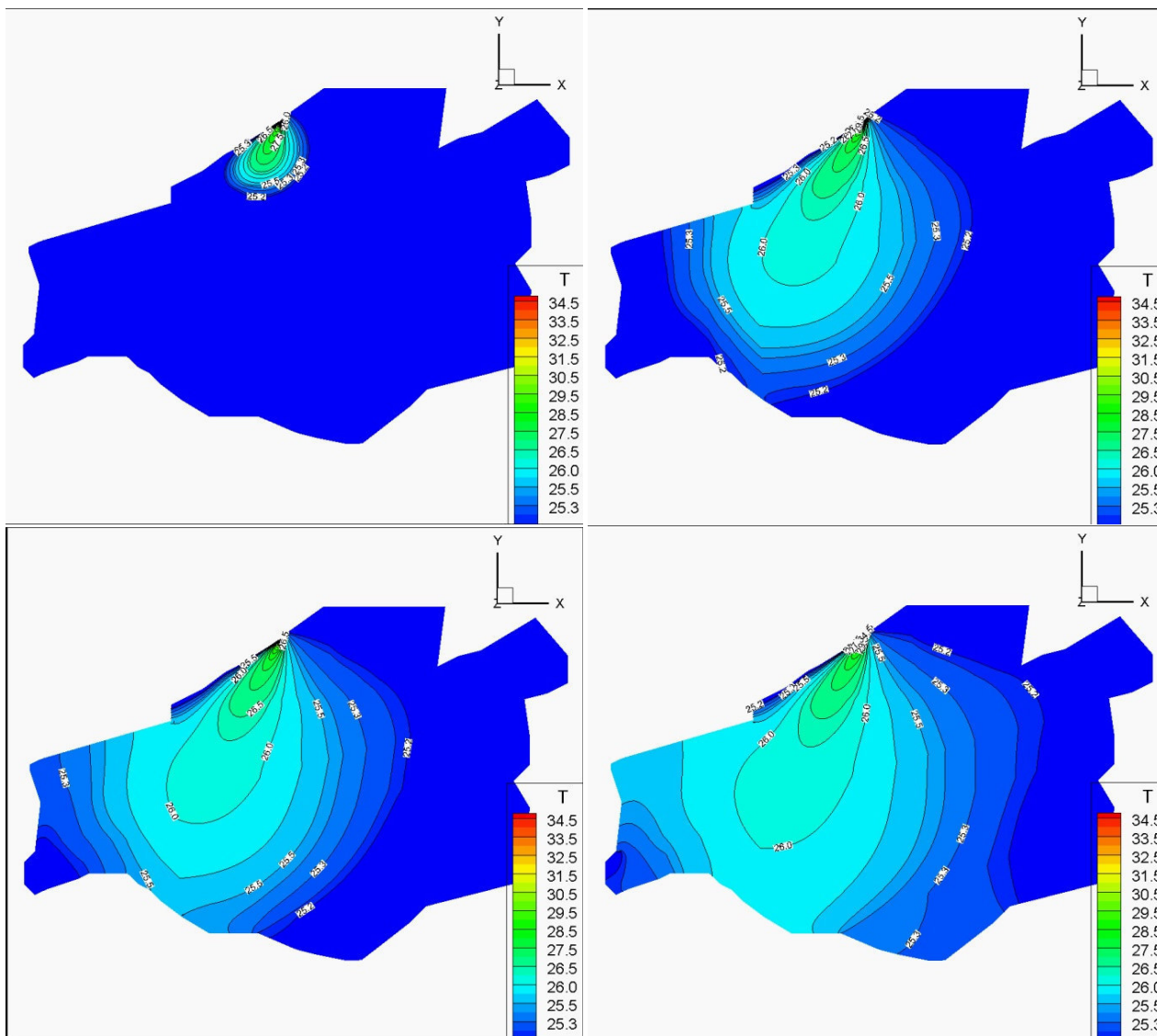
**Рисунок 1** – Вычислительная сетка для Экибастузского ГРЭС-1

Все расчеты проводились при условных данных, так как с 1996 до 2010 года Экибастузской ГРЭС-1 принадлежала американской энергетической компании Applied Energy Services Corporation и в этот период отсутствовали какие-либо данные. В связи с не оптимальным управлением Экибастузского ГРЭС-1 вода в водоеме-охладителе иногда перегревается, что приводит к полной остановке ГРЭС-1, после естественного охлаждения воды ГРЭС-1 запускается заново. В расчетах использовалась вычислительная сетка, имеющая более 300 000 вычислительных узлов. На рисунке 1 представлена вычислительная сетка для Экибастузского ГРЭС-1. На рисунке 2 изображены расчетный пространственный контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 200 МВт. На рисунке 3 показаны контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 800 МВт. 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 ТЭС, площадь теплового воздействия становится направленной в одну сторону, и приводит к подогреву воды с одной части водоема, что отрицательно сказывается на работоспособности ТЭС. При эксплуатационной мощности 800 МВт, температура распределяется в западную часть водоема и приближенно использует только половину водоема.



**Рисунок 2** – Контур и изолиний распределения температуры через 1, 5, 10 и 24 ч. после начала выброса потока воды из ГРЭС-1, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 200 МВт



**Рисунок 3** – Контур и изолиний распределения температуры через 1, 5, 10 и 24 ч. после начала выброса потока воды из ГРЭС-1, на поверхности воды для эксплуатационной мощности 800 МВт



### Заключение

Данная статья посвящена математическому моделированию тепловой нагрузки на водную среду при различных эксплуатационных мощностях ТЭС, которая решается уравнениями Навье - Стокса и температуры в стратифицированной среде. При повышении эксплуатационной мощности Экибастузской ГРЭС-1 водоем-охладитель работает не эффективно, подогревая западную часть водоема, а остальная часть не участвует при охлаждении подогретой воды из ТЭС. Таким образом, развитая модель трехмерного стратифицированного турбулентного течения позволяет выявить качественно и приближенно количественно основные закономерности гидротермических процессов, происходящих в водоемах.

### Литература

- [1] Issakhov A. 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. Volume 239, 2013, pp 165-179.
- [2] Issakhov A. Mathematical modelling of the influence of thermal power plant to the aquatic environment by using parallel technologies // AIP Conf. Proc. 1499, 2012. pp 15-18; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4768963>
- [3] Issakhov A. Mathematical modeling of influence of the thermal power plant with considering the meteorological condition at the reservoir-cooler // Вестник КазНУ, 2012, -№ 3(74), 50-59 с.
- [4] Lesieur M., Metais O., Comte P. Large eddy simulation of turbulence // New York, Cambridge University Press, 2005. p 219.
- [5] Issakhov A. Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method // Issue 4 (2011) J. Phys.: Conf. Ser. 318. pp. 1282-1288. doi:10.1088/1742-6596/318/4/042051
- [6] Chung T. J. Computational Fluid Dynamics // Cambridge University Press, 2002, p 1012.
- [7] Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer; 3rd edition, 2013, p 426.
- [8] Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т.2. // М.: Мир, 1991. 552 с.
- [9] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. - М.: Мир, 1972. 612 с.
- [10] Пейре Р., Тейлор Т. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. - Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 352 с.

- [11] Исахов А. Прямое численное моделирование (DNS) турбулентных течений с использованием параллельных технологии // Вестник КазНУ, 2012, -№ 2(73), с. 81-91.

## References

- [1] Issakhov A. 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. Volume 239, 2013, pp 165-179.
- [2] Issakhov A. Mathematical modelling of the influence of thermal power plant to the aquatic environment by using parallel technologies // AIP Conf. Proc. 1499, 2012. pp 15-18; doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4768963>
- [3] Issakhov A. Mathematical modeling of influence of the thermal power plant with considering the meteorological condition at the reservoir-cooler // Vestnik KazNU, 2012, -№ 3(74), p 50-59.
- [4] Lesieur M., Metais O., Comte P. Large eddy simulation of turbulence // New York, Cambridge University Press, 2005. p 219.
- [5] Issakhov A. Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method // Issue 4 (2011) J. Phys.: Conf. Ser. 318. pp. 1282-1288. doi:10.1088/1742-6596/318/4/042051
- [6] Chung T. J. Computational Fluid Dynamics // Cambridge University Press, 2002, p 1012.
- [7] Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer; 3rd edition, 2013, p 426.
- [8] Fletcher C. Vychislitelnie metodi v dinamike zhidkosti: V 2-h tomah: T.2. // M.: Mir, 1991. p 552.
- [9] Rouch P. Vychislitel'naya gidrodinamika. - M.: Mir, 1972. p 612.
- [10] Peyre R., Taylor T. Vychislitelnie metodi v zadachah mehaniki zhidkosti. - L.: Gidrometeoizdat, 1986. p 352.
- [11] Issakhov A. Pryamoe chislennoe modelirovanie (DNS) turbulentnih techenii s ispolzovaniem paralelnih tehnologii // Vestnik KazNU, 2012, -№ 2(73), p. 81-91.