

## Математическое моделирование влияние ТЭС на водную среду при охлаждении конденсаторов<sup>1</sup>

А.А. ИСАХОВ

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы  
e-mail: aliisahov@mail.ru*

### Аннотация

В работе представлена математическая модель влияния ТЭС на водную среду, которая решается уравнениями Навье - Стокса и температуры для несжимаемой жидкости в стратифицированной среде, основанные на методе расщепления по физическим параметрам которые аппроксимируются конечно-разностным методом.

Научно-технический прогресс невозможен без развития энергетики. Для повышения производительности труда первостепенное значение имеет механизация и автоматизация производственных процессов, то есть замена человеческого труда машинным. Но большинство технических средств имеет электрическую основу. Человечеству электроэнергия нужна, причем потребности в ней увеличиваются с каждым годом. Вместе с тем запасы традиционных природных топлив конечны. Конечны также и запасы ядерного топлива. Поэтому важно на сегодняшний день найти выгодные источники электроэнергии. Одним из таких источников является тепловая электростанция (ТЭС). На тепловых электростанциях сжигается топливо, например уголь, природный газ или нефть. Произведенное тело превращает воду в пар, который приводит в движение турбины, а вместе с ними и электрогенераторы. Водяной пар охлаждается, снова превращается в воду, опять нагревается и т.д. А на маленьких тепловых электростанциях помимо так называемых ископаемых топлив, то есть угля, природного газа или нефти, можно также применять и другие топлива, к примеру, солому или быстрорастущие деревья.

Тепловые электрические станции подразделяют на конденсационные (КЭС), предназначенные для выработки только электрической энергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), производящие кроме электрической тепловую энергию в виде горячей воды и пара. Крупные КЭС районного значения получили название государственных районных электростанций (ГРЭС).

Выработка энергии в тепловых электростанциях происходит при участии множества последовательных этапов, но общий принцип ее работы очень прост. Вначале топливо сжигается в специальной камере сгорания (паровом котле), при этом выделяется большое количество тепла, которое превращает воду, циркулирующую по специальным системам труб расположенным внутри котла, в пар. Постоянно нарастающее давление пара вращает ротор турбины, которая передает энергию вращения на вал генератора, и в результате вырабатывается электрический ток. Система пар/вода замкнута. Пар, после прохождения через турбину, конденсируется и вновь превращается в воду, которая

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Комитетом науки МОН РК, грант № 0684/ГФ, 2012г.-2014г.

дополнительно проходит через систему подогревателей и вновь попадает в паровой котел.

Все типы электростанций отрицательно воздействует на окружающую среду. Воздействие ТЭС на водную среду проявляется в таких основных моментах:

- а) сливы жидких загрязняющих веществ в водные объекты;
- б) оседание на поверхности водоемов твердых частиц при их выбросах в атмосферу;
- в) тепловое загрязнение водоемов.

Особую группу вод, используемых ТЭС, составляют охлаждающие воды, забираемые из водоемов на охлаждение поверхностных теплообменных аппаратов - конденсаторов паровых турбин, водо-, масло-, газо- и воздухоохладителей. Эти воды вносят в водоем большое количество тепла. Из конденсаторов турбин отводится приблизительно до двух третей всего количества тепла, получаемого при сгорании топлива, что намного превосходит сумму тепла, отводимого от других охлаждаемых теплообменников. Поэтому с охлаждением конденсаторов связывают обычно так называемые "тепловые загрязнения" водоемов сбросными водами ТЭС. О количестве тепла, отводимого с охлаждающей водой отдельных электростанций можно судить по установленным энергетическим мощностям. Горячая вода охлаждается в градирнях. Затем подогретая вода возвращается в водную среду. В результате сброса подогретых вод в водные объекты происходят неблагоприятные процессы, приводящие к эвтрофикации водоема, снижению концентрации растворенного кислорода, бурное развитие водорослей, сокращения видовой разнообразия водной фауны. Необходимо также сказать о том, что тепловое загрязнение приводит также к изменению микроклимата. Так, вода, испаряющаяся из градирен, резко повышает влажность окружающего воздуха, что в свою очередь приводит к образованию туманов, облаков.

В качестве примера подобного воздействия ТЭС на водную среду взята Экибастузская ГРЭС-1, расположенная в Павлодарской области в 17 км. К северо-востоку от г. Экибастуза.

## 1 Математическая модель

В водоемах-охладителях пространственное изменение температуры невелико. Поэтому стратифицированное течение в водоеме - охладителе можно описать уравнениями в приближении Буссинеска. Для математического моделирования рассматривается системы уравнений, включающей уравнений движения, уравнения неразрывности и уравнение для температуры. Рассматривается развитое пространственное турбулентное течение стратифицированном водоеме. [14,15] Для моделирования распространения температуры в водоеме используется трехмерная модель

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

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

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

где  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$ ,  $g_i$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения,  $u_i$  – компоненты скорости,  $\chi$  – коэффициент температуропроводности,  $T_0$  – равновесной температуре,  $T$  – отклонение температуры от равновесия

В качестве модели турбулентности используется динамическая модель Смагоринского [11,12]. Для применения динамической модели проводится двойное осреднение с длиной фильтра  $\overline{\Delta} = 2\Delta$ , тогда

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j} \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u_j} \overline{u_i} - \overline{u_j} \overline{u_i})}{\partial x_j} \quad (4)$$

Уравнение (1), подвергнутое осреднению с двумя фильтрами длиной  $\overline{\Delta}$  и  $\Delta$  соответственно, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j} \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

где  $T_{ij} = \overline{u_j} \overline{u_i} - \overline{u_j} \overline{u_i}$ .

Из (4) и (5) следует

$$T_{ij} = \overline{\tau_{ij}} + \overline{u_j} \overline{u_i} - \overline{u_j} \overline{u_i},$$

тогда  $T_{ij}$  имеет следующий вид:

$$T_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} T_{kk} = -2(C_s \overline{\Delta})^2 (2\overline{s_{ij} s_{ij}})^{1/2} \overline{s_{ij}}$$

а напряжения Леонарда имеют вид:

$$L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} = -2(C_s)^2 \left[ (\overline{\Delta})^2 (2\overline{s_{ij} s_{ij}})^{1/2} \overline{s_{ij}} - (\Delta)^2 (2\overline{s_{ij} s_{ij}})^{1/2} \overline{s_{ij}} \right] \quad (6)$$

Из (6) при использовании метода наименьших квадратов находится значение  $C_s$  в виде

$$C_s^2 = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{lk} M_{lk}},$$

где  $M_{ij} = \left[ (\overline{\Delta})^2 (2\overline{s_{ij} s_{ij}})^{1/2} \overline{s_{ij}} - (\Delta)^2 (2\overline{s_{ij} s_{ij}})^{1/2} \overline{s_{ij}} \right]$

Для нестационарного трехмерного уравнения движения, неразрывности и температуры определены начальные и граничные условия, удовлетворяющие уравнениям.

## 2 Численный алгоритм

Численное решение системы (1) - (3) проводится на разнесенной сетке с использованием схемы против потока второго типа и компактной аппроксимации для конвективного члена [1,2,3,4,5,6,7,10]. Для решения задачи с учетом выше предложенной модели турбулентности используется схема расщепления по физическим параметрам [9,12]. На первом этапе предполагается, что перенос количества движения осуществляется только

за счет конвекции и диффузии. Промежуточное поле скорости находится методом дробных шагов, при использовании метода прогонки. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скорости, находится поле давления. Уравнение Пуассона для поля давления решается методом Фурье в сочетании с методом матричной прогонки, которая применяется для определения коэффициентов Фурье [6,8]. На третьем этапе предполагается, что перенос осуществляется только за счет градиента давления. Алгоритм задачи распараллелен на высокопроизводительной системе[13].

$$I) \frac{\vec{u}^* - \vec{u}^n}{\tau} = -(\nabla \vec{u}^n \vec{u}^* - \nu \Delta \vec{u}^*)$$

$$II) \Delta p = \frac{\nabla \vec{u}^*}{\tau}$$

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

### 3 Результаты численного моделирования

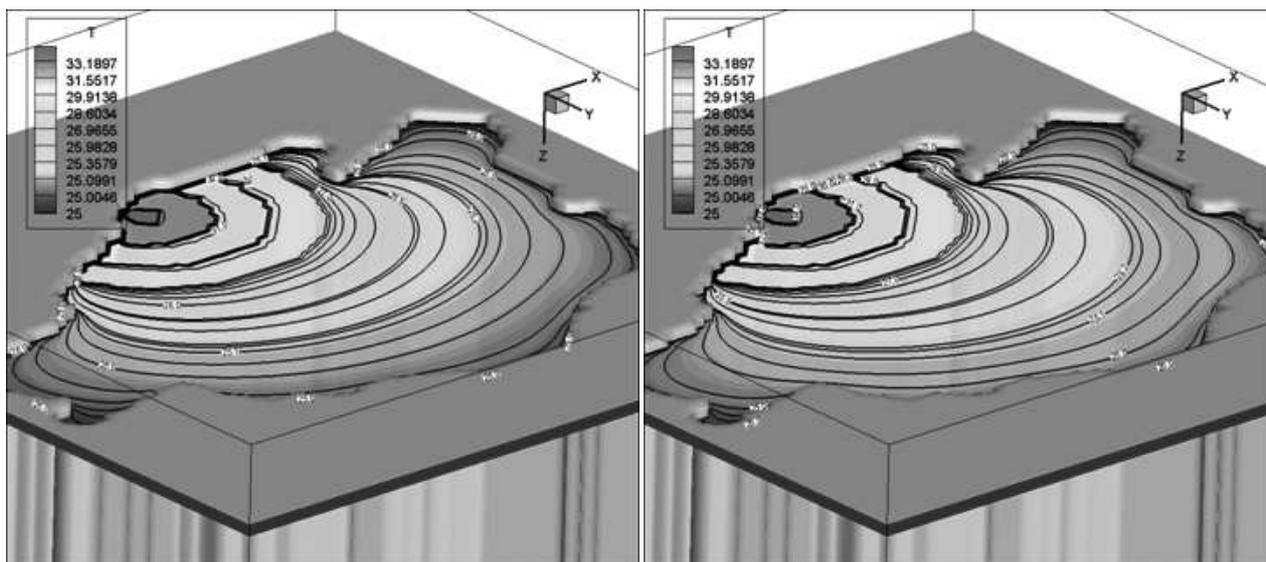


Рис.1 Контур и изолиний распределения температуры через 15 и 20 ч. после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды, вид с боку.

Для решения задач были заданы начальные и граничные условия. В расчетах использовалась сетка размерами 100x100x100. На рисунке 1 изображены расчетный пространственный контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды, вид с боку. На рисунке 2 показаны контур и изолиний распределения температуры в различные моменты времени после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды, вид сверху. На обоих рисунках видно, что

распределения температуры с удалением от стока приближается к изотермическому. Полученные результаты показывают, что распределения температура распространяется на большую площадь.

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

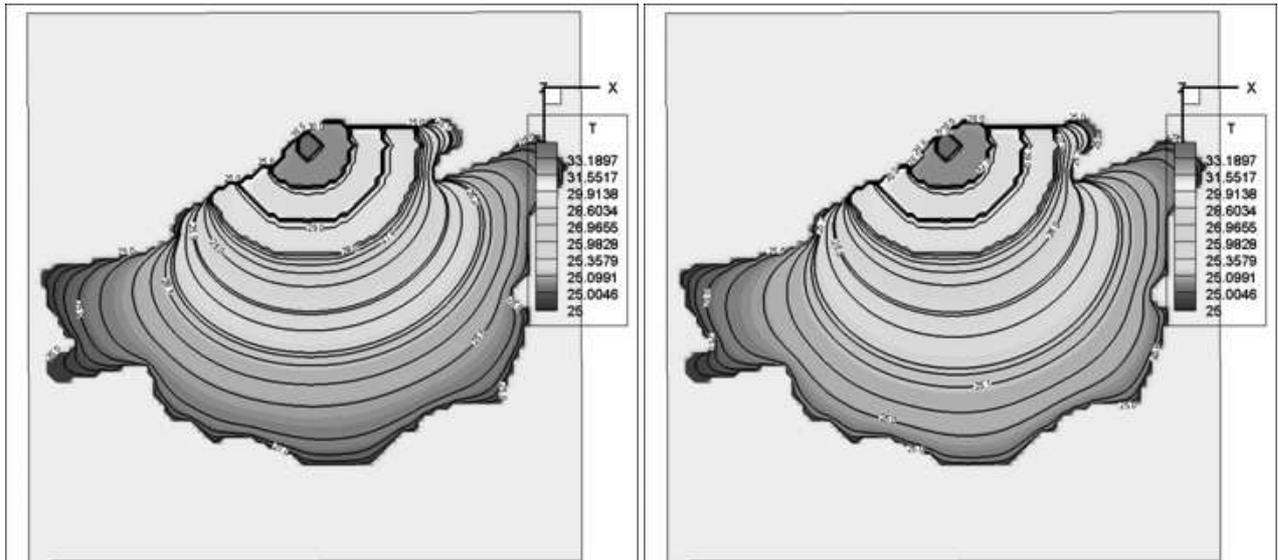


Рис.2 Контур и изолиний распределения температуры через 15 и 20 ч. после старта работы ГРЭС-1, на поверхности воды, вид сверху.

## Список литературы

- [1] *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т.2. - М.: Мир, 1991. 552 с.
- [2] *Anderson D.A., Tannehil J.C., and Pletcher R.H.* Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. New York: McGraw-Hill. 1984
- [3] *Chung T.J.* Computational Fluid Dynamics. Cambridge university press. 2002
- [4] *Fletcher C.A.* Computational Techniques for Fluid Dynamimics. Vol 1: Fundamental and General Techniques, Berlin: Springer-Verlag. 1988
- [5] *Fletcher C.A.* Computational Techniques for Fluid Dynamimics. Vol 2: Special Techniques for Differential Flow Categories, Berlin: Springer-Verlag. 1988
- [6] *Peyret R., Taylor D. Th.* Computational Methods for Fluid Flow. New York: Berlin: Springer-Verlag. 1983

- [7] Толстых А.И. Компактные разностные схемы и их применение в задачах аэрогидродинамики. - М.: Наука, 1990. 230 с.
- [8] Roache P.J. Computational Fluid Dynamics, Albuquerque, NM: Hermosa Publications. 1972
- [9] Яненко Н.Н. Методы дробных шагов решения многомерных задач математической физике. - Н: Наука, 1967. 197 с.
- [10] Tannehill J.C., Anderson D.A., and Pletcher R.H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. 2nd ed., New York: McGraw-Hill. 1997
- [11] Tennekes H., Lumley J.L. A first course in turbulence. The MIT Press. 1972
- [12] Issakhov A. Large eddy simulation of turbulent mixing by using 3D decomposition method Issue 4, J. Phys.: Conf. Ser. 318 042051. 2011
- [13] Issakhov A., Zhumagulov B. Parallel implementation of numerical methods for solving turbulent flows Вестник НИА РК. - 2012, - № 1(43) - С.12-24
- [14] Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 167 с.
- [15] Мизгай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 264 с.

*A.A. Issakhov, Mathematical modeling of the influence of thermal power station in aquatic environment when cooled condensers* The Bulletin of KazNU, ser. math., mech., inf. 2011, №4(71), 86 – 91

This paper presents the mathematical model of the thermal power station influence in the aquatic environment, which is solved by the Navier - Stokes and temperature equations for an incompressible fluid in a stratified medium based on the method of splitting into physical parameters which are approximated by finite-difference method.

*А.А. Исахов, Жылу электр станциясының конденсаторларды салқындатудағы су ортасына әсерінің математикалық моделі*, ҚазҰУ хабаршысы, мат., мех., инф. сериясы 2011, №4(71), 86 – 91

Бұл жұмыста жылу электр станциясының су ортасына әсерінің математикалық моделі қарастылды, ол старификациялық ортадағы сығылмайтын сұйық үшін Навье - Стокс және температураға байланысты теңдеулер қарастылды. Ол ақырлы айырымдар әдісі арқылы жуықталып физикалық параметрға байланысты бөлшектеу әдісімен шешілген.