

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.165

Матричное представление модели тепловой схемы электрической станции

А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В рамках методологии матричной формализации разработаны модели для расчета практически всего оборудования ТЭС, кроме турбоустановки – собственно турбоагрегата и системы регенеративного подогрева питательной воды. Разработка в рамках единой методологии математической модели турбоустановки позволит создать замкнутое математическое описание всей тепловой схемы ТЭС, что, в свою очередь, обеспечит возможность более обоснованного определения энергетических характеристик оборудования, создания компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов технологических систем и подсистем ТЭС.

Материалы и методы. Для исследования многопоточных теплообменных систем и подсистем ТЭС используются уравнения балансов массы и энергии, для решения которых применяются методы математического программирования. Энергетические характеристики и показатели качества агрегатов ТЭС определяются в рамках существующего нормативного подхода.

Результаты. В рамках методологии матричной формализации разработаны модель турбоагрегата и единый подход к описанию ТЭС как многопоточной энергообменной системы. Получены и проанализированы решения модели в целях построения энергетических характеристик теплофикационного турбоагрегата. Выполнено сравнение результатов расчета с энергетическими характеристиками действующего турбоагрегата, показана достоверность и обоснованность предложенного подхода.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы в качестве основы для повышения степени обоснованности расчета энергетических характеристик оборудования, создания компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов технологических систем и подсистем ТЭС.

Ключевые слова: матричная формализация, электрическая станция, баланс энергии, баланс массы, энергетические характеристики, многопоточные системы, энергообмен

Matrix formalization of power plant thermal scheme calculation

A.E. Barochkin, V.P. Zhukov, E.V. Barochkin, G.V. Ledukhovskiy
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background. The known models based on the matrix formalization methodology can be used for calculating practically all equipment of a heat power plant except turbine plants – the turbogenerator itself and the system of regenerative feedwater heating. By developing a mathematical model of a turbine plant within the same methodology, we will be able to create a self-contained mathematical description of the whole thermal scheme of heat power plants. This, in turn, will enable us to more reasonably determine the equipment energy characteristics, to create computer simulators and software tools to optimize the modes of technological systems and subsystems of heat power plants.

Materials and methods. Multiflow heat and mass exchange systems and subsystems of heat power plants are studied by the equations of mass and energy balances, solved by mathematical programming methods. The energy characteristics and quality indicators of heat power plant units are determined in terms of the existing normative approach.

Results. Using the matrix formalization methodology, we have developed a turbine plant model and a unified approach to the description of heat power plants as a multi-flow energy and mass exchange system. We have also obtained and analyzed the model solutions for the purpose of developing the power characteristics of the thermal turbine unit, compared the calculation results with the energy characteristics of an operating turbine unit, and thus confirmed the reliability and validity of the proposed approach.

Conclusions. The obtained results can be used as the basis for increasing the degree of validity of calculating equipment energy characteristics, creating computer simulators and software tools for optimizing modes of technological systems and subsystems of heat power plants.

Key words: matrix formalization, electric power plant, energy balance, mass balance, energy characteristics, multifold systems, energy and mass exchange

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.066-072

Введение. Ранее нами [1–4] в рамках методологии матричной формализации разработаны модели деаэрационных установок [2], многоступенчатых теплообменных аппаратов с произвольной конфигурацией потоков [3], конденсаторов турбин [4], котельных агрегатов и систем теплофикации [1]. Таким образом, в рамках матричной формализации не разработан подход к расчету турбоустановки – собственно турбоагрегата и системы регенеративного подогрева питательной воды. Разработка в рамках единой методологии матричного описания всех подсистем позволит создать замкнутое математическое описание тепловой схемы ТЭС в целом, которое обеспечит возможность более обоснованного определения энергетических характеристик [5, 6], разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования ТЭС, анализа показателей работы как отдельных агрегатов, так и всей станции [7, 8]. Таким образом, разработка единой методологии на основе матричной формализации расчета систем и подсистем ТЭС является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой.

Объектом исследования являются методы расчета и анализа режимов работы и структуры схем включения теплотехнического оборудования ТЭС. Предметом исследований является матричная формализация расчета тепловой схемы ТЭС как многопоточной энергообменной системы. Целью исследования является разработка в рамках методологии матричной формализации модели турбоустановки ТЭС для ее использования при расчете энергетических характеристик выбранной подсистемы станции.

Методы исследования. Для исследования многопоточных теплообменных систем ТЭС используются уравнения балансов массы и энергии, для решения полученных систем уравнений применяются методы математического программирования [9].

Разработка математического описания многопоточной энергообменной системы рассматривается на примере турбоустановки с конденсацией пара и двумя регулируемыми отборами – производственным и теплофикационным (далее – турбоустановки типа ПТ).

Принципиальная тепловая схема исследуемого объекта представлена на рис. 1. Топливо (Т) подается в котел (КА), где организуется его

сжигание с преобразованием химической энергии топлива в тепловую энергию пара. В паровой турбине (ТА) тепловая энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора, которая, в свою очередь, в турбогенераторе переходит в электрическую энергию. В конденсаторе (К) отработавший в турбине пар конденсируется. Образовавшийся при конденсации турбинный конденсат из конденсатора подается конденсатным насосом (КН) в регенеративный подогреватель (П), в котором организуется его нагрев паром нерегулируемого отбора турбины. Система регенеративного подогрева питательной воды для наглядности представлена на рис. 1 только одним смешивающим подогревателем. После подогревателя питательная вода с помощью питательного насоса (ПН) подается в котел. Из регулируемых отборов турбины пар направляется на производственные нужды (тепловая мощность Q_p) и теплофикацию (Q_t). Конденсат пара производственного отбора возвращается в регенеративный подогреватель, а конденсат пара теплофикационного отбора – в конденсатор.

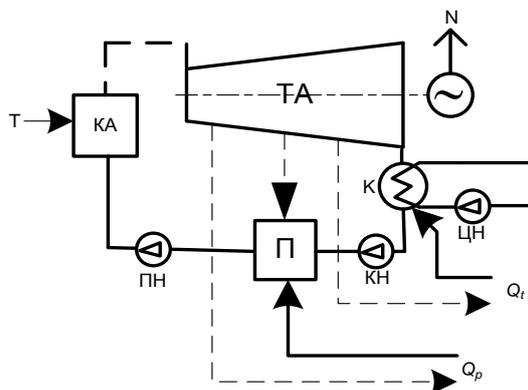


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки типа ПТ

Традиционно котел [10], турбина [11], система регенеративного подогрева питательной воды [12], деаэрационная установка [13], схемы теплофикации и циркуляционного водоснабжения рассматриваются отдельно. Объединение при моделировании указанных подсистем в одну многопоточную систему связано с необходимостью учета взаимного влияния этих подсистем на

эффективность производства тепловой и электрической энергии на ТЭС.

Для разработки модели на основании принципиальной тепловой схемы рис. 1 строится расчетная схема, представленная на рис. 2 с выделением подсистем основных потоков и с указанием связей между этими подсистемами. Направления движения массы и энергии на схеме показаны стрелками. Следует отметить, что потоки массы переносят одновременно и энергию, но потоки энергии не всегда сопровождаются переносом массы. Например, в рекуперативных подогревателях или турбогенераторе передача энергии не сопровождается передачей массы. Стрелками со сплошными (вода) и штриховыми (пар) линиями показаны совместные потоки массы и энергии. Пунктирными линиями на рисунке показаны потоки энергии, которые не сопровождаются переносом массы.

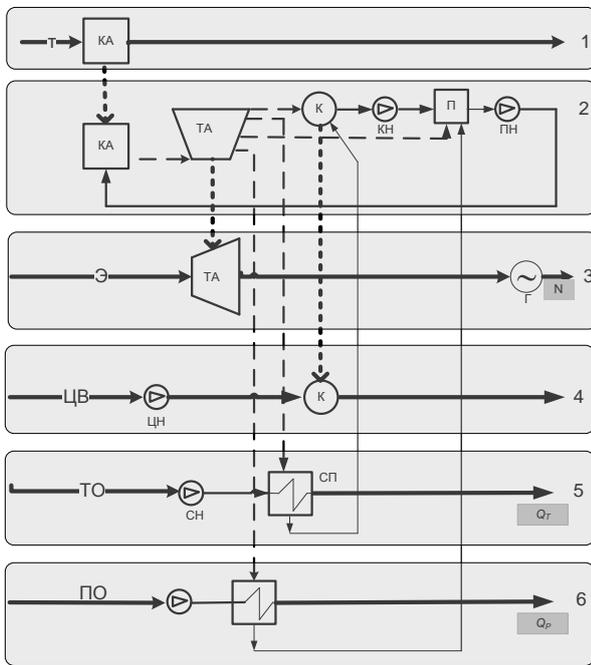


Рис. 2. Расчетная схема для системы турбоустановки типа ПТ с выделением основных подсистем: 1 – топливо; 2 – вода и пар; 3 – электрическая энергия; 4 – циркуляционная вода; 5 – теплофикационный отбор; 6 – производственный отбор; сплошные линии – связи по воде между подсистемами; штриховые линии – по пару; пунктирные линии – по энергии

Из анализа основных потоков энергии и массы, представленных на рис. 2, строятся балансовые соотношения. Топливо (поток 1) подается в котел КА, где происходит преобразование химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов его сгорания. В котле тепловая энергия продуктов сгорания трансформируется в тепловую энергию воды и пара (поток 2). Переход энергии из подсистемы 1 в подсистему 2 показан на рис. 2 пунктирной линией, при этом массообмен между потоками 1 и 2 не происходит. Пар после котла поступает в турбоустановку, где тепловая энергия пара преобразуется в электриче-

скую энергию (поток 3). Пар после турбины поступает в конденсатор, где происходит его конденсация и нагрев охлаждающей воды (поток 4). Передача тепловой энергии от пара циркуляционной охлаждающей воде также показана на рис. 2 пунктирной линией. Из отборов турбины пар подается в систему регенеративного подогрева питательной воды, на производственные и теплофикационные нужды (потоки 5 и 6).

При разработке модели системы турбоустановки типа ПТ сделаны следующие упрощения и допущения:

- система регенеративного подогрева питательной воды включает один смешивающий подогреватель;
- один котел снабжает паром одну турбоустановку;
- котел представляет собой рекуперативный теплообменник, в котором вода нагревается, испаряется, а пар перегревается (КПД брутто котла считаем известным [10]).

Согласно расчетной схеме модели системы, представленной на рис. 2, записываются следующие балансовые уравнения:

- баланс энергии для котла;
- баланс энергии для турбины;
- баланс массы для турбины;
- баланс энергии для регенеративного подогревателя;
- баланс энергии для конденсатора;
- баланс энергии для производственного отбора пара;
- баланс энергии для теплофикационного отбора пара.

Перечисленные выше семь балансовых соотношений записываются в виде системы:

$$\begin{cases} Q_H^p B \eta_k = D(i_o - i_{пв}), \\ D(i_o - i_p) \eta_{t1} + (D - D_p)(i_p - i_r) \eta_{t2} + \\ + (D - D_p - D_r)(i_r - i_t) \eta_{t3} + D_k(i_t - i_k) \eta_{t4} = N, \\ D i_{пв} - D_p i_{ps} - D_r i_r - D_t i_{ks} - D_k i_{ks} = 0, \\ D - D_p - D_r - D_t - D_k = 0, \\ D_k(i_k - i_{ks}) = D_{цв} C \Delta t, \\ D_p(i_p - i_{ps}) = Q_p, \\ D_t(i_t - i_{ts}) = Q_t, \end{cases} \quad (1)$$

где D – расход пара; i – энтальпия; N – электрическая мощность; B – расход топлива; Q_H^p – удельная теплота сгорания топлива; Q_p , Q_t – производственная и теплофикационная нагрузки; Δt – нагрев охлаждающей воды в конденсаторе; c – удельная теплоемкость воды; η_{ti} – произведение внутреннего относительного КПД i -го отсека проточной части турбины на электромеханический КПД турбоустановки; η_k – произведение КПД брутто котла на КПД теплового потока (учитывает потери теплоты при транспорте пара от котла до турбоустановки и питательной воды от турбоустановки до котла); индекс «о» относится к острому пару, «р» – производственному отбору,

«*t*» – теплофикационному отбору, «*r*» – регенеративному отбору, «*цв*» – циркуляционному водоснабжению; «*к*» – конденсатору, «*s*» – состоянию насыщения; «*пв*» – питательной воде.

В матричном виде система (1) представляется следующим образом:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{X}_v, \quad (2)$$

где \mathbf{X} – матрица-столбец размера 7×1 искомым параметров:

$$\mathbf{X} = [B \ D \ D_p \ D_r \ D_t \ D_k \ D_{цв}]'; \quad (3)$$

\mathbf{X}_v – матрица-столбец размера 7×1 заданных нагрузок:

$$\mathbf{X}_v = [0 \ N \ 0 \ 0 \ 0 \ Q_p \ Q_t]'; \quad (4)$$

верхний индекс «'» означает транспонирование матрицы; $\mathbf{A} = \{a_{ij}\} (i = \overline{1,7}; j = \overline{1,7})$ – матрица размера 7×7 известных коэффициентов:

$$a_{11} = Q_H^p \eta_k; \quad a_{12} = i_o - i_{пв};$$

$$a_{22} = (i_o - i_p) \eta_{t1} + (i_p - i_r) \eta_{t2} + (i_r - i_t) \eta_{t3};$$

$$a_{23} = -(i_p - i_r) \eta_{t2} - (i_r - i_t) \eta_{t3};$$

$$a_{24} = -(i_r - i_t) \eta_{t3}; \quad a_{25} = (i_t - i_k) \eta_{t4};$$

$$a_{32} = i_{пв}; \quad a_{33} = -i_{ps}; \quad a_{34} = -i_r; \quad a_{35} = -i_{ks}; \quad a_{36} = -i_{ks};$$

$$a_{42} = 1; \quad a_{43} = -1; \quad a_{44} = -1; \quad a_{45} = -1; \quad a_{46} = -1;$$

$$a_{55} = i_k - i_{ks}; \quad a_{56} = -\Delta t^* c;$$

$$a_{63} = i_p - i_{ps}; \quad a_{73} = i_t - i_{ks}.$$

Значения всех коэффициентов матрицы \mathbf{A} , которые не перечислены выше, равны нулю.

Решение системы (2), выполненное методом обращения матриц [9], позволяет определить вектор искомым параметров (3) согласно выражению

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{(-1)} \mathbf{X}_v, \quad (5)$$

где возведение матрицы \mathbf{A} в степень (-1) означает ее обращение.

Для построения энергетических характеристик оборудования ТЭС¹³ требуется определить удельный расход тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии q_t , ккал/(кВт·ч), который является величиной, обратной абсолютному электрическому КПД турбоустановки η [5, 6]:

$$\eta = N / (B Q_H^p \eta_k - Q_t - Q_p); \quad (6)$$

$$q_t = 3600 / (\eta \cdot 4,19). \quad (7)$$

Для проведения расчетов в рамках модели (2) выбирается зависимость η_t от расхода пара через турбину, вид которой принимается согласно [12]:

$$\eta_t = 0,825 \cdot (1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d})), \quad (8)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты, значения которых определяются типом турбины и состоянием ее проточной части; \bar{d} – относительный расход пара через проточную часть турбины. Графический вид зависимости (8) представлен на рис. 3.

Для демонстрации прогностических возможностей модели приводятся результаты расчета, выполненного применительно к турбине ПТ-65/75-130/13. Целью расчета является определение энергетических характеристик турбины. Значения параметров теплоносителей, которые были использованы в качестве исходных данных η_t при проведении расчета, показаны в таблице.

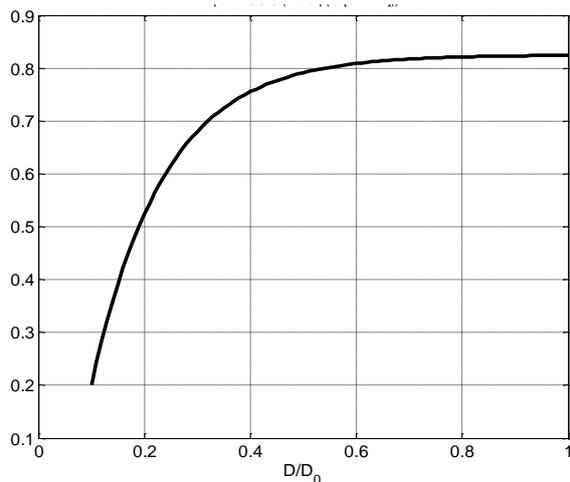


Рис. 3. Зависимость коэффициента полезного действия η_t от относительного расхода пара через турбину

Исходные данные для расчета

Теплоноситель	Параметры	
	энтальпия, кДж/кг	давление, бар
Острый пар	3486	130
Пар производственного отбора	2862	14
Пар регенеративного отбора	2862	14
Пар теплофикационного отбора	2453	1,4
Пар перед конденсатором	2021	0,05
Турбинный конденсат после конденсатора	138,19	–
Питательная вода перед котлом	814,9	–

Для проведения расчетных исследований согласно модели (1)–(8) разработаны алгоритм и компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB.

Результаты. Результаты расчетного анализа, проведенного в рамках предложенной модели (1)–(8), представлены на рис. 4 в виде энергетических характеристик турбоустановки [5] для различных значений производственной и теплофикационной нагрузок и вырабатываемой электрической мощности. Точками представлены

¹³РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.

значения q_b , принятые для действующей турбины рассматриваемого типа по данным нормативно-технической документации по топливоиспользованию Орской ТЭЦ.

Анализ приведенных данных показывает, что при нулевой нагрузке производственного отбора результаты расчета практически полностью совпадают с принятыми для действующей турбины (рис. 4,а): среднее относительное отклонение не превышает 0,4 %. Однако при увеличении нагрузки производственного отбора до 20 Гкал/ч (рис. 4,б) наблюдается увеличение расхождения до 2,3 %. Очевидно, такое расхождение связано с использованием одинакового для всех отсеков проточной части турбины значения коэффициента полезного действия η_b , а также с принятыми при разработке модели упрощениями по системе регенеративного подогрева питательной воды. Дальнейшее совершенствование модели целесообразно проводить с учетом разных характеристик экономичности отдельных отсеков турбины и реальной тепловой схемы турбоустановки.

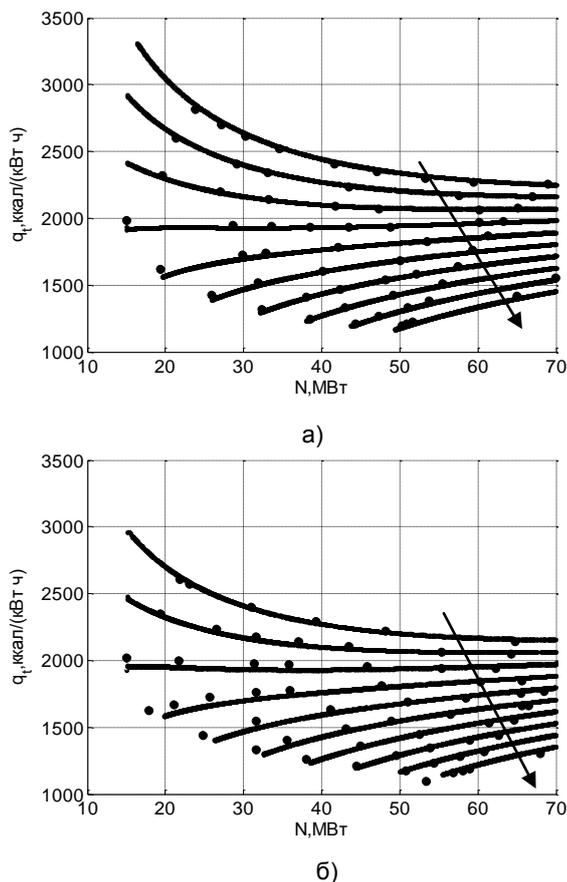


Рис. 4. Энергетические характеристики турбины ПТ-65/75-130/13 для различных нагрузок производственного отбора: а – $Q_p = 0$; б – $Q_p = 20$ Гкал/ч. Стрелкой на поле графика показано направление возрастания значений теплотификационной нагрузки $Q_t = [0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90]$ Гкал/ч

Выполненный расчетный анализ показал, что найденное решение системы (2) позволяет при ограниченном объеме используемых экспериментальных данных определять энергетиче-

ские характеристики турбины. Предложенный подход может быть использован также для диагностики состояния проточной части турбины путем анализа отклонений рассчитанных значений параметров от экспериментальных.

Важно отметить, что представленный метод расчета, полученный с рядом допущений, может быть существенно детализирован через введение в модель (2) более точных подмоделей для расчета котла [14], конденсатора, системы теплообеспечения [1] и других подсистем ТЭС [15, 16].

Выводы. Предложенная методология матричной формализации позволяет в рамках единого подхода проводить расчетный анализ систем и подсистем ТЭС в целях построения энергетических характеристик, разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования ТЭС. На основе анализа полученных результатов расчета могут быть разработаны системы диагностики технического состояния энергетического оборудования по показателям экономичности.

Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменников установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
2. Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ледуховский Г.В. Моделирование теплообмена в струйных деаэраторах со сложной конфигурацией потоков // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47, № 9. – С. 76–79.
3. Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В. Метод расчета многоступенчатых теплообменников сложной конфигурации с учетом фазового перехода теплоносителей // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 3. – С. 138–139.
4. Моделирование теплопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 52–56.
5. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.
6. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
7. Горшков А.С. Техно-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
8. Цинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 528 с.
9. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Физматлит, 2004. – 264 с.
10. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 240 с.
11. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
12. Щегляев А.В. Паровые турбины. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.
13. Шаратов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.

14. **Тепловой** расчет котлов / под ред. Г.М. Казана. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 260 с.

15. **Разработка** компьютерной модели и расчет оптимальных режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» / Н.А. Зройчиков, В.А. Кудинов, А.Г. Коваленко и др. // Теплоэнергетика. – 2007. – № 11. – С. 14–21.

16. **Компьютерные** модели тепловых сетей и циркуляционных систем / В.В. Дикоп, В.А. Кудинов, А.Г. Коваленко и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – № 8. – С. 66–68.

References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

2. Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2004, vol. 47, no. 9, pp. 76–79.

3. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2004, issue 3, pp. 138–139.

4. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 52–56.

5. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovooy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of thermal efficiency indicators of TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.

6. Urin, V.D., Kutler, P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhimov elektrostantsiy i*

energosisistem [Energy characteristics for optimizing the regimes of power plants and power systems]. Moscow: Energiya, 1974. 136 p.

7. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic performance of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.

8. Shchinnikov, P.A., Nozdrenko, G.V., Tomilov, V.G. *Kompleksnye issledovaniya TES s novymi tekhnologiyami* [Comprehensive research into TPPs with new technologies]. Novosibirsk: NGTU, 2004. 528 p.

9. Karmanov, V.G. *Matematicheskoye programmirovaniye* [Mathematical Programming]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 264 p.

10. Reznikov, M.I., Lipov, Yu.M. *Parovye kotly teplovykh elektrostantsiy* [Steam boilers of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 240 p.

11. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

12. Shcheglyayev, A.V. *Parovye turbiny* [Steam turbines]. Moscow: Energiya, 1967. 368 p.

13. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk: UIGTU, 2003. 560 p.

14. Kagan, G.M. *Teplovooy raschet kotlov* [Thermal calculation of boilers]. Saint-Petersburg: NPO TsKTI, 1998. 260 p.

15. Zroychikov, N.A., Kudinov, V.A., Kovalenko, A.G. *Teploenergetika*, 2007, no. 11, pp. 14–21.

16. Dikop, V.V., Kudinov, V.A., Kovalenko, A.G. *Teploenergetika*, 2006, no. 8, pp. 66–68.

Барочкин Алексей Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 26-99-13,
e-mail: acorp27@yandex.ru

Barochkin Aleksei Yevgenyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,
telephone (4932) 26-99-13,
e-mail: acorp27@yandex.ru

Жуков Владимир Павлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Zhukov Vladimir Pavlovich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Applied Mathematics Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St, 34, Building A, Room 202,
telephone (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Барочкин Евгений Витальевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 417,
телефон (4932) 26-99-13,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Evgeny Vitalyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 417,
telephone (4932) 26-99-13,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovsky Grigory Vasilievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskays St, 34, Building B (V), Room 408,
telephone (4932) 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

УДК 004.942

Методы ускорения расчетов и повышения устойчивости полевой модели гидродинамических турбулентных процессов на CUDA

А.А. Гудухина, И.Ф. Ясинский
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: igor.yasinskiy@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из главных проблем при построении математических моделей турбулентных гидродинамических сред остается высокая вычислительная сложность компьютерных расчетов, поскольку требуется получить решение нестационарной задачи с сеткой такого пространственного шага, чтобы он соответствовал размерам самых малых вихревых структур. Существуют рекомендации по использованию разностных вычислительных схем для турбулентной динамики жидкости, полученные при моделировании разлива нефтепродуктов по водной поверхности. В связи с этим актуальным является получение устойчивого расчета математической модели динамики вязкой несжимаемой жидкости согласно описанию Эйлера с учетом влияния турбулизации и ускорение расчетов в параллельном интерфейсе CUDA.

Материалы и методы. При проведении вычислительных экспериментов применяются методы математического моделирования физических объектов, метод численного интегрирования дифференциальных уравнений, метод противоточных производных для повышения устойчивости разностных схем. Для оценки турбулентной вязкости сплошной среды используется метод Секундова.

Результаты. Создана устойчивая параллельная реализация математической модели, описывающей процессы в сплошной среде с учетом влияния турбулизирующих гидродинамических структур, устойчивость которой достигается за счет применения метода противоточных производных и замены традиционных разностных схем при расчете полей скорости и давления на четырехточечные аналоги. Предложен метод равномерного распределения вычислительных ресурсов графического ускорителя при больших размерах сетки. Получен устойчивый расчет модели динамики сплошной среды с вычислением турбулентной вязкости по модели Секундова на значительном временном отрезке.

Выводы. Построенное решение на основе интерфейса CUDA позволяет достичь ускорения вычислений от 2 до 8 раз в зависимости от возможностей аппаратной части. Разработанная система может являться инструментом исследования объектов энергетической отрасли, для которых требуется ускорение принятия управляющих решений по сравнению со стандартным программным обеспечением, не предусматривающим распараллеливания расчетов. Достоверность результатов вызвана соответствием системных условий конфигурациям двухфазных систем питания энергетических установок.

Ключевые слова: сплошные среды, гидрогазодинамика, турбулентность, параллельные вычисления, параллельный интерфейс CUDA