

# МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.165

## УЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТСЕКОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБОУСТАНОВОК ПРИ РАСЧЕТНОМ АНАЛИЗЕ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

К.Н. БУБНОВ, А.Е. БАРОЧКИН, В.П. ЖУКОВ, 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.** Разработка нормативных энергетических характеристик оборудования ТЭС является обязательной и ресурсоемкой процедурой. В рамках методологии матричной формализации расчета энергомассообменных установок ранее разработана математическая модель турбоустановки – собственно турбоагрегата и системы регенеративного подогрева питательной воды. Проведенный анализ результатов моделирования показал, что при низких нагрузках производственного отбора модель удовлетворительно описывает фактические энергетические характеристики турбоустановки, а при увеличении данной нагрузки качество описания существенно снижается, что не позволяет использовать предложенную модель для практического анализа реального оборудования. Уточнение модели турбоустановки путем введения изменяющихся по ее ступеням показателей эффективности для более обоснованного определения энергетических характеристик оборудования и создания на их основе программных средств оптимизации режимов технологических систем и подсистем ТЭС является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Для исследования многопоточных тепломассообменных 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 выполнено уточнение модели турбоагрегата путем введения изменяющихся по ее ступеням показателей эффективности 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 для повышения обоснованности расчета энергетических характеристик оборудования во всем диапазоне изменения нагрузки, создания компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов технологических систем и подсистем ТЭС.

**Ключевые слова:** моделирование, матричная формализация, электрическая станция, баланс энергии, баланс массы, энергетические характеристики, многопоточные системы, энергомассообмен

## TAKING INTO ACCOUNT THE EFFICIENCY OF TURBINE PLANT FLOW PATH COMPARTMENTS IN DESIGN CALCULATIONS OF THEIR ENERGY CHARACTERISTICS

K.N. BUBNOV, A.E. BAROCHKIN, V.P. ZHUKOV, G.V. LEDUKHOVSKY  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

### Abstract

**Background.** Development of regulatory energy characteristics of TPP equipment is a mandatory and resource-intensive procedure. A mathematical model of the turbine plant (the turbine plant itself and its regenerative feed water heating system) was developed earlier based on the matrix formalization of calculations of the energy and mass exchange installations. The analysis of the modeling results has shown that the model adequately describes the real characteristics of a turbine plant only at low bleeding load. At higher load, the accuracy of description is much lower and the model cannot be used for practical analysis of real equipment. All this means that the turbine model needs to be refined by introducing stage-dependent efficiency indicators for more accurate determination of the equipment energy characteristics and, based on them, developing of computer aided methods for optimizing regimes of technological systems and sub-systems of thermal power plants.

**Materials and methods.** Methods of mathematical programming were used to investigate the multi-flow heat and mass exchange systems and sub-systems of thermal power plants on the basis of heat and mass balance equations. The energy characteristics and efficiency indicators of TPP equipment were determined in accordance with the existing normative approach.

**Results.** The turbine plant model has been refined by the matrix formalization method by introducing stage-dependent efficiency indicators. Model solutions have been obtained and analysed in order to calculate energy characteristics of the combined cycle turbine plant. The calculation results have been compared with the energy characteristics of a turbine unit in operation. It has been shown that the proposed approach is reliable and reasonable.

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

**Key words:** modeling, matrix formalization, power plant, energy balance, mass balance, energy characteristics, multi-flow systems, energy and mass exchange

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.3.062-068

**Введение.** Разработка нормативных энергетических характеристик оборудования ТЭС является обязательной процедурой, реализуемой в соответствии с требованиями руководящих документов<sup>1</sup> минимум один раз в пять лет. При этом основным источником исходных данных для расчета энергетических характеристик являются результаты тепловых балансовых испытаний агрегатов<sup>2</sup> либо данные эксплуатационных наблюдений, приводимые в соответствующей статистической отчетности о тепловой экономичности оборудования. В обоих случаях необ-

ходимо решать задачу идентификации той или иной математической модели агрегата, выбранной в качестве базы для расчета, на основе экспериментальных данных. От качества идентификации модели зависит точность получаемых в итоге нормативных энергетических характеристик и, соответственно, представительность результатов расчета показателей тепловой экономичности на весь следующий пятилетний период.

В рамках предшествующих этапов исследования [1–5] предложена единая методология матричной формализации расчета и моделирования энерго- и массообменных установок, которая, в частности, позволяет решать указанные задачи расчета энергетических характеристик оборудования при создании замкнутого математического описания всей тепловой схемы ТЭС. Так, в рамках этого подхода были разработаны модели деаэрационных установок [2], мно-

<sup>1</sup> РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»; утв. Министерством топлива и энергетики.

<sup>2</sup> МУ 34-70-093-84 (СО 34.30.740). Методические указания по тепловым испытаниям паровых турбин: разраб. ПО «Союзтехэнерго»; утв. ПО «Союзтехэнерго» 21.12.84; введ. в действие с 01.01.85 г.

гоступенчатых теплообменных аппаратов с произвольной конфигурацией потоков [3], конденсаторов турбин [4], котельных агрегатов, систем теплофикации [1] и турбоустановок [5]. Однако удовлетворительное описание энергетических характеристик действующего оборудования ТЭС в рамках предложенной модели [5] было получено только для узкого диапазона изменения нагрузок производственного отбора турбоагрегата. То есть при идентификации предложенной модели оказалось невозможным добиться требуемых показателей точности математического описания. Развитие и уточнение разработанной модели путем анализа причин расхождения между фактическими и расчетными данными во всем диапазоне изменения нагрузки производственного отбора является актуальной задачей, решение которой позволит создать адекватную модель для более обоснованного определения энергетических характеристик [6, 7], разработки компьютерных тренажеров и программных средств оптимизации режимов оборудования ТЭС, анализа показателей работы как отдельных агрегатов, так и всей станции [8, 9].

Объектом исследования являются методы расчета и анализа режимов работы теплотехнического оборудования ТЭС.

Предметом исследований является матричная формализация расчета тепловой схемы ТЭС как многопоточной энергообменной системы.

Целью исследования является уточнение в рамках методологии матричной формализации модели турбоустановки ТЭС в целях ее использования при расчете энергетических характеристик выбранной подсистемы станции.

**Методы исследования.** Для исследования многопоточных тепломассообменных систем и подсистем ТЭС используются уравнения балансов массы и энергии, для решения которых применяются методы высшей математики и математического программирования [10–13]. Энергетические характеристики и показатели качества агрегатов ТЭС определяются в рамках существующего нормативного подхода [6, 14–17].

Ранее [5] было разработано математическое описание многопоточной энергообменной системы на примере турбоустановки типа ПТ с двумя регулируемыми отборами пара, принципиальная тепловая схема которой представлена на рис. 1.

На основании балансовых уравнений энергии, массы для подсистем указанной схемы были составлены семь балансовых соотношений [5]. В качестве зависимости коэффициента полезного действия турбоустановки  $\eta_t$  от относительного расхода пара через турбоустановку было использовано выражение вида [14]

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

где  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, значения которых определяются типом турбины и состоянием ее проточной части;  $\bar{d}$  – относительный расход пара через проточную часть турбины.

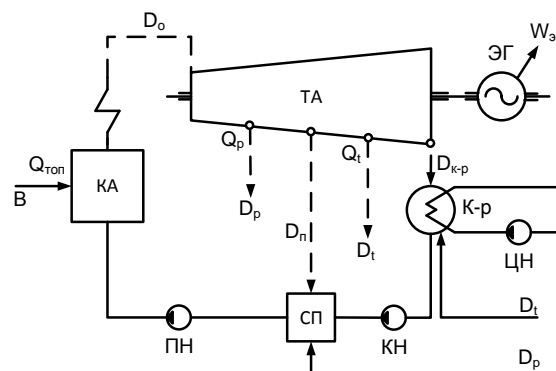


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки типа ПТ: КА – котлоагрегат; ТА – турбоустановка; ЭГ – электрогенератор; К-р – конденсатор; СП – смешивающий подогреватель; ЦН – циркуляционный насос; КН – конденсатный насос; ПН – питательный насос;  $B$  – расход топлива;  $Q_{\text{топ}}$  – теплота продуктов сгорания топлива;  $D_o$  – расход свежего пара на турбоустановку;  $D_p$ ,  $Q_p$  – расход пара и тепловая мощность производственного отбора;  $D_t$ ,  $Q_t$  – расход пара и тепловая мощность, направляемая на теплофикацию;  $D_n$ ,  $D_{к-р}$  – расход пара на смешивающий подогреватель и конденсатор соответственно;  $W_э$  – вырабатываемая электроэнергия

Для демонстрации прогностических возможностей разработанной модели приведены результаты расчета, выполненного применительно к турбине ПТ-65/75-130/13 [5]. Анализ результатов [5] показал, что в диапазоне изменения нагрузок производственного отбора от 0 до 20 Гкал/ч предложенная модель удовлетворительно описывает фактические энергетические характеристики. При этом величина среднего относительного отклонения расчетных данных от фактических не превышает 3 %. Однако при дальнейшем увеличении нагрузки производственного отбора от 20 до 140 Гкал/ч происходит существенное увеличение расхождения между фактическими и расчетными данными.

В ходе анализа результатов расчетных исследований было сделано предположение, что причиной наблюдаемого рассогласования является сделанное при построении модели допущение об одинаковости для всех отсеков турбины зависимости коэффициента полезного действия  $\eta_t$  от относительного расхода пара.

Для устранения указанного рассогласования предлагается увеличить степень декомпозиции моделируемой системы путем учета различного технического состояния отдельных отсеков проточной части турбины, выражаемого в разных значениях и характере изменения внутреннего относительного КПД при изменении расхода пара. В турбоагрегате условно выделяется четыре отсека (рис. 2), для каждого из которых выбирается своя зависимость коэффициента полезного действия  $\eta_t$  от относительного расхода пара через рассматриваемый отсек турбоагрегата.

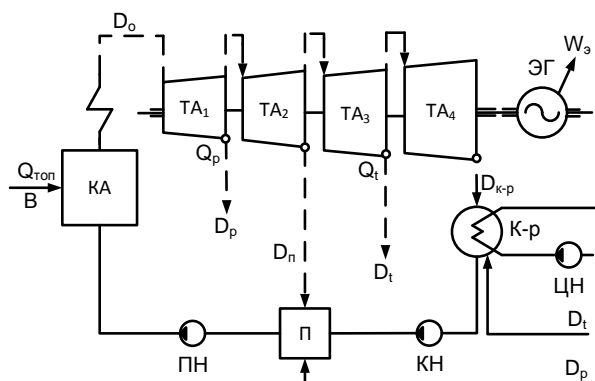


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема турбоустановки типа ПТ при выделении отсеков проточной части: ТА<sub>1</sub>, ТА<sub>2</sub>, ТА<sub>3</sub> и ТА<sub>4</sub> – первый, второй, третий и четвертый отсек проточной части соответственно; прочие обозначения соответствуют рис. 1

Для расчета коэффициентов полезного действия каждого отсека предлагаются два альтернативных подхода, которые различаются числом используемых эмпирических коэффициентов.

В рамках первого подхода зависимости для четырех отсеков представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \eta_{t,1} &= c(1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d}_1)); \\ \eta_{t,2} &= c(1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d}_2)); \\ \eta_{t,3} &= c(1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d}_3)); \\ \eta_{t,4} &= c(1 - b \cdot \exp(-a \cdot \bar{d}_4)), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – одинаковые для всех отсеков эмпирические коэффициенты, значения ко-

торых определяются типом турбины и состоянием ее проточной части;  $\bar{d}_1, \bar{d}_2, \bar{d}_3, \bar{d}_4$  – относительные расходы пара через проточную часть соответственно первого, второго, третьего и четвертого отсеков. Таким образом, здесь учитывается только различие в расходах пара через отдельные отсеки, а техническое состояние и уровень экономичности проточной части считаются одинаковыми для всех отсеков.

Результаты расчета модели [5], выполненного с учетом зависимости (2), показывают лучшую сходимость фактических и расчетных данных в диапазоне изменения нагрузок производственного отбора от 20 до 140 Гкал/ч, по сравнению с вариантом зависимости (1). Стоит заметить, что данный способ обеспечивает адекватность модели тепловой схемы ТЭС только на узком диапазоне изменения мощности турбоустановки от 50 до 75 МВт.

В рамках второго подхода дальнейшее уточнение модели выполняется путем введения в выражение (2) дополнительных эмпирических коэффициентов:

$$\begin{aligned} \eta_{t,1} &= c(1 - b_1 \cdot \exp(-a_1 \cdot \bar{d}_1)); \\ \eta_{t,2} &= c(1 - b_2 \cdot \exp(-a_2 \cdot \bar{d}_2)); \\ \eta_{t,3} &= c(1 - b_3 \cdot \exp(-a_3 \cdot \bar{d}_3)); \\ \eta_{t,4} &= c(1 - b_4 \cdot \exp(-a_4 \cdot \bar{d}_4)), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$  – индивидуальные для отдельных отсеков эмпирические коэффициенты.

Тем самым обеспечивается возможность учета при идентификации модели различного технического состояния отдельных отсеков проточной части. Значения эмпирических коэффициентов выбираются методом наименьших квадратов в ходе специальных расчетных исследований, результаты которых приводятся ниже.

**Результаты.** Результаты расчетного анализа, выполненного в рамках предложенной модели [5] с учетом зависимостей (1)–(3), представлены на рис. 3 в виде энергетических характеристик турбоустановки. Нагрузка производственного отбора для всех характеристик постоянная и равна 60 Гкал/ч. В качестве эмпирических данных – фактических энергетических характеристик – для идентификации модели используются значения  $q_t$ , принятые для действующей турбины рассматриваемого типа по данным нормативно-технической документации по топливоиспользованию Орской ТЭЦ-1.

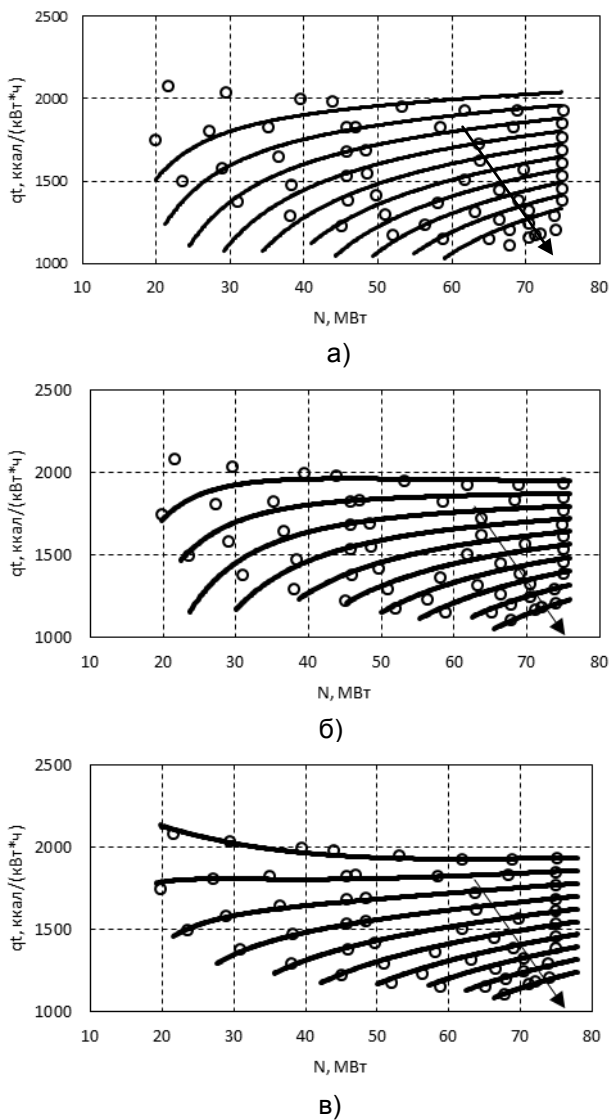


Рис. 3. Результаты расчета энергетических характеристик турбины ПТ-65/75-130/13 при нагрузке производственного отбора  $Q_p = 60$  Гкал/ч: а – использована зависимость (1); б – (2); в – (3); стрелкой на поле графика показано направление возрастания значений теплофикационной нагрузки  $Q_t = [0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90]$  Гкал/ч

Анализ приведенных данных показал, что результаты расчета согласно модели [5] и зависимости (1), представленные на рис. 3,а, характеризуются существенным отклонением фактических данных от экспериментальных. Особенно это проявляется при малых электрических нагрузках турбоагрегата. В результате применения вместо (1) зависимости (2) (рис. 3,б) указанное рассогласование существенно уменьшается, однако хорошее согласование модельных и фактических результатов по тепловой схеме ТЭС обеспечивается только в узком диапазоне изменения мощности турбоагрегата. Использование зависимости (3), с одной сто-

роны, приводит к существенному уменьшению указанных отклонений во всем диапазоне изменения нагрузки, но, с другой стороны, усложняет саму модель тепловой схемы ТЭС [5] за счет ввода дополнительных эмпирических коэффициентов (рис. 3,в).

Очевидно, выбор варианта модели зависит от требований к точности результата решения той или иной задачи. Так, для расчета нормативных энергетических характеристик целесообразно использовать зависимость (3) и определять значения соответствующих эмпирических коэффициентов с опорой на возможно большую выборку экспериментальных данных (результатов испытаний или данных эксплуатационных наблюдений). Зависимость (2) рекомендуется использовать либо при отсутствии выборки экспериментальных данных достаточного объема, либо при решении задач, не требующих высокой точности конечного результата.

**Выводы.** Предложенные подходы к описанию функциональной зависимости коэффициента полезного действия турбоустановки от расхода пара через отсек проточной части позволяют усовершенствовать разработанную ранее модель тепловой схемы ТЭС и обеспечить удовлетворительную точность расчета показателей работы турбоустановки во всем диапазоне изменения нагрузок производственного и теплофикационного отборов. Это в свою очередь открывает возможности для эффективного практического применения разработанной модели при решении задачи расчета нормативных энергетических характеристик оборудования ТЭС.

#### Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных 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 теплообмена 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. Матричное представление модели тепловой схемы электрической станции / А.Е. Бароч-

кин, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 66–72.

6. **Бродянский В.М.** Обобщенные показатели в энергетике // Теплоэнергетика. – 1989. – № 2. – С. 63–66.

7. **Урин В.Д., Кутлер П.П.** Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.

8. **Горшков А.С.** Техничко-экономические показатели тепловых электростанций – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

9. **Щинников П.А., Ноздренко Г.В., Томилов В.Г.** Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 528 с.

10. **Карманов В.Г.** Математическое программирование. – М.: Физматлит, 2004. – 264 с.

11. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 208 с.

12. **Корн Г.** Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

13. **Власов В.Г.** Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис, 1996. – 287 с.

14. **Щегляев А.В.** Паровые турбины. – М.: Энергия, 1967. – 368 с.

15. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэратеры. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.

16. **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.

17. **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. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 66–72.

6. Brodyanskiy, V.M. *Teploenergetika*, 1989, no. 2, pp. 63–66.

7. Urin, V.D., Kutler, P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhimov elektrostantsiy i energosistem* [Energy characteristics for optimizing operation regimes of power plants and power systems]. Moscow: Energiya, 1974. 136 p.

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

9. 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.

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

11. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: objectives, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 208 p.

12. Korn, G. *Spravochnik po matematike* [Mathematics Handbook]. Moscow: Nauka, 1973. 832 p.

13. Vlasov, V.G. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike* [A summary of lectures on higher mathematics]. Moscow: Ayris, 1996. 287 p.

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

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

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

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

*Бубнов Кирилл Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант,

e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

*Bubnov Kirill Nikolayevich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Master course student, e-mail: kirill.bubnov.96@mail.ru

*Барочкин Алексей Евгеньевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, 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 Thermal 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, 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, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

*Ледуховский Григорий Васильевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой тепловых электрических станций, 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, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

УДК 004.94:66.011

## ИМИТАЦИЯ ПОТОКОВ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

С.П. БОБКОВ, А.С. ЧЕРНЯВСКАЯ

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: bsp@isucl.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Подавляющее большинство теплоэнергетических процессов включает в себя перемещение значительных количеств газов и жидкостей. Поэтому важной и актуальной задачей следует считать разработку подходов для компьютерной имитации и визуализации потоков сплошной среды в технологических аппаратах и трубопроводах. В последнее время появилась целая группа новых подходов к математическому моделированию потоков сплошных сред, прежде всего использование для данных целей дискретных математических объектов. Дискретные подходы могут упрощать процедуры моделирования в тех случаях, когда традиционные методы приводят к сложным вычислениям, требующим больших затрат времени. В то же время при использовании дискретных моделей часто возникают вопросы, касающиеся корректности описания дискретными методами тех или иных режимов течения. Вторая проблема использования упомянутых моделей – это масштабный переход от модельных дискретных параметров к общепринятым макроскопическим характеристикам течений. Целью данной работы является определение режимов течения сплошной среды, для которых применение конкретных моделей можно считать корректным.

**Материалы и методы.** Рассмотрены дискретные динамические модели в виде решеточных газов. При этом сплошная среда представляется совокупностью частиц, движущихся только в разрешенных направлениях. Несмотря на определенные ограничения, имеется много доказательств того, что решеточные газы достаточно успешно описывают целый ряд гидродинамических явлений, а полученные результаты не противоречат общепринятым взглядам на физическую природу процессов движения сплошных сред.

**Результаты.** Описываются подходы, позволяющие оценить параметры течений, используя общепринятые макроскопические показатели. Исследованы возможные области применения моделей решеточных газов, использующих движение виртуальных частиц на пространственной решетке (модели НРР и FHP), а также модели, использующей дискретный аналог уравнения Больцмана (модель LBM) для имитации и визуализации потоков сплошных сред.

**Выводы.** Полученные данные хорошо согласуются с общепринятыми результатами и не противоречат положениям классической гидродинамики. Модели, рассматривающие столкновения частиц (НРР и FHP), применимы для описания течений газов в ламинарных режимах. Для моделирования и визуализации течений реальных жидкостей более корректной следует считать модель LBM.

**Ключевые слова:** дискретный подход, решеточный газ, НРР, FHP и LBM модели