

УДК 621.039

И.В. Минеев, А.А. Кувшинова, А.И. Коваленко, Ю.И. Аношкин

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ
НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА ТЕРМИЧЕСКИЙ КПД
ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ СУДОВОЙ ЯЭУ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Цель: Решение задачи нахождения оптимальных начальных параметров пара, обеспечивающих максимальный термический КПД установки

Подход: Авторами разработана компьютерная программа для вычисления параметров тепловой схемы второго контура судовой ЯЭУ.

Результаты: Программа позволяет графически представить зависимость расхода пара и тепла, экономии от регенерации и термического КПД от начальных параметров пара.

Ключевые слова: проектирование судовой ЯЭУ, расчёт тепловой схемы, начальные параметры пара, термический КПД, математическое моделирование.

Выбор параметров рабочего тела – важнейший вопрос проектирования судовой ЯЭУ. Одним из основных его результатов является получение термического КПД установки в целом, показывающего эффективность использования энергии при заданном термодинамическом цикле и составе тепловой схемы. Важными параметрами цикла, определяющими его экономичность, являются начальные температура и давление пара.

Возможность быстрого определения оптимальных значений этих параметров – актуальная задача при разработке установок.

Цель: решение задачи нахождения оптимальных начальных параметров пара, обеспечивающих максимальный термический КПД установки.

Задачи:

- разработать методику расчета тепловой схемы;
- реализовать математическую модель в среде Matlab в виде конечной программы;
- сравнить полученные результаты с известными данными.

Авторами была разработана программа для автоматизации расчётов, которая позволяет избавиться от весьма трудоёмкого и требующего много времени процесса вычислений.

В работе в качестве модельного судна используется танкер с тремя ступенями регенеративного подогрева питательной воды и промежуточной сепарацией между корпусами турбины. Тепловая схема судовой ЯЭУ отличается наличием вспомогательного турбогенератора, включенного параллельно главной турбине, использованием турбопривода практически для всех вспомогательных механизмов и насосов второго контура, использованием в системе регенеративного подогрева питательной воды пара, отработавшего в дополнительных потребителях [4].

Расходы пара и тепла на главную турбину, работающую с регенеративными отборами, при отсутствии дополнительных потребителей пара рассматриваются как основные составляющие расходов пара и тепла на установку. В основу методов расчета положено непосредственное определение расходов пара и тепла в парогенераторе на каждый потребитель в отдельности.

Алгоритм расчета тепловой схемы включает в себя:

1. Расчет базовой (эталонной) турбины при заданных начальном давлении p_0 , мощности на вантах Ne и температуре $t_0 = 400^\circ$ [1].

2. Расчет проектируемой главной турбины при p_0 , t_0 , Ne , давлении в конденсаторе p_x . Сочетание методик [1–4].

3. Расчет регенерации в цикле [1], [3], [4], [5]:

- определение параметров пара в точках регенеративных отборов;
- определение параметров питательной воды на выходе ступеней подогрева;
- определение истинных расходов пара и тепла на главную турбину с отборами;
- получение внутреннего термического КПД главной турбины.

4. Расчет дополнительных потребителей:

- главный питательный насос с трубопроводом [1], [6], [7], [8];
- турбогенератор [9];
- испаритель грязных конденсатов [1];
- пароструйные воздушные эжекторы [1];
- конденсатор системы уплотнений [1];
- испаритель котловой воды [1];
- парогенератор низкого давления [10].

5. Расчет установки в целом. Построение графиков термического КПД всей ПТУ.

Данный алгоритм реализован в виде программы с пользовательским интерфейсом в среде Matlab. Все расчеты могут выполняться для диапазонов температур от 250 до 370 °, давлений от 2,4 до 7,0 МПа, мощностей на винтах от 8 до 44 МВт. Имеется возможность изменять вакуум в главном конденсаторе от 1 до 30 кПа. Пользователь задает начальное и конечное значения и шаг вычислений. Программа позволяет выводить графики зависимостей КПД главной турбины (рис. 1) и всей установки в целом (рис.4), расходов пара и тепла, экономики от регенерации (рис. 2) как функции от начальной температуры рабочего тела при постоянном значении начального давления пара и наоборот.

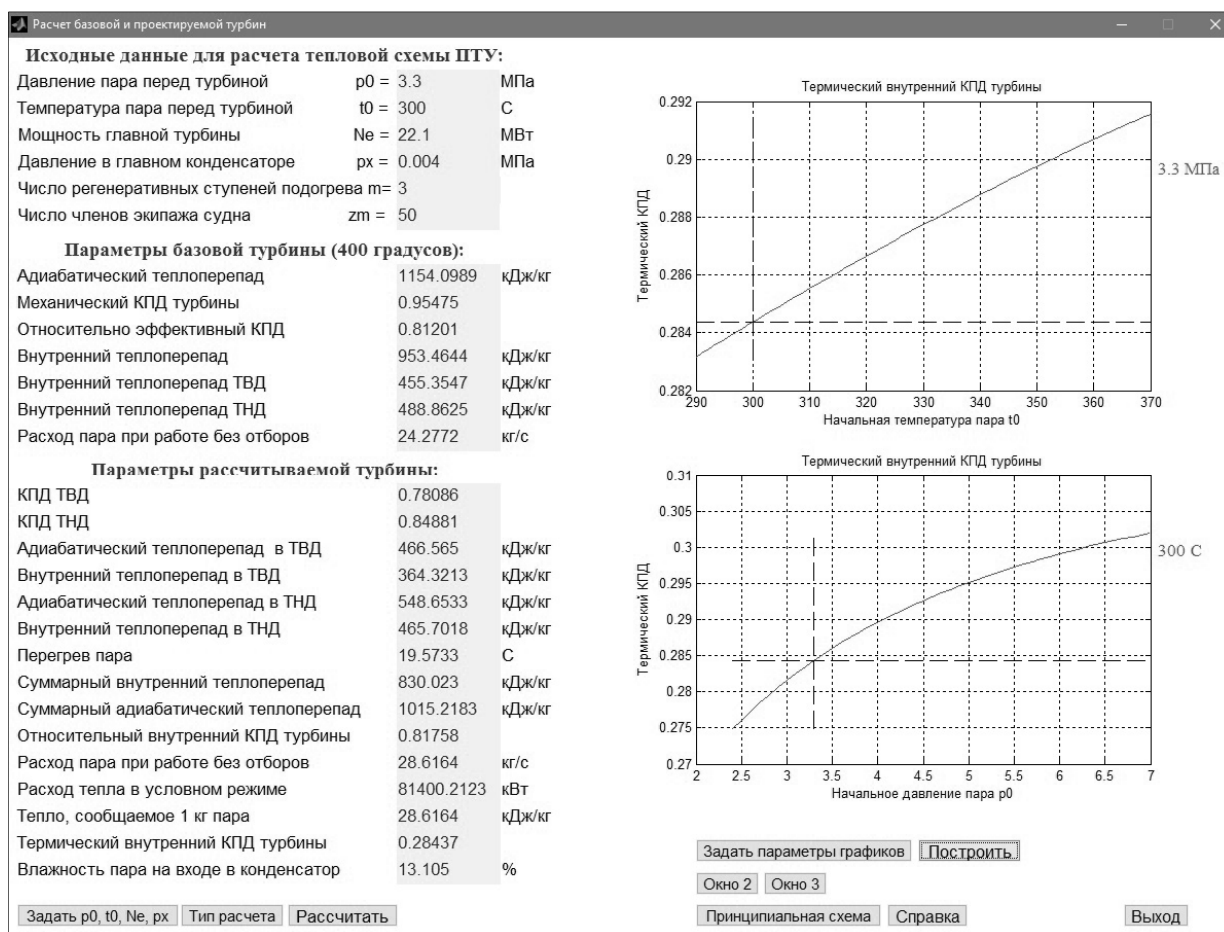


Рис. 1. Графики термического КПД и параметры главной турбины при $p_0=3,3$ МПа, $t_0=300$ °С и $N_e=22,1$ МВт

Верхнее значение диапазона давлений (7 МПа) ограничено следующими требованиями:

- влажность пара на входе в конденсатор не должна превышать 14% (иначе усложняется конструкция турбины и ее себестоимость);
- обеспечение сухости пара после сепаратора 99,8% (с ростом параметров сухость снижается, и для поддержания заданной величины требуется усложнять конструкцию сепаратора и увеличивать его стоимость);
- риск приблизиться к линии насыщения при низких температурах и столь высоком давлении (потерять перегрев, транспортные суда работают на перегретом паре. Для критических параметров (насыщение) данная программа не работает).

Кроме того, вследствие относительно низких начальных параметров пара в ЯЭУ с ВВРД тепловая схема ПТУ включает, как правило, промежуточный сепаратор влаги. Все это приводит к специфике расчета тепловых схем судовых ЯЭУ, заключающейся прежде всего в итерационном характере расчета дополнительных потребителей в цикле [2–4].

В результате теплового расчета установки в окна программы выводятся параметры, основными из которых являются:

- внутренние и адиабатические теплоперепады главной турбины и турбины питательного насоса (ТПН);
- распределение мощности между корпусами турбины;
- видимый и истинный расходы пара на главную турбину;
- термический КПД главной турбины;
- количество и параметры пара, отбираемого в каждой точке отбора;
- параметры питательной воды на выходе ступени подогрева;
- экономия от регенерации;
- истинные расходы пара и тепла на дополнительные потребители;
- расход пара и тепла на установку в целом;
- термический КПД установки.

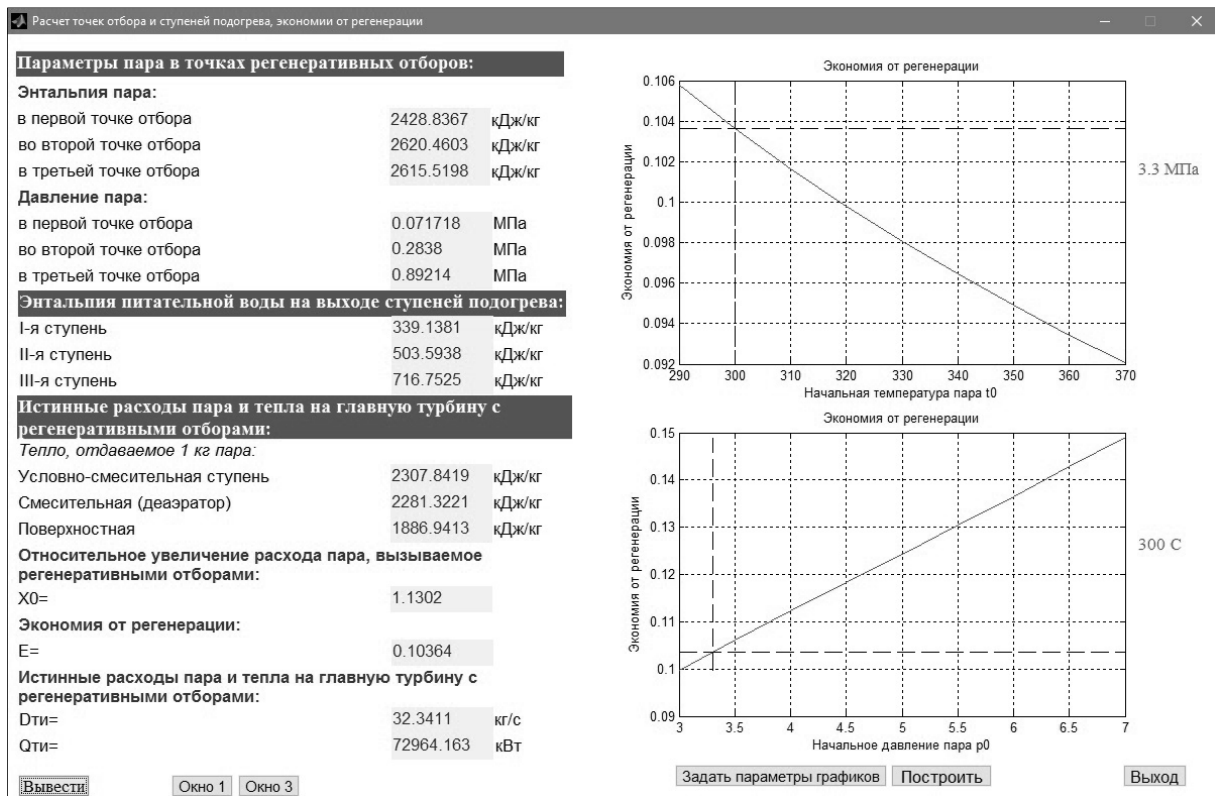


Рис. 2. Параметры регенерации в цикле и графики экономии от регенерации

Для составления программы использовались доступные в свободной версии функции лицензионного пакета WaterSteamPro (www.wspr.ru) для вычислений свойств воды и водяного пара по формулам, предложенным Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара. Пакет программ WaterSteamPro официально зарегистрирован в Российском агентстве по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ), свидетельство №2000610803 от 25.08.2001.

В программе применена методика итерационных вычислений со сложными циклами.

Пользователю доступны следующие функции:

- 1) возможность выбора сложности расчёта;
- 2) построение графиков термического КПД как функций от начальной температуры или начального давления с отображением рабочей точки;
- 3) возможность отображения до 3-х графиков на одной координатной плоскости;
- 4) изменение области вывода графиков (активные области p_{0min} и p_{0max} , t_{0min} и t_{0max});
- 5) просмотр принципиальной схемы (кнопка «Принципиальная схема» в правом нижнем углу);
- 6) задание шага для построения графиков (активная область «шаг»);
- 7) возможность чтения исходных данных из файла;
- 8) возможность вывода результатов расчёта в файл;
- 9) работа в полноэкранном режиме;
- 10) наличие окна "Справка", где даётся краткое описание программы.

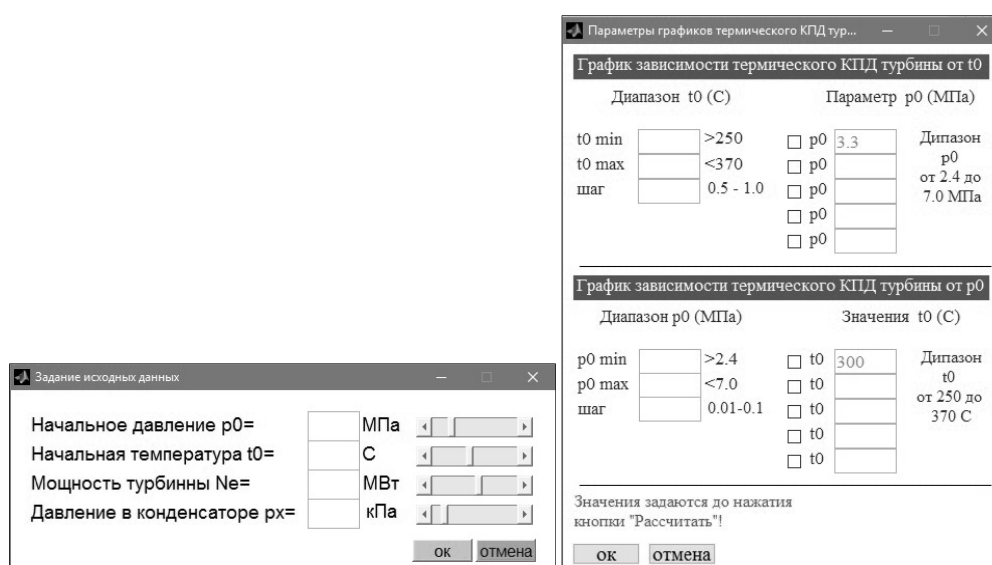


Рис. 3. Окно ввода исходных данных и окно задания параметров графиков

Достоинствами данной программы являются: высокая наглядность представляемого материала, его доступность и интерактивность, большая дифференциация и индивидуализация процесса образования, а также возможность исследовать многопараметрические задачи, используемые в атомной и ядерной физике и энергетике. Программа имеет интуитивно понятный интерфейс. Для корректной работы не требуется выход в Интернет.

Проведенные расчеты в среде Matlab показывают, что полученные результаты не противоречат имеющимся экспериментальным данным [11, рис. 5]: с увеличением входных параметров перегретого пара термический КПД установки монотонно возрастает. Это объясняется приближением реального термодинамического цикла ПТУ к идеальному циклу Карно с максимально полезной работой. Поэтому при проектировании транспортных установок стремятся обеспечить использование оптимально высоких начальных параметров рабочего

тела перед турбиной с учетом конструкционных особенностей судна, свойств материалов, требований безопасности, надежности, экономической эффективности.

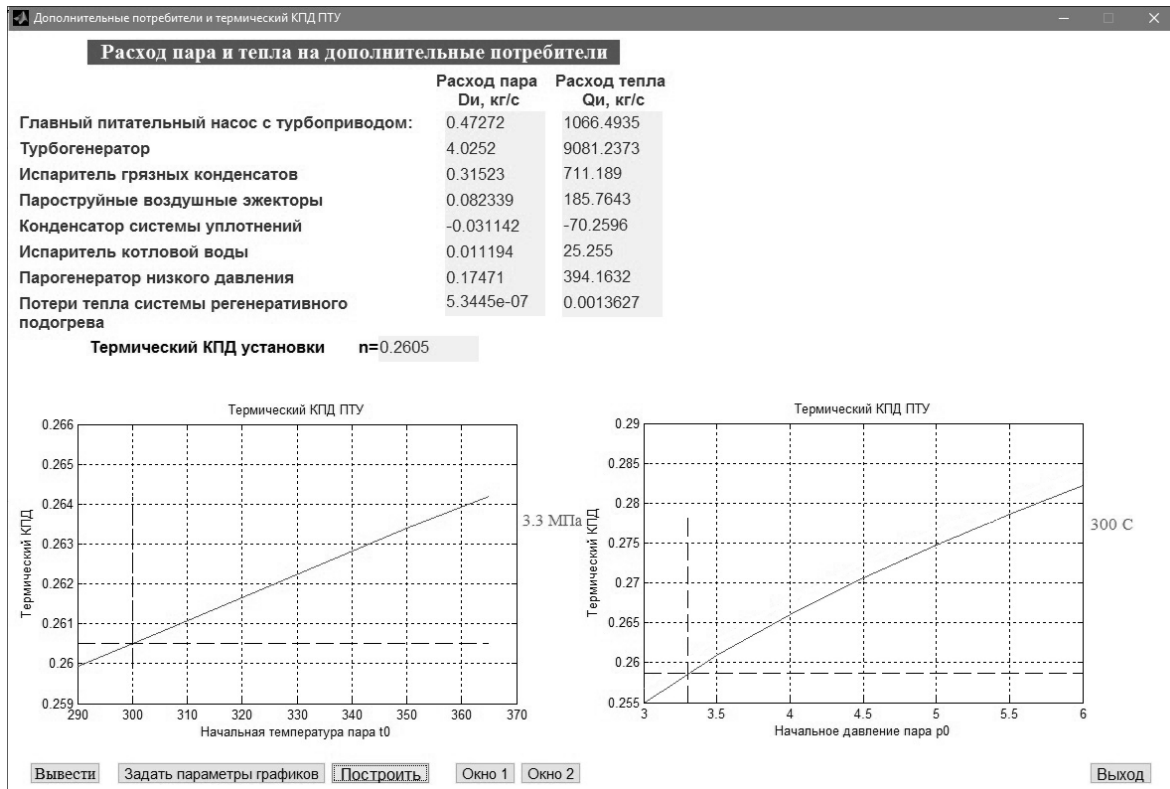


Рис. 4. Параметры дополнительных потребителей и графики термического КПД всей установки в целом

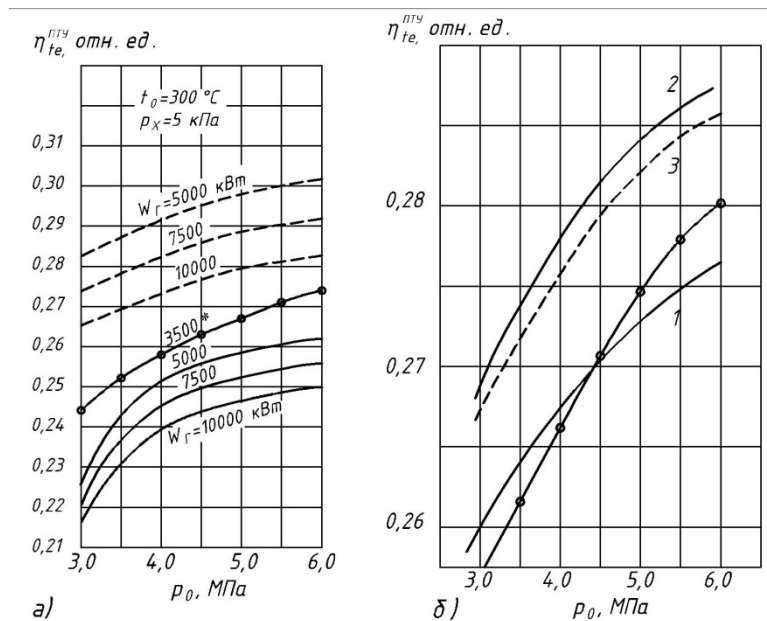


Рис. 5. Графики термического КПД ПТУ:

а – однокорпусная турбина с промежуточной сепарацией и тремя регенеративными отборами (сплошные линии); б – 1 – $N_e = 22,1 \text{ МВт}$, $t_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, три ступени подогрева и промежуточная сепарация; 2 – $N_e = 44,2 \text{ МВт}$, $t_0 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, три ступени подогрева и промежуточная сепарация, паровой промежуточный перегрев; 3 – то же, что и 2, но при $t_0 = 285 \text{ }^\circ\text{C}$,
Закрашенные точки – результаты расчета из программы

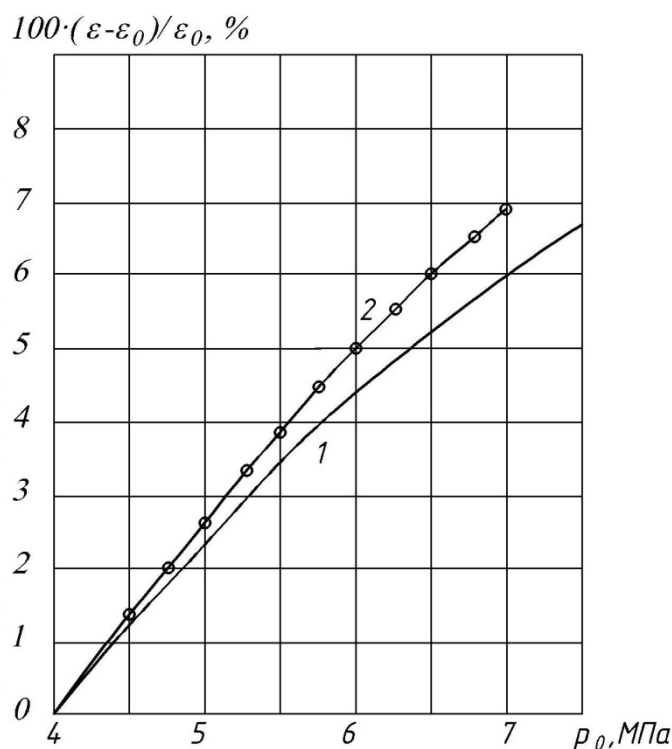


Рис. 6. Относительное увеличение экономии от регенерации в %:

1 – относительное увеличение экономии от регенерации установки в целом по отношению к установкам с параметрами $p_0 = 4$ МПа, $t_0 = 470$ °С [1]; 2 – то же по результатам расчета программы

Расчет по данной программе может рассматриваться как первое приближение при проектировании ПТУ судовой ядерной энергетической установки. В программе определяются все необходимые параметры для дальнейшего расчета геометрии второго контура. Также данную программу можно использовать в образовательных целях как пример расчета тепловой схемы второго контура.

Библиографический список

1. **Семяка, В.А.** Тепловой расчет судовых паротурбинных установок / В.А. Семяка. – М.: Транспорт, 1964. – 258 с.
2. **Беляев, Л.А.** Турбины тепловых и атомных электрических станций / Л.А. Беляев. – Томск: ТПУ, 2009. – 142 с.
3. **Шестаченко И. Я.** Тепловой расчет паровых турбин: учеб.-метод. пособие / И. Я. Шестаченко; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 79 с.
4. **Аношкин, Ю.И.** Расчет тепловой схемы ПТУ судовой ядерной энергетической установки: учеб. пособие / Ю.И. Аношкин / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2004. – 68 с.
5. **Щегляев, А.В.** Паровые турбины. Т. 1. Теория теплового процесса и конструкции турбин: учебник для вузов: в 2 кн. Кн. 1. / А.В. Щегляев. – 6-е изд., перераб., и допол. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
6. **Ломакин, А.А.** Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин. – Л.: Машиностроение, 1965. – 430 с.
7. **Будов, В.М.** Судовые насосы: справочник / В.М. Будов. – Л.: Судостроение, 1988. – 430 с.
8. **Горбенко, А.Н.** Альбом конструкций судовых центробежных насосов и их расчет / А.Н. Горбенко. – Керчь: КГМТУ, 2011. – 40 с.
9. **Артемов, Г.А.** Судовые энергетические установки / Г.А. Артемов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1987. – 480 с.
10. **Пряхин, А.С.** Тепловой расчет судового вспомогательного водотрубного парогенератора:

учебно-метод. пособие / сост. А.С. Пряхин. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. –95 с.

11. **Кузнецов, В.А.** Судовые ядерные энергетические установки: учебник для вузов / В.А. Кузнецов. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.04.2017*

I.V. Mineev, A.A. Kuvshinova, A.I. Kovalenko, Y.I. Anoshkin

**THE DEVELOPMENT OF TECHNIQUES AND A PROGRAM FOR CALCULATION
OF THE INFLUENCE OF INITIAL STEAM PARAMETERS ON THERMAL
EFFICIENCY OF STEAM-TURBINE PLANT OF MARINE NUCLEAR POWER-PLANT**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: The solution of the problem of finding the optimal Initial steam parameters, which provide the maximal thermal efficiency of the steam-turbine plant.

Approach: The authors produced a special computer program for calculating the parameters of the flowsheet of the marine nuclear power-plant's secondary power circuit.

Results: The program allows you to show the dependence of steam consumption and heat rate, saving from regeneration and thermal efficiency from the initial steam parameters in the diagram form.

Key words: Designing of the marine nuclear power-plant, calculating of the flowsheet, initial parameters of the steam, thermal efficiency, mathematical modelling.