

---

---

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

---

---

УДК 620.9:004.896

**К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И  
БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

© 2015 г. В.А. Дунаев, Н.А. Лоншаков, В.А. Горбунов

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
Иваново, Ивановская обл.*

В данной статье рассматриваются проблемы поиска путей повышения эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования на основе анализа режимов работы оборудования АЭС и определение технически обоснованных норм расхода энергии. Для проведения анализа и повышение эффективности и безопасности работы оборудования рассматривается технология, основанная на нейросетевом моделировании. Приведена возможность использования технологии на примере одного из турбопитательных насосов блока № 2 Калининской АЭС.

*Ключевые слова:* турбопитательный насос, эффективность, безопасность, надежность, анализ, нейросетевые технологии, эксплуатация энергоблока, параметры работы, нормы расхода тепловой энергии.

Поступила в редакцию 10.06.2015

В соответствии с требованиями МАГАТЭ, приведенными в докладе «Ядерная безопасность и культура безопасности» ведущего специалиста по вопросам безопасности Департамента безопасности ядерных объектов МАГАТЭ Моники Хааге [1] безопасность АЭС включает три аспекта:

- общее понимание безопасности;
- действия и практика человека;
- аспект управления оборудованием.

Принятие мер по повышению эффективности работы тепломеханического оборудования может привести к снижению надежности установки, в особенности, когда отсутствуют режимные карты текущей его работы и не заданы пределы эффективного регулирования.

Для эффективного и безопасного управления оборудованием необходима специальная технология, которая позволит найти энергоэффективные режимы в безопасной области изменения регулируемых параметров в заданных пределах.

Вопрос о повышении эффективности эксплуатации оборудования тепловых и атомных станций является одним из наиболее актуальных вопросов, стоящих перед эксплуатирующими организациями. В связи с этим ОАО «Концерн Росэнергоатом» создал и внедрил систему энергетического менеджмента, отвечающего требованиям международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» [2].

Основной задачей энергоменеджмента является создание необходимых условий для сокращения финансовых затрат путем систематического:

- планирования;
- внедрения в эксплуатацию;

- мониторинга и внутреннего аудита;
- корректирующих и предупреждающих действий.

Исходя из данных тенденций было принято решение о создании инновационного инструмента, предназначенного для оценки эффективности эксплуатации турбопитательных насосных установок (ТПН) атомных станций, а также для их дальнейшего безопасного регулирования в целях повышения энергоэффективности и безопасности.

Основой данного инструмента является нейросетевая технология, которая позволяет:

- на основе теплотехнологических параметров, полученных непосредственно в процессе эксплуатации энергоблока, смоделировать процесс работы выбранного элемента или паротурбинной установки в целом;
- качественно и количественно спрогнозировать изменения выходных параметров модели (мощности, коэффициента полезного действия) от изменения входных параметров, построить режимные карты работы оборудования;

Апробация нейросетевого моделирования была успешно проведена в ИГЭУ для создания модели газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ-25), ОАО «Северосталь», и паровой турбины ПТ-12-34/10 М, «Калужский турбинный завод» [3].

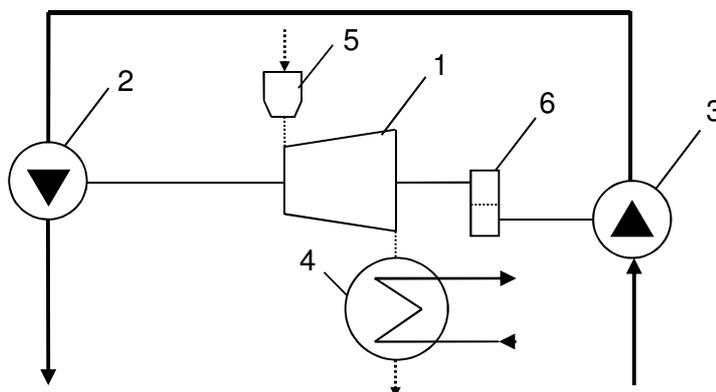
В настоящее время ведется работа по созданию эффективной нейросетевой модели питательных турбонасосных агрегатов блоков первой очереди КЛНАЭС.

## 1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТПН БЛОКА ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Турбопитательный насосный агрегат блока первой очереди КЛНАЭС состоит из следующих основных элементов:

- 1) приводная турбина ОК-12А;
- 2) главный питательный насос ПТ-3750-75;
- 3) предвключенный насос 400-QHD-spec;
- 4) редуктор Р-2;
- 5) эжектор основной ЭО-50;
- 6) эжектор пусковой ЭП-150/П.

Принципиальная тепловая схема ТПН приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** – Питательный турбонасосный агрегат  
 1 – паровая турбина ОК-12А; 2 – главный питательный насос ПТ-3750-75;  
 3 – предвключенный насос 400-QHD-spec; 4 – конденсатор турбины;  
 5 – стопорно-регулирующий клапан; 6 – редуктор Р2

Турбина имеет два выхлопа. Конденсатор приводной турбины имеет два входа по циркуляционной воде.

Замеры параметров для обучения нейросетевой модели производились в период с 1.01.2014 по 31.12.2014, интервал между замерами составлял 2 часа.

На основе параметров были созданы две нейросетевые модели по расчёту эффективности работы ТПН и удельных затрат тепловой энергии пара на перекачку питательной воды.

## 2 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Нейросетевая модель является адекватной в принятом диапазоне параметров, снятых с реального агрегата. Диапазоны параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Диапазоны параметров

Наименование параметра	Диапазон изменения
Давление питательной воды на входе в бустерный насос, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,85 – 0,92 (8,35 – 9,09)
Давление питательной воды на входе в главный питательный насос, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	2,38 – 3,56 (23,3 – 34,9)
Давление питательной воды на выходе из главного питательного насоса, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	7,39 – 8,69 (72,5 – 85,2)
Расход питательной воды за питательным турбонасосным агрегатом, кг/с (т/ч)	433 – 952 (1560 – 3430)
Температура питательной воды за питательным турбонасосным агрегатом, °С	162 – 165
Расход пара на приводную турбину, кг/с (т/ч)	12,1 – 20,0 (43,6 – 72,0)
Давление пара перед стопорным клапаном, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,80 – 0,94 (7,86 – 9,20)
Давление пара за регулирующим клапаном, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	0,34 – 0,62 (3,34 – 6,08)
Температура пара на выходе из приводной турбины, °С	26,4 – 43,0
Вакуум в конденсаторе приводной турбины, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	-0,09 – -0,10 (-0,88 – -1,00)
Температура пара в конденсаторе приводной турбины, °С	18,2 – 41,3
Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор приводной турбины, °С	6,00 – 31,2
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора приводной турбины, °С	11,7 – 37,5
Температура пара перед главной паровой задвижкой, °С	174 – 229

Входные данные анализировались, и подбирались комплексы из параметров для упрощения моделирования.

За целевые функции были приняты эффективность работы турбопитательного насоса, как отношение энергии, полученной питательной водой к полной тепловой энергии, подводимой к приводной турбине с учетом потерь тепловой энергии в

конденсаторе. Приведенные в таблице 1 параметры были переведены в удобные единицы измерения для получения необходимых характеристик. Эффективность ТПН определяется по следующей формуле (1):

$$\eta = \frac{Q_6 \cdot v \cdot (p_{\text{нап}} - p_{\text{вс}})}{Q_n \cdot (h_0 - ct_{\kappa}^{\text{н}})}, \quad (1)$$

где  $Q_6$  – расход воды, кг/с;

$v$  – удельный объем воды, м<sup>3</sup>/кг;

$p_{\text{нап}}, p_{\text{вс}}$  – давление на напоре и на всасе насоса, Па;

$Q_n$  – расход пара на приводную турбину, кг/с;

$h_0$  – энтальпия пара перед стопорно-регулирующими клапанами турбины, кДж/кг;

$ct_{\kappa}^{\text{н}}$  – энтальпия насыщения конденсата пара при давлении в конденсаторе, кДж/кг.

Значение эффективности работы ТПН за данный период изменялось от 9,81% до 16,0%.

Помимо эффективности определялся удельный расход тепловой энергии пара на перекачку единицы расхода питательной воды. Удельный расход тепловой энергии пара определяется по формуле (2):

$$q = \frac{Q_n \cdot (h_0 - ct_{\kappa}^{\text{н}})}{Q_6}, \quad \text{кДж/кг}. \quad (2)$$

Значение удельного расхода тепловой энергии пара на ТПН за данный период изменялось от 48,5 до 73,4 кДж/кг.

Преимущество нейросетевых моделей по сравнению со статистическими нелинейными моделями заключается в том, что разработчику можно не определять вид зависимостей между входными и выходными параметрами. В процессе многократного обучения модели нейросеть сама определяет зависимости в процессе многократных обучений модели, что упрощает задачу разработчика.

При обучении необходимо выбрать несколько параметров создаваемой нейронной сети, такие как число слоев между входными и выходными параметрами, число нейронов в каждом слое, метод обучения, число циклов обучения и количество эпох обучения в цикле [3]. Таким образом, обучение проводится многократно вплоть до подбора наиболее подходящих настроек нейросети.

После обучения необходимо верифицировать правильность зависимостей выходных параметров от входных, а также на основе данных, не задействованных в обучении модели, задать тестовые выборки входных параметров и определить максимальную погрешность расчета. При неудовлетворительном результате (физически неверные зависимости или большая погрешность) необходимо вернуться к обучению модели, пока не будут достигнуты адекватность и максимально возможная точность модели.

В результате была получена приемлемая погрешность расчета. Для эффективности ТПН максимальная погрешность составила менее 3%. Для удельных затрат тепловой энергии пара на ТПН 2%, что позволяет говорить об адекватности нейросетевой модели.

Применение качественно обученной нейросетевой модели позволяет разработать режимные карты по эксплуатации оборудования и определить технические обоснованные нормы расхода тепловой энергии рабочего тела на перекачку питательной воды.

### 3 ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА В ПРОГРАММЕ

Обученная модель оформляется в виде программы.

Данная программа способна рассчитывать эффективность ТПН и удельные затраты тепловой энергии пара на ТПН при любой комбинации входных данных (рис. 2).

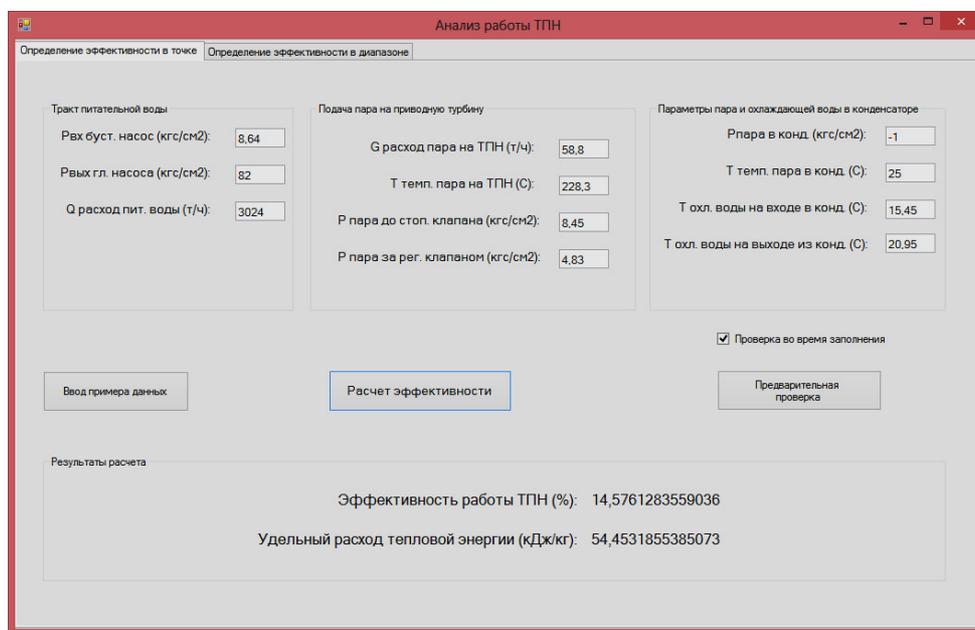


Рис. 2. – Окно программы для определения расчетных величин

Главной особенностью программы является возможность определения зависимости целевых функций от варьируемых параметров в заданном диапазоне. Полученные графики можно строить совместно, либо отдельно для эффективности ТПН и для удельного расхода тепловой энергии пара на ТПН в соответствующем масштабе (рис. 3).

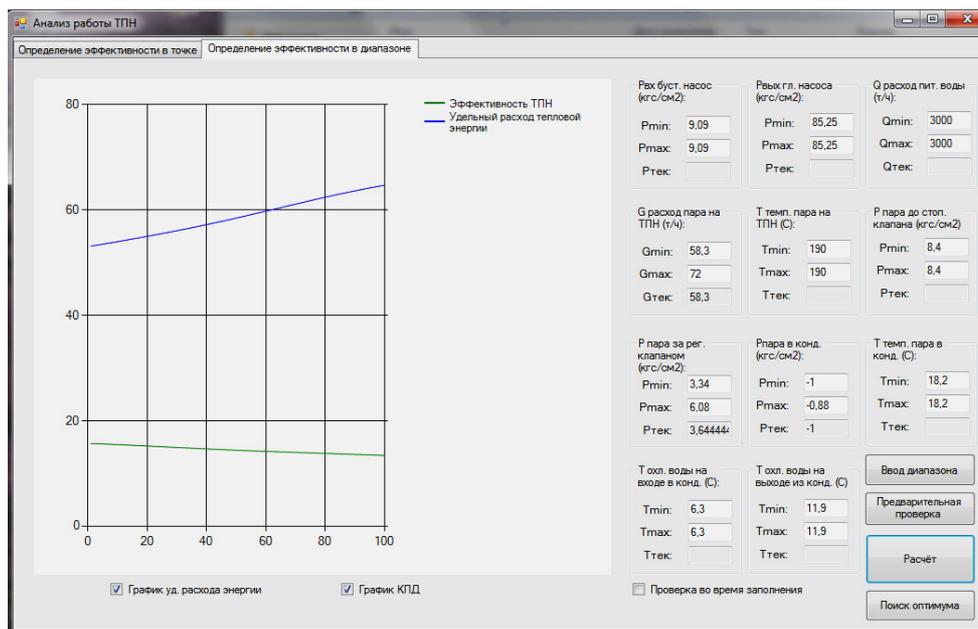
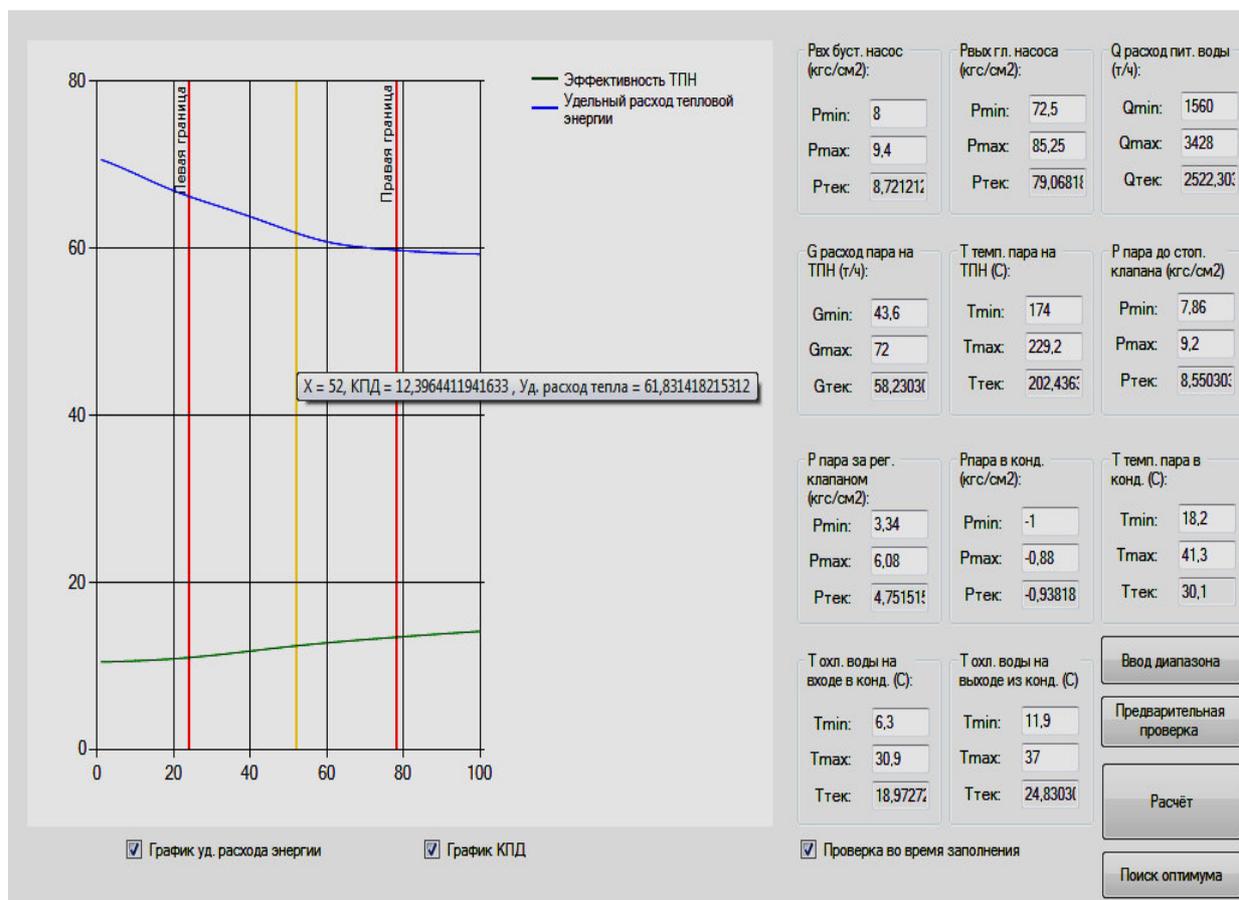


Рис. 3. – Окно программы для определения расчетных величин в диапазоне исходных данных

Также можно выбрать любую точку в диапазоне исходных данных (0-100% от диапазона) на графике и определить входные параметры, соответствующие этой точке.

Обученная нейросетевая модель, встроенная в программу, способна экстраполировать расчетные графики за границы экспериментального диапазона параметров. При вводе исходных данных, лежащих вне принятого диапазона, программа также рассчитывает эффективность на всём диапазоне, но здесь надо учитывать, что точность таких расчетов может быть ниже (рис. 4).



**Рис. 4.** – Экстраполяция расчетных графиков за пределы экспериментального диапазона исходных данных

Помимо этого существуют ограничения по вводу входных данных, которые выходят из диапазона экспериментальных параметров или оказываются некорректными, что позволяет исключить вероятность неверного расчета выходных параметров. Присутствует возможность проверить введенные данные по нажатию на кнопку «Предварительная проверка».

Очень важной особенностью программы, которая в данный момент активно дорабатывается, является поиск оптимума. Необходимо ввести диапазон давления пара за регулируемыми клапанами, расхода пара на турбину, давления в конденсаторе при остальных постоянных параметрах. После нажатия на кнопку «Поиск оптимума», программа начнет перебирать всевозможные комбинации перечисленных трех параметров, и в результате выведет наибольшую эффективность целевой функции для самой выигрышной комбинации входных параметров (рис. 5).

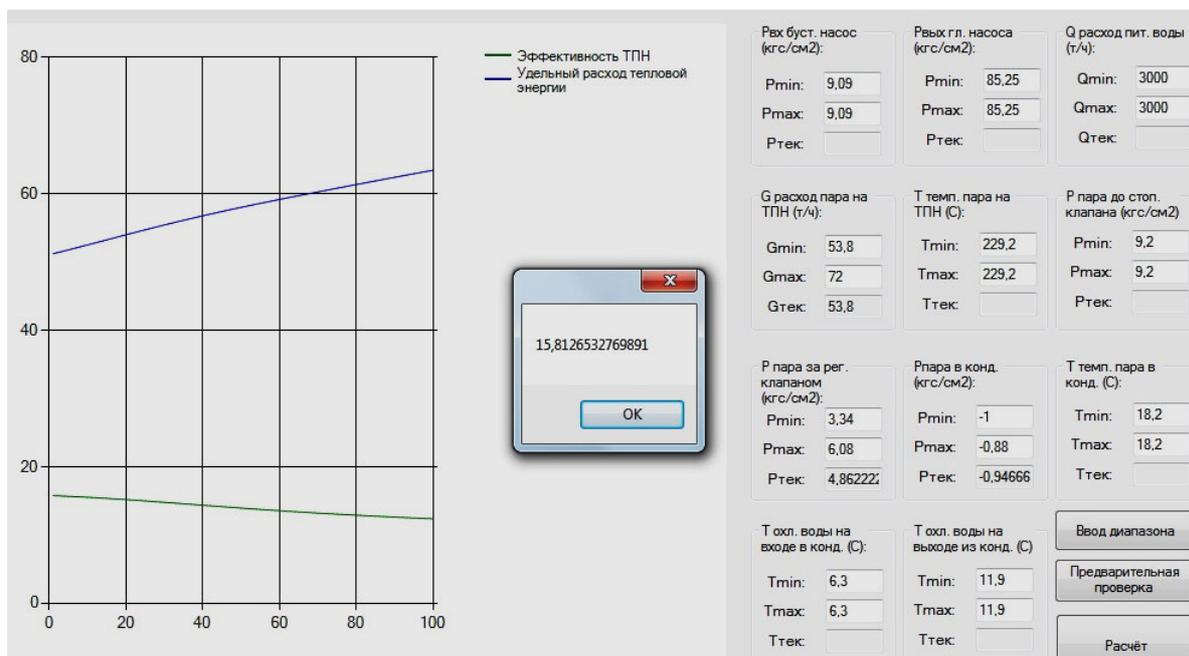


Рис. 5. – Поиск оптимума

## ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы были получены две нейросетевые модели и разработана программа для расчёта эффективности и удельных затрат тепловой энергии пара на ТПН-1. Тестирование показало адекватность созданных моделей. Максимальная погрешность составила 3% по эффективности и 2% по удельным затратам тепловой энергии пара. Гарантированно точные результаты получаются в заданном диапазоне исходных данных. Конечным продуктом является программа, позволяющая строить графики изменения эффективности и удельных затрат тепловой энергии пара на ТПН.

В будущем планируется реализовать возможность построения режимных карт по эксплуатации турбопитательного насоса и получения технически обоснованных норм расхода тепловой энергии пара на перекачку питательной воды.

Благодаря разработанной программе появляется возможность анализировать работу ТПН в реальном времени и находить режимы с наибольшей экономичностью, что может позволить персоналу АЭС определять эффективный режим турбопитательного насоса при отклонениях в режимах его работы. Это, в свою очередь, способствует повышению энергоэффективности работы ТПН и энергосбережению первичной энергии, что соответствует документу [2]. При накоплении должного массива экспериментальных данных разработанная технология позволит строить модели определения надежности работы тепломеханического оборудования АЭС. Программный комплекс может выполнять роль экспертной системы для обслуживающего персонала тепломеханического оборудования АЭС.

По предварительным расчётам при применении разработанной технологии экономия тепловой энергии пара на ТПН-1 за один год составит до 13000 Гкал.

Согласно «Методике энергетического анализа» [4] в состав энергетического баланса АЭС входит расход тепловой энергии на собственные нужды турбин (питательные турбонасосы и турбины). Данный инструмент в виде программы может позволить снизить и оптимизировать расход тепла на собственные нужды, что повысит общую экономичность энергоблока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хааге, Моника. Ядерная безопасность и культура безопасности [Текст] / Моника Хааге : доклад. – МАГАТЭ: АТОМЭКСПО, 2015.
2. Стратегические цели и цели в области энергоэффективности на среднесрочную перспективу : приложение №2 к приказу ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 15.11.2013 № 9/1055-П [Текст].
3. Горбунов, В.А. Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок [Текст] / В.А. Горбунов. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2011. – 475 с.
4. Приложение №15 к документу СЭНМ «Методика энергетического анализа», утвержденному приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 30.01.2014 №9/83-П [Текст].

## REFERENCES

- [1] Хааге Моника. Yadernaya bezopasnost i kultura bezopasnosti [Nuclear safety and culture of safety] : doclad [report]. MAGATE [IAEA]. Pub. ATOMEKSPO [ATOMEKSPO], 2015. (in English)
- [2] Strategicheskie celi i celi v oblasti energoeffektivnosti na srednesrochnuyu perspektivu [Strategic objectives and the purposes in energy efficiency area on medium-term prospect:]. Prilozhenie №2 k prikazu ОАО «Koncern Rose'nergoatom» ot 15.11.2013 №9/1055-P [appendix № 2 to the order of JSC Rosenergoatom Concern of 15.11.2013] (in Russian)
- [3] Gorbunov V.A. Ispolzovanie nejrosetevyh texnologij dlya povysheniya energeticheskoy effektivnosti teplotexnologicheskix ustanovok [Use of neural network technologies for increase of power efficiency of heattechnological installations]. Ivanovo. Pub. Ivanovskij gosudarstvennyj energeticheskix universitet im. V.I. Lenina [The Ivanovo state power university of V. I. Lenin], 2011, ISBN 978-5-89482-793-3, 475 p. (in Russian)
- [4] Prilozhenie №15 k dokumentu SENM «Metodika energeticheskogo analiza», utverzhdennomu prikazom ОАО «Koncern Rosenergoatom» ot 30.01.2014 №9/83-P [The appendix № 15 to the document SENM "Technique of the Power Analysis" approved by the order of JSC Rosenergoatom Concern of 30.01.2014 No. 9/83-P] (in Russian)

**About Improving the Efficiency and Safety of NPP Thermal and Mechanical Equipment**

**V.A. Dunaev, N.A. Lonshakov, V.A. Gorbunov**

*Ivanovo State Power Engineering University,  
34 Rabfakovskaya St., Ivanovo, Ivanovo region, Russia 153003  
e-mail: office@ispu.ru*

**Abstract** - This article discusses the problem of finding ways to improve the operational efficiency and safety of thermal and mechanical equipment on the basis of the analysis of modes of NPP equipment and determination of technically based rate of use energy. For analyze and improve the performance and safety of the equipment A technology based on neural network modeling is considered for analyze and improve the performance and safety of the equipment. The possibility of the using the technology as an example of one of the turbine drive feed water pumps Kalinin NPP power unit № 2.

**Keywords:** turbine drive feed water pump, efficiency, safety, analysis, reliability, neural network technology, operation of power generating unit, operating parameters, rate of heat energy using.