

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТУРБОПИТАТЕЛЬНЫМИ НАСОСАМИ КАЛИНИНСКОЙ АЭС

*Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Теплякова С.С., Мечтаева М.Н., Минеев П.А.*

*ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
153003, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34*



Представлены результаты создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений по анализу качества эксплуатации турбопитательных насосов Калининской АЭС. Изложен алгоритм создания интеллектуальной системы с помощью нейросетевой технологии моделирования, в основе которой лежит создание цифрового двойника турбопитательного насоса, состоящего из паровой турбины, питательного насоса, редуктора, устройств парораспределения, схемы автоматики регулирующих приборов, конденсатора приводной турбины, бустерного насоса. Программный комплекс создавался с использованием статистических данных, получаемых в процессе работы турбопитательных насосов. Интеллектуальная система принятия решений основана на анализе эффективности работы турбопитательных насосов и рационализации режимов их эксплуатации в соответствии с технически обоснованными нормами расхода энергии. Вычислительные компоненты для данного программного комплекса разработаны индивидуально для каждого турбопитательного насоса на основе данных пассивного промышленного эксперимента, что дает возможность учесть техническое состояние и особенности режима эксплуатации каждого отдельного элемента. Для создания цифрового двойника были предложены целевые функции, отражающие энергетическую эффективность эксплуатации насоса, и исследованы варьируемые параметры из числа независимых. С помощью кластерного анализа проведено исследование влияния групп независимых параметров на целевую функцию. Представлены результаты создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений для персонала станции. Приведены результаты применения разработанного программного комплекса и дан анализ сравнения полученных результатов для турбопитательных насосов энергоблоков АЭС проектов В-338 и В-320. Применение технологии позволяет определить влияние каждого параметра на энергетическую эффективность работы турбопитательных насосов в заданном диапазоне изменения эксплуатационных условий с высокой степенью точности. При использовании блока оптимизации, встроенного в вычислительный комплекс, интел-

лектуальная система принятия решений позволяет получить оптимальные значения КПД и удельных затрат тепловой энергии турбопитательных насосов при варьировании заданных параметров.

**Ключевые слова:** атомные электростанции, турбопитательный насос, нейросетевое моделирование, КПД, удельные затраты тепловой энергии, энергия собственных нужд.

**Для цитирования:** Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Теплякова С.С., Мечтаева М.Н., Минеев П.А. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению турбопитательными насосами Калининской АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 125–140.

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.10>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в энергетической отрасли развитых стран наблюдается тенденция, направленная на повышение эффективности эксплуатации систем и оборудования электрических станций, целью которой является уменьшение затрат энергии, отпускаемой на собственные нужды путем активного развития системы энергоменеджмента. Данная система разрабатывалась в соответствии с федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности», одобренного Советом Федерации от 18 ноября 2009 г., международным стандартом ISO 50001-2011 «Система энергетического менеджмента. Требования и руководства по использованию», интегрированным в систему энергоменеджмента АО «Концерн Росэнергоатом», а также в соответствии с методикой энергетического анализа, утвержденной заместителем Генерального директора АО «Концерн Росэнергоатом» Шутиковым А.В. Внедрение этих нормативных документов обязывает администрации атомных станций проводить мероприятия по улучшению энергоэффективности, энергобезопасности и энергопотребления. В энергетической политике АО «Концерн Росэнергоатом» для каждой атомной электростанции сформулированы стратегические цели, направленные на снижение затрат тепловой и электрической энергии, отпускаемой на собственные нужды станции. Турбопитательные насосы АЭС являются одними из основных потребителей тепловой энергии пара, направляемой на собственные нужды станции.

В настоящее время для исследования оборудования АЭС большое внимание уделяется предикативной аналитике, направленной на прогнозирование надежной работы оборудования посредством обработки архивных данных. С помощью статистических инструментов выявляются закономерности в характере изменений показателей в предыдущих периодах. Для такого анализа требуется разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений, ориентированных на динамические проблемные области в реальном масштабе времени. К подобным системам относятся интегрированные интеллектуальные системы, сочетающие строгие модели и методы поиска решений с нестрогими эвристическими моделями и методами, базирующимися на знании специалистов-экспертов моделей человеческих рассуждений, на классических логиках и накопленном опыте [1, 2].

Реализовать интеллектуальные системы поддержки принятия решений в полном объеме возможно при условии использования современных технологий их конструирования, основанных на концепциях распределенного искусственного интеллекта, динамических (адаптивных) моделях знаний, параллельной обработки информации при поиске решения

на основе экспертных моделей и методов правдоподобного вывода, а также ориентируясь на мощные вычислительные платформы типа рабочих станций и соответствующие инструментальные комплексы [3, 4].

Реализован проект интеллектуальной системы принятия решений, представляющий собой программные комплексы анализа работы турбопитательных насосов и рационализации эффективности режимов их эксплуатации в соответствии с технически обоснованными нормами расхода энергии. При разработке программных комплексов использовались передовые методы машинного обучения, в том числе методы моделирования, основанные на искусственных нейронных сетях [5].

Конкурентными преимуществами подобного рода методов являются высокая степень точности и скорость получения результатов, в том числе в условиях недостаточной информационной обеспеченности; интуитивно понятный механизм реализации, не требующий глубоких знаний в сфере статистического анализа больших массивов данных [6].

Рынком сбыта разработанного проекта интеллектуальной системы являются АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 (30 блоков проекта В-320 и В-338 с объемом рынка 60 единиц).

Сутью разработки является определение технически обоснованных расходов топлива и рационализация режимов эксплуатации турбопитательных насосов (ТПН) на основе инновационной технологии в сфере обработки и использования информации.

В результате анализа опыта эксплуатации выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на эффективность работы оборудования, определены технически обоснованные режимы работы оборудования и нормы расхода тепловой энергии на привод ТПН с учетом его технических и технологических особенностей. Конечным продуктом является комплекс программных средств, позволяющий анализировать работу ТПН, разрабатывать технически обоснованные нормы расхода энергии в различных эксплуатационных режимах и режимы эксплуатации [7].

Режимы эксплуатации должны быть технически достижимыми и экономически обоснованными.

Разрабатываемые режимы должны удовлетворять условиям безопасной эксплуатации ТПН атомных электрических станций, соответствовать требованиям, предъявленным в инструкциях по эксплуатации оборудования и систем [8].

Программный комплекс должен обладать простым и интуитивно понятным для инженера интерфейсом, ориентированным на внешний вид и характер взаимодействия с существующей информационно-вычислительной системой станции. При работе с программой используется информация со штатных контрольно-измерительных приборов, не требуется установка дополнительного диагностического оборудования [9].

Программный комплекс создавался на основе статистических данных, накопленных в ходе работы турбопитательного насоса. Комплекс выполняет расчеты с заданной степенью точности для конкретного турбопитательного насоса при условии, что на выбранном турбопитательном насосе не проводились ремонтные работы, связанные с внесением существенных конструктивных и технологических изменений [10]. В программном комплексе учтена защита от некорректного ввода данных, снижающих точность расчета.

Для его создания использовалась следующая информация:

- замеры технологических параметров в течение года непрерывной работы;
- временной интервал между замерами – пять минут;
- сведения о простоях оборудования и их причины;
- дополнительная информация с гидрометеостанции о состоянии окружающей среды;

- метрологическая проработка точности замеров теплотехнологических параметров штатными контрольно-измерительными приборами (класс точности прибора, погрешность канала и др.);

- техническая документация оборудования (приводной турбины, питательного насоса, редуктора, стопорно-регулирующих устройств, схемы автоматики регулирующих приборов, конденсатора приводной турбины, бустерного насоса);

- результаты режимно-наладочных испытаний оборудования и технических испытаний во время эксплуатации оборудования;

- чертежи конструкций приводной турбины, питательного насоса, бустерного насоса, стопорно-регулирующих механизмов, конденсатора приводной турбины, редуктора и т.д.;

- исследование реального потребления энергоресурсов и удельных энергетических затрат на привод турбопитательных насосов блоков АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, нахождение рациональных режимов, направленных на снижение затрат энергии;

- существующая нормативная документация по разработке показателей эффективности насосов и приводных паровых турбин, технически обоснованных норм потребления энергии для конкретного оборудования.

В качестве целевых параметров приняты

- удельные затраты энергии пара (кДж/кг), направляемого на привод ТПН из отбора после сепаратора пароперегревателя в режиме нормальной эксплуатации, из отбора с коллектора собственных нужд в режиме частичной нагрузки энергоблока, на подачу тысячи тонн питательной воды;

- коэффициент полезного действия работы ТПН [10].

Данная технология позволяет адекватно с высокой точностью моделировать поведение оборудования в диапазоне изменения его характеристик, фиксированном существующими режимами эксплуатации.

Для валидации обученной нейросетевой модели выделена часть исходных данных (около 1%), не участвующая в процессе обучения, а используемая для тестирования модели [11].

При разработке программного комплекса были учтены следующие требования:

- заданная точность;
- малое время отклика;
- низкое требование к ресурсному обеспечению;
- достаточная наглядность;
- удобство эксплуатации.

Также для использования программ не требуется высокая квалификация эксплуатирующего персонала в сфере статистического анализа больших массивов данных.

Результатом работы являются методики оценки эффективности работы турбопитательных насосов на основе реальных эксплуатационных данных. Разработанные методики легли в основу созданных программных комплексов, предназначенных для анализа и прогнозирования эффективности эксплуатации ТПН в различных эксплуатационных условиях с учетом технического состояния и особенностей работы каждого агрегата [12]. Программные комплексы разработаны отдельно для каждого блока проекта В-320 и В-338 исследуемой АЭС.

В статье представлена методология исследования, в которой определены независимые параметры и показатели эффективности работы ТПН. Также описаны этапы создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению турбопитатель-

ными насосами, результаты ее создания и применения разработанного программного комплекса, анализ полученных результатов.

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из поставленных в рамках исследования задач и на основе предварительной обработки информации об эксплуатации оборудования были определены группы взаимозависимых параметров, влияющих на целевые показатели, для обоснования объединения эксплуатационных параметров в группы использовались методы кластерного и факторного анализа. Перечень параметров уточнялся при выполнении индивидуального исследования каждого отдельного ТПН в зависимости от наличия того либо иного сигнала в информационно-вычислительной системе блока.

В качестве примера в табл. 1 приведен список независимых параметров для одного из турбопитательных насосов энергоблока проекта В-320.

Среди приведенных параметров особую значимость имеет давление питательной воды на напоре питательного насоса, которое определяется сопротивлением гидравлической системы для заданной подачи питательного насоса. Определение данного параметра осуществляется с помощью разрабатываемой программы гидравлического расчета цикла регенерации для каждого блока. Это позволит спрогнозировать изменение подачи насоса с учетом взаимного влияния подачи и напора питательной воды, задаваемого гидравлической системой [13].

Целевым параметром является подача питательного насоса, которая определяется сложной структурой взаимосвязанных математических моделей, реализованных с помощью методов машинного обучения – нейронные сети, «случайные леса» и другие [14]. Разветвленная сеть математических моделей необходима для организации вариативности расчета в зависимости от режимов работы исследуемого оборудования, например, при безнасосном (насосном) сливе конденсата с конденсатора или при питании от отбора после сепаратора-пароперегревателя (коллектора) собственных нужд и т.д. Таким образом, результирующая модель – цифровой двойник турбопитательного насоса – является интеграцией множества связанных между собой подмоделей различной архитектуры, ориентированных на решение отдельных задач. Подобный подход также повышает точность получаемых результатов моделирования в широком диапазоне изменения независимых параметров [15].

В качестве показателей эффективности работы ТПН приняты коэффициент полезного действия турбонасоса и удельный расход тепловой энергии брутто, отпускаемый на подачу 1000 м<sup>3</sup> питательной воды.

КПД ТПН определяется по следующей формуле:

$$\eta = \frac{Q \cdot (p_2 - p_1)}{G \cdot (h_2 - h_1)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход питательной воды через ТПН, м<sup>3</sup>/с;  $p_1, p_2$  – давление питательной воды на входе и выходе из ТПН соответственно, Па;  $G$  – массовый расход пара, отпускаемый на работу приводной турбины, кг/с;  $h_1, h_2$  – энтальпия пара на входе в приводную турбину и энтальпия конденсата на выходе из конденсатора приводной турбины соответственно, Дж/кг.

Энергетический показатель удельных затрат тепловой энергии, необходимой для перекачки 1000 кубометров питательной воды одним ТПН с применением паровой турбины

**Основные параметры для ТПН**

№ п/п	Наименование параметров
1	Давление пара перед ГПЗ ТПН-1, МПа
2	Давление пара перед стопорным клапаном ТПН-1, МПа
3	Температура пара перед ГПЗ ТПН-1, °С
4	Расход конденсата в трубопроводе за конденсатными насосами ТПН-1, м <sup>3</sup> /ч
5	Давление конденсата в трубопроводе на всасе конденсатного насоса, МПа
6	Давление конденсата в трубопроводе за эжекторами, МПа
7	Температура конденсата за эжекторами, °С
8	Температура конденсата приводной турбины, °С
9	Давление пара за РК1 ТПН-1, МПа
10	Давление пара за РК2 ТПН-1, МПа
11	Температура пара на выхлопе турбины ТПН-1, °С
12	Уровень конденсата в конденсаторе ТПН-1, мм
13	Давление паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН-1, кПа
14	Давление паровоздушной смеси перед эжектором уплотнений ТПН-1, кПа
15	Температура паровоздушной смеси в конденсаторе ТПН-1, °С
16	Давление пара к основному эжектору ТПН-1, МПа
17	Давление пара к эжектору системы отсоса ТПН-1, МПа
18	Давление пара на уплотнение турбины ТПН-1, МПа
19	Температура пара на эжекторы ТПН-1 от РОУ 14/6 и деаэраторов, °С
20	Температура пара в коллекторе уплотнений, °С
21	Перепад давления цирк. воды до и после конденсатора 3SD51 ТПН-1, кПа (левая сторона)
22	Перепад давления цирк. воды до и после конденсатора 3SD51 ТПН-1, кПа (правая сторона)
23	Температура охлаждающей воды до конденсатора 3SD51 ТПН-1, °С (левая сторона)
24	Температура охлаждающей воды до конденсатора 3SD51 ТПН-1, °С (правая сторона)
25	Температура охлаждающей воды после конденсатора 3SD51 ТПН-1, °С (левая сторона)
26	Температура охлаждающей воды после конденсатора 3SD51 ТПН-1, °С (правая сторона)
27	Давление питательной воды в трубопроводе на входе предвключенного насоса ТПН-1, МПа
28	Температура питательной воды на входе в предвключенный насос ТПН-1, °С
29	Давление питательной воды на напоре питательного насоса ТПН-1, МПа

в качестве привода питательного насоса, описывается следующей формулой:

$$G_{уд} = \frac{G \cdot (h_1 - h_2)}{Q \cdot \rho} \cdot 1000, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность питательной воды, кг/ м<sup>3</sup>.

Энергетические показатели составных частей ТПН не известны.

Выбранные энергетические показатели для исследуемого объекта позволяют оценить

- энергетическую эффективность сложного агрегата, не прибегая к разложению его на составные части;

- удельные затраты энергии, в полной мере охватывающие все энергетические потоки, проходящие через исследуемый объект.



Для каждого из приведенных показателей эффективности требуется определение расхода тепловой энергии, отпускаемой на работу приводной турбины.

## СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТУРБОПИТАТЕЛЬНЫМИ НАСОСАМИ

Основным вычислительным компонентом системы поддержки принятия решений являются нейросетевые модели, разрабатываемые на основе реальных эксплуатационных данных по работе оборудования и систем на действующем энергоблоке АЭС. Для валидации полученных моделей используются параметры, не участвующие в процессе их создания. Кроме того, для расширения доверительного диапазона изменения независимых параметров создается детерминированная модель гидравлической сети каждого энергоблока.

Основные этапы реализации работы представлены на рис. 1.

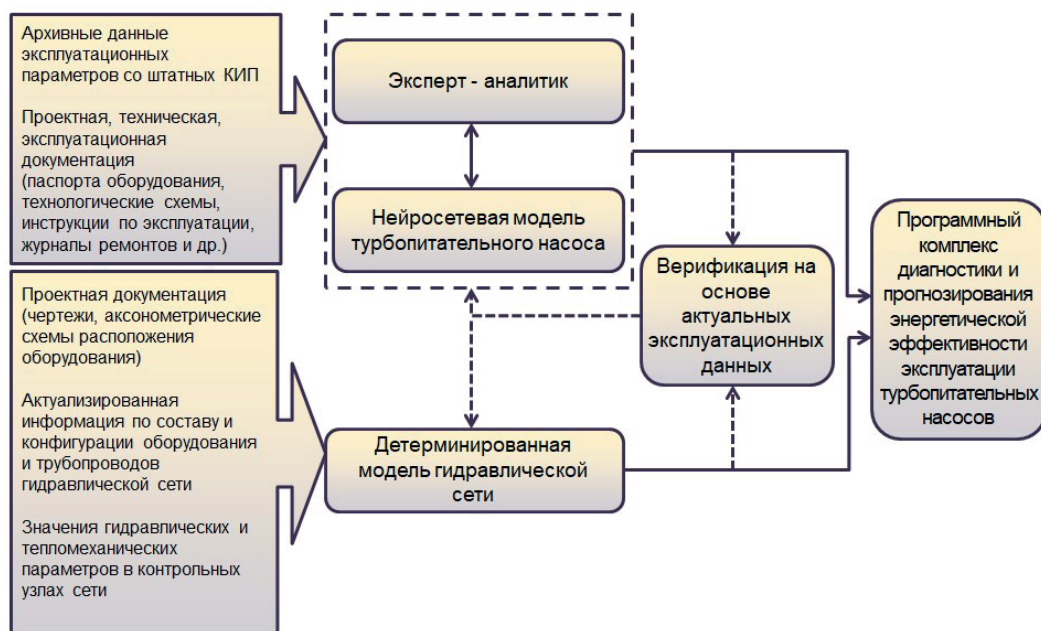


Рис. 1. Основные этапы реализации работы

Разработанная нейросетевая модель турбопитательного насоса включает в себя приводную турбину, конденсатор приводной турбины, питательный насос, бустерный насос, редуктор.

Эксплуатационные данные, используемые при построении модели, отражали работу оборудования во взаимодействии с пятью технологическими системами (рис. 2).

Валидация нейросетевой модели проводилась с использованием выборки данных, не участвовавшей в процессе разработки модели. Полученная информация проверялась на непротиворечивость физическим процессам, протекающим в исследуемом оборудовании. Погрешность результатов не превышала 1,6% в заданном диапазоне изменения параметров (табл. 2).

Таблица 2

Результаты верификации нейросетевой модели

Наименование	КПД	Удельные затраты
Среднеквадратическое отклонение	0,006	$4,93 \times 10^{-5}$
Средняя абсолютная ошибка	0,19	$3,1 \times 10^{-3}$
Максимальная абсолютная ошибка	1,04	0,16
Коэффициент корреляции	0,86	0,98
Погрешность работы модели, %	$\pm 1,6\%$	$\pm 0,3\%$

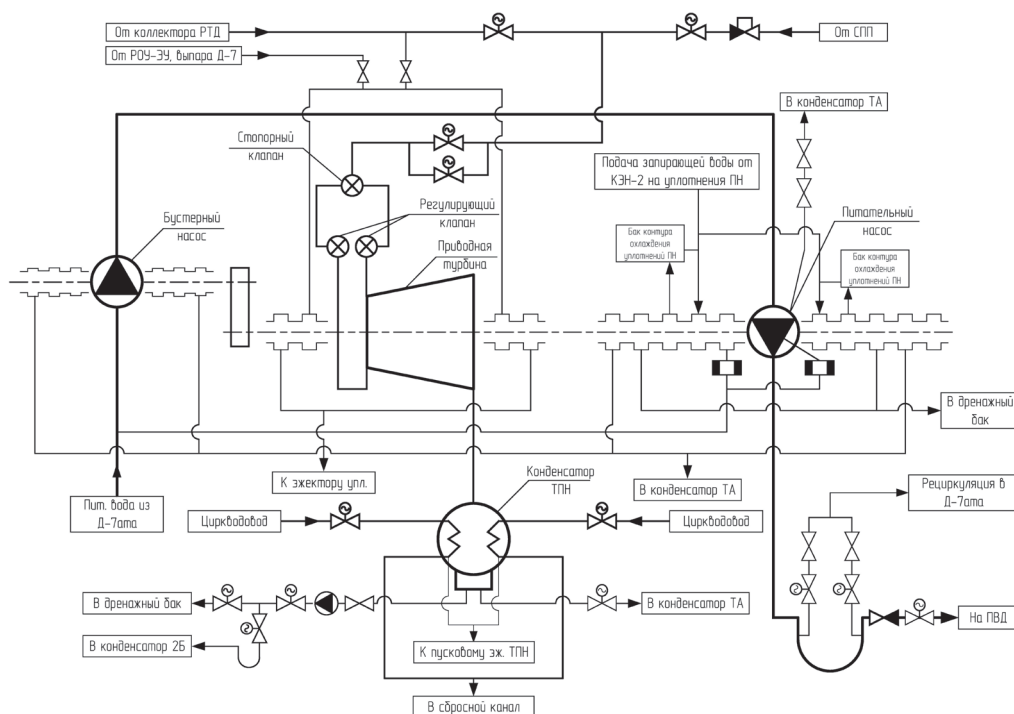


Рис. 2. Функциональная схема турбопитательного насоса

**РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ТУРБОПИТАТЕЛЬНЫМИ НАСОСАМИ**

Разработанные модели объединены в специализированные программные комплексы, позволяющие

- определить показатели эффективности оборудования при заданных эксплуатационных условиях;
- исследовать изменения эффективности работы оборудования в заданном диапазоне изменения эксплуатационных параметров;
- сравнить текущие показатели работы системы с ее паспортными характеристиками;
- найти оптимальные параметры индивидуальной работы питательных турбонасосов в заданных эксплуатационных условиях.

Программные комплексы представляют собой экспертные информационно-аналитические системы, предоставляющие информационную поддержку оператору оборудования.



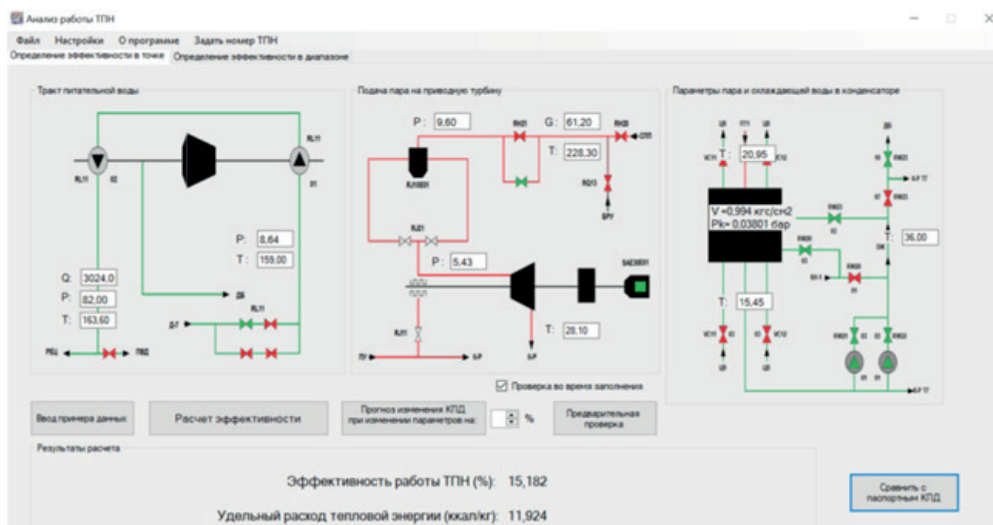


Рис. 3. Окно определения показателей эффективности ТПН блока проекта В-338

Скорость обработки данных позволяет использовать разработанное ПО в режиме реального времени.

Из главного окна реализована возможность вызова функций диагностики и прогнозирования каждого турбопитательного насоса энергоблока нажатием на соответствующую кнопку (рис. 3).

В отдельном окне реализована возможность исследовать изменения показателей эффективности турбопитательного насоса в заданном диапазоне изменения независимых параметров, тем самым определить возможные оптимальные точки (рис. 4).

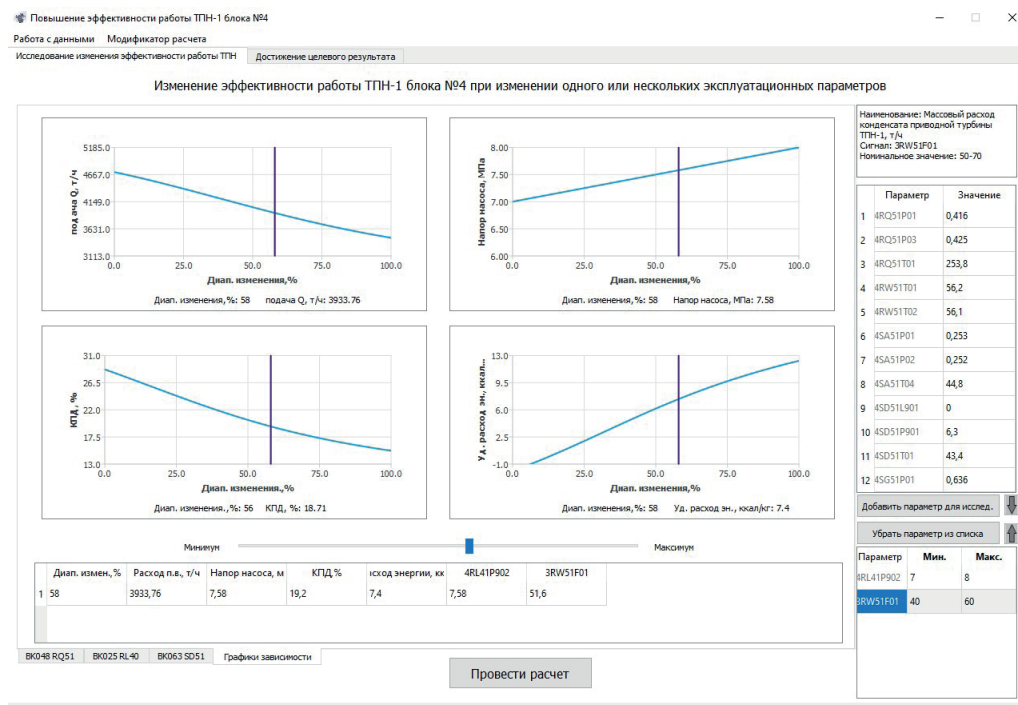


Рис. 4. Окно количественной оценки изменения показателей эффективности ТПН в заданных диапазонах изменения эксплуатационных параметров блока проекта В-320

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

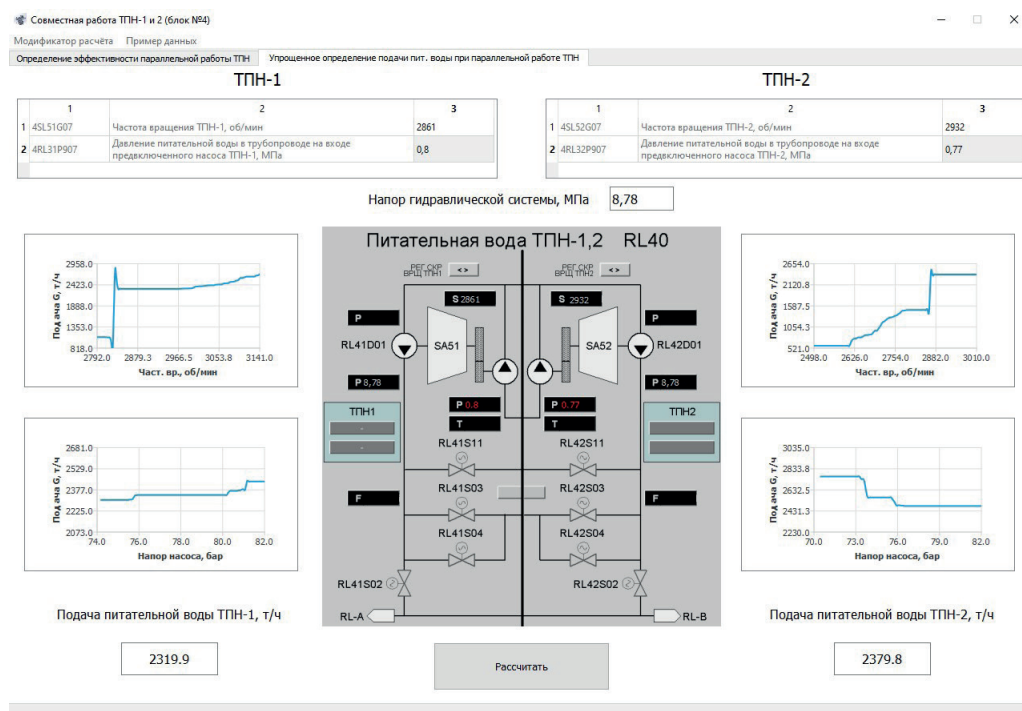


Рис. 5. Оценка параллельной работы двух ТПН блока проекта В-320

Также предусмотрена возможность исследования параллельной работы турбопитательных насосов в рамках одной гидравлической сети (рис. 5).

Для удобства ввода параметров табличные данные сопровождаются демонстрацией функциональных схем соответствующих систем с выводом информации о номинальном значении того либо иного параметра.

Практическая значимость от реализации данной функции заключается в возможности сравнения эффективности работы каждого ТПН при работе на одну гидравлическую систему. На основании этой информации возможна организация распределения нагрузки между параллельно работающими ТПН наиболее эффективным образом при заданном режиме работы энергоблока [16].

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Получаемая при работе с программными комплексами информация позволяет количественно сравнить эффективность работы однотипного оборудования. Применение технологии нейросетевого моделирования дает возможность исследовать изменение энергетической эффективности оборудования в заданном диапазоне изменения эксплуатационных условий с высокой степенью точности.

При работе с программными комплексами установлены технически обоснованные нормы тепловой энергии, отпускаемые на каждый турбопитательный насос с учетом его эксплуатационных условий и текущего технического состояния (рис. 6). Отличие между реальными и технически обоснованными удельными затратами тепловой энергии заклю-

чается в определении необходимого целевого показателя – наивысшего КПД как всего комплекса оборудования, так и его составных элементов.

Для удобства определения технически обоснованного целевого показателя работы системы турбопитательных насосов представлены перечень независимых параметров, которые получены в режиме реального времени, возможность выбора варьируемых параметров (например, давление пара перед стопорным клапаном ГПЗ ТПН-1), выпадающий список целевых параметров и вывод окна информации полученных численных результатов. В данном примере (см. рис. 6) представлена информация о том, что при изменении давления пара перед стопорным клапаном ГПЗ ТПН-1 до значения, равного 0,4311 МПа, в заданном диапазоне изменения эксплуатационных условий от минимума 0,41 МПа до максимума 0,46 МПа с высокой степенью точности можно достигнуть наивысшего КПД ТПН-1.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве рекомендательной информации для эксплуатационного персонала АЭС при распределении нагрузки между параллельно работающими турбопитательными насосами, при выборе турбопитательного насоса для вывода в резерв при разгрузке блока до 50% от номинальной мощности [17, 18]. Так турбопитательный насос № 1 в сравнении с насосом № 2 по показателям энергетической эффективности может быть рекомендован к выводу в резерв при разгрузке блока.

Повышение эффективности работы ТПН-1 блока №4

Работа с данными | Модификатор расчета

Исследование изменения эффективности работы ТПН | Достижение целевого результата

Достижение целевого показателя за счет варьируемых параметров

Параметр	Наименование	Значение
1	4RQ51P01 Давление пара в коллекторе перед СК ТПН-1, МПа	0,416
2	4RQ51T01 Температура пара перед ГПЗ ТПН-1, °C	253,8
3	3RW51F01 Массовый расход конденсата приводной турбины ТПН-1, т/ч	66,3
4	4RW51T01 Температура конденсата за эжекторами ТПН-1, °C	56,2
5	4RW51T02 Температура конденсата приводной турбины ТПН-1, °C	56,1
6	4SA51P01 Давление пара за РК1 ТПН-1, МПа	0,253
7	4SA51P02 Давление пара за РК2 ТПН-1, МПа	0,252
8	4SA51T04 Температура пара на выходе турбины ТПН-1, °C	44,8
9	4SD51L901 Уровень конденсата в конденсаторе ТПН-1, мм	-9
10	4SD51P901 Давление пара в конденсаторе ТПН-1, кПа	6,3

Выберите целевой показатель:

Максимальный КПД работы ТПН

Настройка оптимизации

Что ищем: max Шаг дифф: 0,010 Условие окончания: 0,010

Алгоритм: SQP Контроль сглаживания: false Макс итерации:

Оптимизация ISO

Определить

```

result code: 0
optimal_point
cal_index: 33
finish_time: 2024.04.24 19:38:22.990943
start_time: 2024.04.24 19:38:22.884755
Значение параметров:
Давление пара перед стопорным клапаном за ГПЗ ТПН-1, МПа: 0.4311
Наивысший КПД: 14.7412

```

Диаграмма влияния эксплуатационных параметров на целевые функции | Достижение целевых показателей за счет варьируемых параметров

Параметр	Наименование	Минимум	Максимум
1	4RQ51P01 Давление пара перед стопорным клапаном за ГПЗ ТПН-1, МПа	0,41	0,46

Рис. 6. Окно определения технически обоснованного целевого показателя работы системы турбопитательных насосов

Таким образом, разработаны интеллектуальные системы поддержки принятия решения по управлению турбопитательными насосами блоков АЭС проекта В-338 и В-320. Системы позволяют оценить влияние каждого варьируемого параметра или группы параметров на целевую функцию и найти оптимальное значение параметра или группы параметров в заданных диапазонах. Для каждой системы индивидуально разработаны нейросетевые

модели, позволяющие учесть техническое состояние и особенности эксплуатации оборудования.

### ВЫВОДЫ

Разработаны программные комплексы для диагностики, анализа и повышения эффективности турбопитательных насосов энергоблоков первой и второй очереди Калининской АЭС. Программные комплексы позволяют облегчить взаимодействие оператора с математическими моделями ТПН и реализуют практическую возможность решения ряда задач, важных для эксплуатации гидравлического и тепломеханического оборудования АЭС.

Вычислительные компоненты для данного программного комплекса разрабатываются индивидуально для каждого ТПН на основании данных пассивного промышленного эксперимента, что дает возможность учесть техническое состояние и особенности режима эксплуатации каждого отдельного элемента.

Данная технология может использоваться для всех турбопитательных насосов эксплуатируемых блоков с реакторами типа ВВЭР и позволяет определить влияние каждого параметра на энергетическую эффективность работы ТПН. При использовании блока оптимизации, встроенного в вычислительный комплекс, интеллектуальная система принятия решений позволяет получить оптимальные значения КПД и удельных затрат тепловой энергии ТПН при варьировании заданных параметров.

Предлагаемое программное средство может использоваться для анализа качества ремонта ТПН на основе повторного обучения нейросети по эксплуатационным данным после ремонта.

За счет снижения затрат на потребление тепловой энергии турбопитательными насосами снижаются выбросы тепловой энергии в окружающую среду.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации НИОКР № 9-1763ц26-Д акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом»).

### Литература

1. Вагин В.Н., Еремеев А.П. Конструирование интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени. / Тр. междунар. конф. «Интеллектуальное управление: новые интеллектуальные технологии в задачах управления (ICIT'99)» – М.: Наука, Физматлит, 1999. – С. 27–32.
2. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях. – М.: Институт системного анализа РАН, 2001. – 304 с.
3. Бочарова Н.А., Воронов А.В., Слепов М.Т. Ранжирование информационных потоков в системах технического диагностирования энергоблока ВВЭР-1200. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 3. – С. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.06> .
4. Трофимов М.А., Мурачев Е.Г., Рогоза А.А., Егунов Н.Д. Математическое моделирование системы автоматического регулирования паровой турбины. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 4. – С. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.09> .
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 352 с.

6. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Нагорная О.Ю., Беляков А.А. Повышение точности определения параметров эффективности турбоустановок с применением нейронных сетей. // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 4. – С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.005-012>.
7. Шелегов А. С., Лескин С.Т., Слободчук В.И. Насосное оборудование АЭС: Учеб. пособие для вузов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 348 с.
8. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А. Оптимизация затрат энергии турбопитательных насосов блока АЭС нейросетевыми методами моделирования. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122). – С. 54–60. DOI: [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2018\\_3\\_54](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2018_3_54)
9. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей. // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – №3. – С. 28–59. DOI: <https://doi.org/10.14529/cmse170303>
10. Васильев В.А. Определение КПД турбопитательной насосной установки термодинамическим способом. // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – №1. – С. 162–167. Электронный ресурс: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_13011076\\_26031472.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_13011076_26031472.pdf) (дата доступа 30.08.2023).
11. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
12. Дунаев В.А., Лоншаков Н.А., Горбунов В.А. К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС. // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 2(15). – С. 63–70. Электронный ресурс: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2015.2-8.pdf> (дата доступа 30.08.2023).
13. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям (Под ред. М.О. Штейнберга). 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
14. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
15. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А. Анализ эффективности работы питательного турбонасоса / Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сборник научных трудов по материалам Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, 29-31 мая 2019 г., г. Иваново. – Иваново: ИГЭУ, 2019. – Т. 2. – С. 77–80.
16. Филиппчук Ю.Д. Оценка эффективности импульсной разгрузки турбин энергоблоков АЭС для повышения динамической устойчивости. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2012. – № 3. – С. 40–43.
17. Волков А.В., Парыгин А.Г., Хованов Г.П., Наумов А.В. Повышение эффективности работы центробежных насосов, находящихся в эксплуатации. // Новости теплоснабжения. – 2010. – №10. – С. 122.
18. Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Мечтаева М.Н., Минеев П.А. Методика оценки влияния эксплуатационных параметров на работу турбопитательного насоса. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 4. – С. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.4.014-023>

Поступила в редакцию 01.09.2023

#### Авторы

Горбунов Владимир Александрович, доцент, д.т.н.,

E-mail: [gorbunov.w@mail.ru](mailto:gorbunov.w@mail.ru)

Лоншаков Никита Андреевич, доцент, к.т.н.,

E-mail: [nik-lon@mail.ru](mailto:nik-lon@mail.ru)

Теплякова Светлана Сергеевна, аспирант,

E-mail: [svetlana20212120@mail.ru](mailto:svetlana20212120@mail.ru)

Мечтаева Мария Николаевна, аспирант,

E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Минеев Павел Алексеевич, аспирант,

E-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

UDC 621.039.4

## **Intelligent Decision Support System for the Management of Turbine Feed Pumps at the Kalinin NPP**

**Gorbulov V.A., Lonshakov N.A., Teplyakova S.S., Mechtaeva M.N., Mineev P.A.**

*Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin,*

*34 Rabfakovskaya St., 153003 Ivanovo, Russia*

### **Abstract**

The paper presents the results of developing an intelligent decision support system for analyzing the operating quality of turbine feed pumps at the Kalinin NPP. An algorithm is described for the intelligent system development based on the neural network simulation technology, which is based on the development of a digital twin of a turbine feed pump consisting of a steam turbine, a feed pump, a reducer, steam distribution devices, an automation circuit of control devices, a drive turbine condenser, and a booster pump. The software package was developed based on statistical data obtained in the process of the turbine feed pumps operation. The intelligent decision-making system is based on analyzing the efficiency of the turbine feed pump operation and rationalizing their operating modes in accordance with technically sound energy consumption standards. The computing components for this software package are designed individually for each turbine feed pump based on data from a passive industrial experiment, which makes it possible to take into account the technical condition and peculiarities of the operating mode of each individual element. To build a digital twin, target functions were proposed which reflect the energy efficiency of the pump operation, and variable parameters were investigated from among the number of independent ones. Based on a cluster analysis, the influence of groups of independent parameters on the target function was studied. The results of the intelligent decision support system development for the plant personnel are presented. The results of using the developed software package are presented, and the comparison of the results obtained for the turbine feed pumps of the V-338 and V-320 NPP units is analyzed. The technology application makes it possible to determine the effect of each parameter on the energy efficiency of turbine feed pumps in a given range of operating conditions with a high degree of accuracy. When using the optimization unit built into the computing complex, the intelligent decision-making system allows one to obtain optimal values of the turbine feed pump efficiency and specific heat consumption while varying the parameters set.

**Keywords:** nuclear power plants, turbine feed pump, neural network simulation, efficiency, specific cost of thermal energy, BOP energy.

**For citation:** Gorbulov V.A., Lonshakov N.A., Teplyakova S.S., M.N. Mechtaeva, Mineev P.A. Intelligent Decision Support System for the Management of Turbine Feed Pumps of Kalinin NPP. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 125–140; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.10> (in Russian).



## References

1. Vagin V.N., Ereemeev A.P. Designing intelligent real-time decision support systems. *Proc. of the international Conf. «Intelligent management: New Intelligent technologies in management tasks (ICIT'99)»*. Moscow, Nauka, Fizmatlit Publ., 1999, pp. 27–32 (in Russian).
2. Gelovani V.A., Bashlykov A.A., Britkov V.B., Vyazilov E.D. *Intelligent decision support systems in emergency situations*. Moscow, Institute sistemnogo analiza RAN Publ., 2001, 304 p. (in Russian).
3. Bocharova N.A., Voronov A.V., Slepov M.T. Ranking of information flows in the systems of technical diagnostics of the VVER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022, no. 3, pp. 65–75, DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.06> (in Russian).
4. Trofimov M.A., Murachev E.G., Rogoza A.A., Egupov N.D. Mathematical modeling of the steam turbine automatic control system. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 4, pp. 99–109, DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.09> (in Russian).
5. Draper N., Smith G. *Applied regression analysis*. In 2 books. Book 2. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1986, 352 p. (in Russian).
6. Gorbunov V.A., Lonshakov N.A., Nagornaya O.Yu., Belyakov A.A. Improving the accuracy of determining the efficiency parameters of turbine installations using neural networks. *Vestnik IGEU*. 2017, no. 4, pp. 5–12, DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.005-012> (in Russian).
7. Shelegov A.S., Leskin S.T., Slobodchuk V.I. *Pumping equipment of NPP: Textbook for universities*. M.: NRNU MEPhI, 2011, 348 p. (in Russian).
8. Gorbunov V.A., Lonshakov N.A. Optimization of energy consumption of turbochargers of the AES block of neural network modeling methods. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2018, no. 3 (122), pp. 54 – 60, DOI: [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2018\\_3\\_54](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2018_3_54) (in Russian).
9. Sozykin A.V. Review of deep neural network training methods. *Vestnik YuUrGU. Series: Computational Mathematics and Computer Science*. 2017, no. 3, pp. 28–59, DOI: <https://doi.org/10.14529/cmse170303> (in Russian).
10. Vasiliev V.A. Determination of the efficiency of a turbopump pumping unit by thermodynamic method. *Vestnik YuUrGU*. 2005, no. 1, pp. 162–167. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_13011076\\_26031472.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_13011076_26031472.pdf) (дата доступа 30.08.2023) (in Russian).
11. Gmurman V.E. *Probability theory and mathematical statistics: Textbook for universities*. Ed. 9, stereo. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 479 p. (in Russian).
12. Dunaev V.A., Lonshakov N.A., Gorbunov V.A. On the issue of improving the efficiency and safety of operation of thermal and mechanical equipment of nuclear power plants. *Global nuclear safety*. 2015, no. 2(15), pp. 63–70 Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2015.2-8.pdf> (accessed 30.08.2023) (in Russian).
13. Idelchik I. E. *Handbook of hydraulic resistances*. Edited by M.O. Steinberg. Ed.3, revised and enlarged. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 672 p. (in Russian).
14. Karpenko A.P. *Modern search engine optimization algorithms*. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2014, 446 p. (in Russian).
15. Gorbunov V.A., Lonshakov N.A. Analysis of the efficiency of a turbine feed pump. *The state and prospects of development of electrical and thermal technology (Bernardos readings): collection of scientific papers based on the materials of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference, May 29-31, 2019*. Ivanovo, IGEU Publ., 2019, vol. 2, pp. 77–80 (in Russian).
16. Filipchuk Yu.D. Evaluation of the efficiency of pulsed unloading of turbines of NPP power units to increase dynamic stability. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*. 2012, no. 3, pp. 40–43 (in Russian).

17. Volkov A.V., Parygin A.G., Khovanov G.P., Naumov A.V. Improving the efficiency of centrifugal pumps in operation. *Novosti teplosnabzheniya*. 2010, no. 10, p. 122 (in Russian).

18. Gorbunov V.A., Teplyakova S.S., Lonshakov N.A., Andrianov S.G., Mechtaeva M.N., Mineev P.A. *Methodology to assess impact of operational parameters on operation of turbine feed pump*. Vestnik IGEU. 2022, no. 4, pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.4.014-023> (in Russian).

### Authors

Vladimir A. Gorbunov, Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [gorbynov.w@mai.ru](mailto:gorbynov.w@mai.ru)

Nikita A. Lonshakov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [nik-lon@mail.ru](mailto:nik-lon@mail.ru)

Svetlana S. Teplyakova, Post Graduate Student,

E-mail: [svetlana20212120@mail.ru](mailto:svetlana20212120@mail.ru)

Maria N. Mechtaeva, Post Graduate Student,

E-mail: [maria.mechtaeva@mail.ru](mailto:maria.mechtaeva@mail.ru)

Pavel A. Mineev, Post Graduate Student,

E-mail: [pasha.mineevr@yandex.ru](mailto:pasha.mineevr@yandex.ru)