

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ БЛОКА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

**Д.Б. Стацура\***, **М.Ю. Тучков\***, **П.В. Поваров\***, **А.И. Тихонов\***,  
**С.П. Падун\*\***, **А.П. Воробьев\*\***, **М.М. Майорова\*\***

\* *Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»  
396071, Воронежская обл., г. Нововоронеж, зона Южная промышленная, 1*

\*\* *ООО «ИФ СНИИПАТОМ»*

*123060, г. Москва, ул. Расплетина, д. 5, стр. 1, блок 135*



Проекты инновационных энергоблоков отличаются высокой степенью автоматизации и информатизации, поэтому особый интерес вызывают системы информационной (интеллектуальной) поддержки оператора, способные снизить нагрузку на оперативный персонал, а также прогнозировать возможные отклонения задолго до того момента, как эти отклонения перерастут в серьёзную аварийную ситуацию.

В статье проводится анализ актуальной нормативно-технической документации, требующей наличие решений по поддержке оператора, а также определяющей перечень функций системы, которые должны быть предусмотрены для повышения уровня безопасности АЭС, и дан краткий обзор мирового опыта по реализации подобных решений.

В качестве примера дальнейшего развития систем поддержки оператора рассматривается система интеллектуальной поддержки оператора (СИПО), разработка которой ведётся на пилотном энергоблоке с реакторной установкой ВВЭР-1200 Нововоронежской АЭС. Функции СИПО позволят выполнить нереализованные в настоящее время в проекте энергоблока требования нормативно-технической документации.

Ключевыми особенностями разрабатываемой СИПО являются пошаговые интерактивные инструкции и программная модель энергоблока. Приводится краткое описание программной модели и рассматриваются несколько примеров её практического использования в составе СИПО для совершенствования проектных решений и оптимизации автоматического управления технологическим процессом. Предлагается дальнейшее внедрение СИПО на строящихся энергоблоках для снижения информационной перегрузки операторов и создания условий для поэтапного повышения уровня автоматизации управления энергоблоком.

**Ключевые слова:** СИПО, технологический процесс, интерактивная процедура, модель энергоблока, принятие решений, мониторинг, проектные решения, оптимизация, АСУ ТП, алгоритм.

© *Д.Б. Стацура, М.Ю. Тучков, П.В. Поваров, А.И. Тихонов, С.П. Падун, А.П. Воробьев, М.М. Майорова, 2020*

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями ПБЯ РУ АС (НП-082-07) [1] в составе управляющих систем нормальной эксплуатации и управляющих систем безопасности должна быть реализована системы информационной поддержки оператора. Аналогичное требование приведено в п. 3.4.1.1. НП-001-15 [2]. Согласно п. 3.4.5.1. НП-001-15, система информационной поддержки оператора должна представлять персоналу БПУ обобщенную информацию о параметрах АС, характеризующих состояние функций безопасности.

В комментариях к НП-001-15 (РБ-152-18) [3] указано, что требование п. 3.4.5.1 ставит перед разработчиком проекта АС задачу отыскания такого способа обобщения информации о текущем состоянии безопасности АС, который позволил бы оператору по минимальному числу обобщенных параметров быстро оценить обстановку на блоке АС и принять решение.

Более полно требования к информационной поддержке оператора изложены в ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Атомные станции. Пункты управления. Проектирование. [4] п. 3.21. Система поддержки оператора (operator support system): «Система или системы, предназначенные для поддержки задач абстрактного мышления или задач интеллектуальной обработки информации, выполняемых персоналом БПУ». В п. 7.7.2.5 определены функции поддержки оператора, которые должны быть предусмотрены для повышения безопасности, работоспособности и эффективности АС:

- отображение параметров безопасности и контроль функций безопасности [5];
- диагностирование АС;
- выдача советов оператору в режимах нормальной эксплуатации и послеаварийных ситуациях, например, основанные на симптомно-ориентированных процедурах;
- автоматический контроль энергетических режимов.

Программная модель энергоблока дает возможность диагностики состояния АС при разработке руководств по управлению запроектными (в том числе тяжелыми) авариями.

По мере возможности функции должны быть интегрированы в общий проект БПУ.

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА

На АЭС «Библис» в Германии в 80-х годах прошлого столетия была внедрена система анализа аномальных ситуаций STAR. В ней используются модели отклонений от нормального режима эксплуатации. На Калининской и Нововоронежской АЭС была внедрена система СПРИНТ [9]. СПРИНТ – это система поддержки принятия решений реального времени для диагностики атомных станций с интеллектуальными механизмами поиска.

В рамках плана реализации НИОКР АО «Концерн Росэнергоатом» ведется формирование требований и основных решений по созданию системы интеллектуальной (информационной) поддержки оператора (СИПО).

Заинтересованными организациями согласован следующий перечень функций СИПО:

- определение режима энергоблока (уровня глубокоэшелонированной защиты) и состояния энергоблока;
- расчет уставок сигнализации в зависимости от текущего состояния энергоблока;
- контроль эксплуатационных пределов и условий эксплуатации, пределов и условий безопасной эксплуатации;
- мониторинг состояния основного оборудования энергоблока;
- мониторинг систем безопасности;
- контроль автоматического управления оборудованием;
- прогнозирование основного технологического процесса с помощью модели энергоблока;
- предоставление оперативному персоналу интерактивных инструкций по процеду-

рам пуска (останова) энергоблока, ввода (вывода) оборудования, регламентных проверок, опробований и испытаний, интерактивных аналогов актуальных процедур ИЛН, ИЛА, РУЗА, РУТА;

- автоматизированное формирование оперативных журналов;
- предоставление оператору справочной информации о возможных причинах сигнализации на панелях БПУ(РПУ) (реакция на сигнал);
- рекомендации по оптимизации управления технологическим процессом.

Функции СИПО обеспечивают выполнение нереализованных в настоящее время в АСУ ТП энергоблока №1 НВАЭС-2 требований ГОСТ Р МЭК 60964- 2012 [6] к поддержке оператора, включая требование интеллектуальной обработки информации для разгрузки оперативного персонала БПУ во всех режимах работы энергоблока.

ООО «ИФ СНИИП АТОМ» разработан макет СИПО (МкСИПО), в составе ПО которого реализованы программная модель энергоблока и интерактивные приложения, которые можно разделить на логические блоки. Первая версия макета функционирует на блоке № 1 НВАЭС-2 с момента пуска.

Блок интерактивных процедур – приложения, предназначенные для контроля безопасного выполнения работ и поддержки оператора в пошаговом проведении программ пуска (останова) блока и типовых бланков переключений (ТБП). Инструмент сокращает время на обработку информации и снижает вероятность возможных ошибочных действий и ошибок персонала.

Примером интерактивной процедуры является процедура пуска блока, которая содержит активные ссылки на эксплуатационную документацию и имеет возможность отображения значений технологических защит и блокировок (ТЗБ) оборудования, контроля выдержек времени для различных режимов работы энергоблока. Валидация интерактивных процедур в 2019 г. на энергоблоке №1 НВАЭС-2 подтвердила, что процедуры соответствуют предъявляемым к ним требованиям и удобны для использования оперативным персоналом БПУ.

Блок интерактивных карт действий (ИКД) – приложения для анализа протекания технологического процесса, снижающие нагрузку на оператора в ситуациях с ограниченным временем принятия решения. ИКД предназначены для выполнения персоналом ряда последовательных действий при срабатывании технологической сигнализации на панелях БПУ, направленных на приведение параметров и оборудования в состояние, при котором они не имеют превышения эксплуатационных пределов и (или) условий безопасной эксплуатации. Карты содержат описания возможных причин срабатывания сигнализации и действия оператора по их устранению. Данный блок реализован в МкСИПО в соответствии с ГОСТ Р МЭК 62241-2012 [7].

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА**

Деление на интеллектуальную и информационную поддержки оператора [9] весьма условно, но бесспорно, что в основе интеллектуальной составляющей лежат математические и программные модели энергоблока.

Работы по созданию имитационных моделей сложных теплоэнергетических объектов велись в ИПМаш НАН Украины, где были разработаны имитационные модели конденсационных паротурбинных установок для ТЭС и АЭС [11].

Модель энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 включает в себя построение математических и программных моделей, имитационное моделирование [12]. Данные разработки могут быть использованы для синтеза новых структур локальных систем автоматического управления [13]. Математические модели энергоблока используются также для тестирования алгоритмов систем управления АЭС и верификации тренажерных моделей АЭС [14, 15].

В США создан консорциум для разработки «продвинутой» компьютерной модели легководных реакторов – CASL (The Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors) [16].

Аналогичные работы проводятся для реакторов четвертого поколения в рамках проекта NEAMS (Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation) [16].

Российский программно-технический комплекс (ПТК) «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» [17] показал принципиальную возможность создания в общей программной среде единой системы расчетных кодов для взаимосвязанного расчета многообразных физических явлений на АЭС-2006. С помощью ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» выполняется обоснование безопасности АЭС.

Очевидно, что система поддержки принятия решений оператором (функция «Рекомендации по оптимизации управления технологическим процессом») является интеллектуальной составляющей СИПО, в основе которой лежит модель энергоблока, позволяющая проводить прогнозирование различных режимов эксплуатации.

Основным отличием используемой в МкСИПО программной модели энергоблока является то, что она разрабатывалась специально для использования в АСУ ТП, поэтому – программное обеспечение модели разработано в соответствии с требованиями к процедуре разработки ПО систем, важных для безопасности (класс 3 категория С по МЭК 61226);

- моделирование технологического процесса выполняется на порядок быстрее протекания основного технологического процесса энергоблока в режимах НЭ и ННЭ;

- модель устойчиво работает в течение топливной кампании в любых режимах НЭ и ННЭ;

- модель способна стартовать в любой момент кампании в состоянии энергоблока, определяемом принимаемыми от СВБУ показаниями датчиков;

- модель имеет удобный пользовательский интерфейс;

- модель ориентирована на получение не консервативной, а наиболее достоверной оценки;

- модель прошла валидацию на представительном наборе эксплуатационных данных ВВЭР-1200.

При этом в МкСИПО не используются упрощенные модели, характерные для тренажеров, а применяется нейтронно-физический код повышенной точности. Расчет распределения энерговыделения в объеме активной зоны выполняется аттестованной Ростехнадзором программой SVC, основанной на прямом решении уравнения переноса нейтронов и не использующей, в отличие от тренажерных программ, гомогенизацию расчетных ячеек и диффузионное приближение.

Детальная теплогидравлическая модель активной зоны (163×16 расчётных элементов) характеризуется следующими особенностями:

- количество параллельных каналов равно количеству ТВС;

- детальность расчёта энерговыделения определяется заданием произвольного количества участков по высоте активной зоны;

- учитываются поперечные перетечки между ТВС по всей высоте активной зоны.

Высокая дискретизация расчётной модели активной зоны позволяет получить детальное трёхмерное поле теплогидравлических параметров по всему объёму активной зоны, т.е. точнее оценить показатели запаса до кризиса теплообмена и тепломеханические условия работы твэлов в каждой ТВС.

Учёт поперечных перетечек в активной зоне необходим в случае использования бесчехловых ТВС для оценки перераспределения расходов по сечению активной зоны, которое возникает из-за неравномерности энерговыделения, а также в случае использования смешанных топливных загрузок, состоящих из ТВС с различными гидравлически-

ми характеристиками.

Теплогидравлическая модель основана на решении системы фундаментальных уравнений сохранения и замыкающих соотношений. Система главных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в первом и втором контурах энергоблока, включает в себя уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса (уравнение Навье-Стокса), уравнение сохранения энергии и уравнения состояния, записанные для каждой из фаз. В дополнение к основным уравнениям записывается уравнение переноса нерастворимых примесей для моделирования транспорта борного поглотителя в первом контуре реакторной установки.

В силу того, что решаемые уравнения являются нестационарными, получаемое решение является набором состояний рассматриваемой системы для различных срезов по времени на произвольную глубину прогнозирования от некоторого заданного начального состояния.

Система основных уравнений после дискретизации решается с помощью численных методов. Дискретизация подразумевает разбиение элементов расчётной схемы на отдельные расчётные узлы и связи.

Теплогидравлическая модель энергоблока создаётся из набора расчётных схем, которые представляют собой наборы взаимосвязанных элементов оборудования. Расчётные схемы могут включать в себя

– оборудование (насосные агрегаты, электронагреватели, баки с уровнем раздела фаз);

– трубы, камеры смешения, турбинные ступени;

– гидравлические связи между отдельными элементами;

– трубчатки теплообменных аппаратов;

– запорно-отсечную и регулируемую арматуру, обратные клапаны.

Программная модель привязана к сигналам СВБУ, что позволяет инициировать процесс моделирования с любого текущего состояния энергоблока. Обеспечивается быстрое действие модели на уровне (или существенно выше) реального времени. Для построения прогноза в качестве исходного может использоваться состояние энергоблока в произвольный момент в прошлом с точностью до одной секунды, при этом история работы блока целиком архивируется. Метод верхних релаксаций позволяет находить численное решение системы уравнений, описывающих теплогидравлические процессы, итерационным способом, при этом скорость сходимости численного решения позволяет достичь заданной точности за меньшее количество итераций. Расчёт параметров энергоблока со скоростью, превышающей реальное время, даже при использовании моделей с высокой детализацией является необходимым условием для функции динамического контроля состояния энергоблока на основании сравнения расчётных данных с текущими показаниями датчиков.

Модель АСУ ТП реализована на базе отдельного программного модуля, обобщающего логику работы модельных схем контроля и управления. Комплект расчётных схем формируется для неё с помощью редактора схем, который является составной частью программной среды КРУИЗ. Наборы совместно скомпилированных схем воспроизводят алгоритмы работы основных регуляторов энергоблока, а также защит и блокировок. Расчётные схемы формируются на основе GET-схем ТПТС, а также технического проекта АСУ ТП энергоблока и документации генерального конструктора РУ, поэтому модель АСУ ТП в целом повторяет логику, заложенную в АСУ ТП энергоблока. Важно отметить, что в программной модели блока алгоритмы работы регуляторов блока и ТЗБ верифицированы по результатам ПНР. Таким образом, подробно моделируются различные технологические системы и оборудование второго контура, а также вспомогательные системы энергоблока.

В составе СИПО программная модель блока должна использоваться для решения таких задач, как

- контроль достоверности показаний датчиков СНЭ и СБ путем анализа взаимного соответствия показаний датчиков;
- диагностика нарушений в работе основного оборудования;
- прогнозирование развития технологического процесса с текущего состояния вперед на 15 – 30 минут с выдачей предупредительной сигнализации о выходе контролируемых параметров за эксплуатационные пределы при отсутствии управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (автоматический прогноз);
- прогнозирование развития технологического процесса с учетом планируемых управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (прогноз по запросу оператора).

Описание последовательности управляющих действий оператора при прогнозе по запросу (сценарий прогноза) формируется оператором пошагово по мере выполнения расчета. Для стандартных последовательностей действий может использоваться заранее подготовленный сценарий. При прогнозировании моделируются процессы нормальной эксплуатации (НЭ), в том числе пуск блока от холодного состояния до работы на номинальных параметрах, разгрузка и останов блока, маневрирование мощностью, а также процессы при нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ), в том числе сопровождающиеся срабатыванием ПЗ и ускоренной разгрузкой блока.

Кроме информационной поддержки программная модель блока может быть использована для решения следующих задач:

- оптимизация технологических защит и блокировок и способов разгрузки реактора с целью повышения динамической устойчивости энергоблоков нового поколения с РУВЗ92М;
- проведение вариантных расчетов для совершенствования схемных решений, выбора оптимального состава и характеристик теплообменного оборудования.

### **ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**Пример 1.** Повышение динамической устойчивости энергоблока.

Примером использования программной модели блока для корректировки ТЗБ и выдержек времени является численное моделирование переходных процессов во время экспериментов на энергоблоке №1 НВАЭС-2 по отключению одного питательного электронасоса (ПЭН) без включения резервного. Регуляторы уровня в ПГ-1-4 (РУ ПГ) переходят в «стерегущий» режим при увеличении расхода на напоре любого ПЭН более 2000 м<sup>3</sup>/ч. При этом они прикрываются, удерживая максимальный расход питательной воды через ПЭН в диапазоне 2000 м<sup>3</sup>/ч. Снятие стерегущего режима происходит при восстановлении уровня в ПГ до номинального значения. С помощью программной модели блока смоделировано изменение основных параметров (рис. 1) в переходном процессе, связанном с отключением одного ПЭН и невключении резервного на мощности 100%  $N_{ном}$ .

Перед отключением ПЭН-1 общий расход на напоре питательной воды был 7422 м<sup>3</sup>/ч. Расход на отключенном ПЭН снизился до нуля за семь секунд. Расходы ПЭН-2, 3, 4 увеличивались до 1953 – 2050 м<sup>3</sup>/ч на каждом ПЭН, причем время установившегося расхода не менее 2050 м<sup>3</sup>/ч на ПЭН-3 превышает уставку 90 с. В результате снижения мощности РУ расходы на напоре каждого ПЭН стабилизировались на уровне 1700 м<sup>3</sup>/ч. На 220-й секунде после увеличения уровня в ПГ-3 до номинального РУ ПГ перешли в режим поддержания уровня. Давление на напоре ПЭН не снижалось ниже 8,18 МПа. На основании работы программной модели блока был сделан вывод об увеличении времени выдержки до 300 с на отключение работающих ПЭН по расходу и давлению на их

напорах. Результаты, полученные на модели энергоблока, совпали с полученными результатами АО «ВНИИАЭС», что позволило внести изменения в алгоритмы и успешно провести динамические испытания.

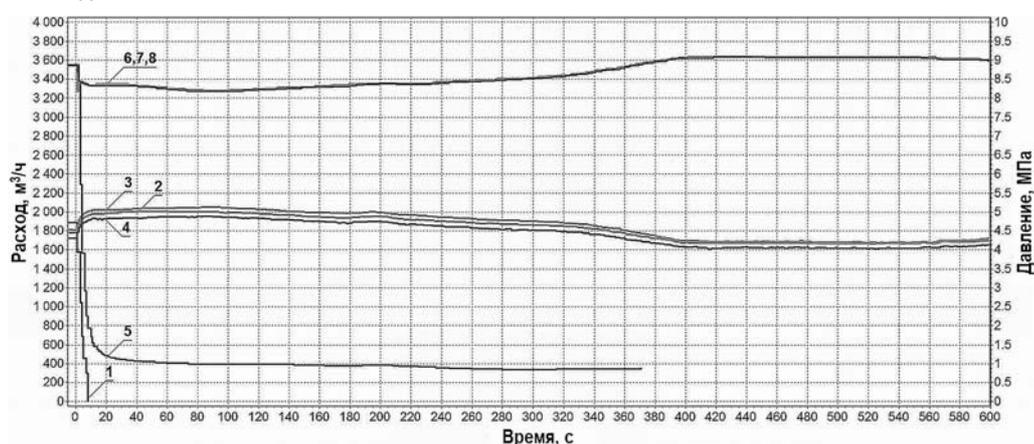


Рис. 1. Расходы и давление на напоре ПЭН в переходном процессе с отключением одного ПЭН и неключением резервного (1, 2, 3, 4 – расходы ПЭН-1, 2, 3, 4; 5, 6, 7, 8 – давление на напоре ПЭН-1, 2, 3, 4)

Одним из эффективных направлений повышения устойчивости и обеспечения «жизнестойкости» энергоблока АЭС является разработка способов разгрузки реактора при отключении основного оборудования первого и второго контуров.

Для анализа динамической устойчивости блока промоделированы режимы, связанные с отключением ПЭН и конденсатного электронасоса (КЭН).

В режиме отключения одного из работающих ПЭН и неключении резервного на мощности 100% возможно принципиально изменить разгрузку реактора, заменив работу регулятора ограничения мощности (РОМ) на срабатывание ускоренной предупредительной защиты (УПЗ). При применении УПЗ, небаланс между мощностью реактора и расходом питательной воды устраняется практически сразу, а основные регуляторы энергоблока, включая питательный узел парогенераторов (ПГ), дорабатывают вторичные возмущения от отключения ПЭН и срабатывания УПЗ.

Почти аналогичный процесс происходит при отключении КЭН, при этом остается длительный небаланс между мощностью реактора и мощностью второго контура, определяемой расходом конденсата в деаэратор.

Моделирование переходных процессов при отключении различных видов оборудования позволит принять оптимальные решения по изменению способов разгрузки блока, изменению уставок ТЗБ, выдержек времени по отключению оборудования.

#### Пример 2. Независимая проверка алгоритмов функционально-группового управления.

В ходе работ по вводу в эксплуатацию систем и оборудования пускового комплекса энергоблоков №1, №2 НВАЭС-2 проведена автономная наладка ФГУ. Комплексная наладка по ряду технологических причин проведена частично.

В режиме «Прогноз» модель энергоблока может быть использована для первичной проверки и корректировки проектных алгоритмов ФГУ либо формировании новых в результате их апробации. Для ввода ФГУ в эксплуатацию необходимо выполнить проверку работоспособности проектных алгоритмов управления и сигнализации при взаимодействии технологического оборудования. Также требуется актуализация настройки пороговых значений (уставок) технологических параметров, временных характеристик процессов, корректировка алгоритмов ФГУ и соответствующие изменения в ГЕТ-проекты. Данные возможности предоставляет программная модель блока.

В перспективе, проверенные в составе СИПО и при валидации ФГУ программные

инструменты позволяют перейти от функционально-группового управления отдельными подсистемами (ФГУ нижнего уровня) в изложенной ниже последовательности к функционально-групповому управлению энергоблоком в сложных режимах нормальной эксплуатации, таких как пуск (останов) энергоблока (ФГУ верхнего уровня).

**Этап 1.** Перед каждым этапом пуска блока на основе алгоритмов и реализованных интерактивных пошаговых процедур автоматически формируется описание ожидаемой последовательности управляющих действий оператора (проект сценария управления). Оператору предоставляются результаты прогноза развития технологического процесса, рассчитанные моделью энергоблока с возможностью корректировки. После подтверждения оператором проект сценария становится сценарием, по которому

- периодически выполняется прогноз, результаты которого предоставляются оператору;
- контролируются отклонения реального технологического процесса от спрогнозированного;
- на основании сценария управления и отклонений реального технологического процесса от спрогнозированного формируются рекомендации оператору по управлению;
- в интерактивных пошаговых процедурах на каждом шаге автоматически анализируется готовность оборудования к очередному управляющему действию, информация о готовности предоставляется оператору;
- управление выполняется оператором в дистанционном режиме с видеоканалом СВБУ.

**Этап 2.** На каждом шаге интерактивной процедуры после автоматического определения готовности к управляющему действию оператор разрешает это действие.

**Этап 3.** По отдельным шагам и (или) группам шагов право управления делегируется программе с выдержкой перед выдачей команды управления таймаута, в течение которого оператор может заблокировать команду. У оператора остается возможность полностью остановить программу ФГУ. По мере накопления опыта и доверия к автоматике количество автоматически выполняемых шагов будет увеличиваться, таймауты могут сокращаться.

**Пример 3.** При эксплуатации системы охлаждающей воды неответственных потребителей здания турбины блока №1 НВАЭС-2 выявлена проблема повышенной температуры охлаждающей воды (более 31°C) ежегодно в период с мая по сентябрь, что приводит к ускоренному загрязнению карбонатными отложениями теплообменных поверхностей и отводящих трубопроводов малого диаметра (Ду32 и менее). Для обеспечения требуемого температурного режима технологических систем и выполнения плана выработки электрической энергии необходимо включение в параллельную работу резервного оборудования, что увеличивает риск возникновения отклонений в работе блока или приводит к необходимости непланового снижения электрической нагрузки при его отключении. Температура подпиточной воды градирни в самый жаркий период года не превышает 25°C. Предлагается выполнить монтаж дополнительного трубопровода для подачи подпиточной воды с расходом до 1000 м<sup>3</sup>/ч непосредственно на всас двух насосов технической воды (НТВ), что уменьшит температуру охлаждающей воды за счёт смешения. С помощью программной модели выполнен расчёт изменения параметров охлаждающей воды после монтажа дополнительного трубопровода.

Для расчёта были заданы следующие параметры:

- расход охлаждающей воды к потребителям машзала 4800 м<sup>3</sup>/ч;
- температура охлаждающей воды 32,5°C;
- температура подпиточной воды 21,0°C;
- давление подпиточной воды 0,105 МПа (изб.).

Результаты расчёта максимальной пропускной способности трубопроводов различ-

ного диаметра и соответствующего снижения температуры воды приводятся в табл. 1.

Таблица 1

**Максимальная пропускная способность трубопроводов различных диаметров и соответствующего снижения температуры воды**

Диаметр трубопровода	Максимальный расход, м <sup>3</sup> /ч	Температура воды на напоре насосов, °С
Dy200	286	31,4
Dy300	783	30,3
Dy400	1578	28,4
Dy500	2701	25,8

Прокладка дополнительного наружного трубопровода подпиточной воды диаметром 500 мм на всас НТВ обеспечит приемлемую температуру охлаждающей воды неотвественных потребителей машзала в период пиковых температурных нагрузок.

**Пример 4.** В результате испытаний режимов работы продувки ПГ выявлена низкая эффективность регенеративного теплообменника (РТО) ПГ [17]. Температура охлаждаемой среды РТО продувки составляет 150 – 190°С при расходе продувочной воды 60 – 80 т/ч. Проектная температура за РТО – не более 100°С. Снижение температуры продувки ПГ до 57°С осуществляется за счёт доохладителя продувочной воды.

Работа РТО ПГ промоделирована с помощью использования программной модели блока. Выявлены наиболее вероятные причины неэффективности РТО:

- низкая скорость потока теплоносителя (0,63 и 0,34 м/с в трубном и межтрубном пространстве);
- проектная ошибка включения РТО в схему по обоим потокам. После проведения расчета с использованием программной модели блока на блоке №2 НВАЭС-2 выполнена реконструкция обвязки трубопроводов РТО (рис. 2).

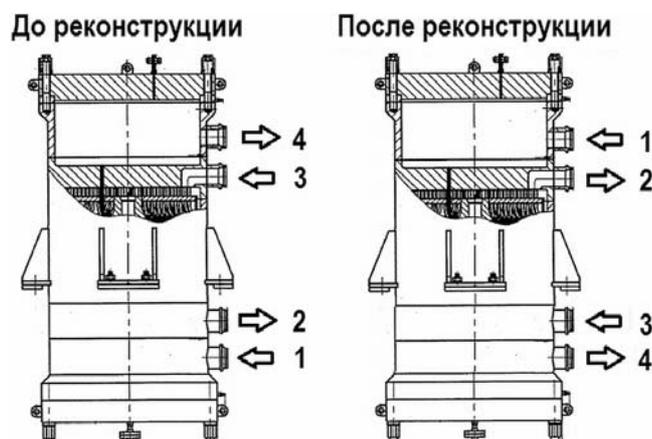


Рис. 2. Схема подключения РТО продувки ПГ до и после реконструкции: 1 – вход горячей воды из ПГ; 4 – выход охлажденной воды из ПГ на очистку; 3 – вход холодной воды после очистки; 2 – выход подогретой очищенной воды обратно в ПГ

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Приведен взгляд авторов на возможные дальнейшие этапы развития систем поддержки оператора на основе СИПО, реализация функций которой отрабатывается на энергоблоке №1 НВАЭС-2. Системообразующими компонентами МкСИПО являются программная модель энергоблока и интерактивные процедуры. Внедрение СИПО на действующих и строящихся энергоблоках нового поколения позволит устранить информационную

перегрузку операторов и создаст условия для поэтапного повышения уровня автоматизации.

Показано, что программная модель блока в составе СИПО может быть использована для

- анализа динамической устойчивости блока при моделировании режимов, связанных с отключением оборудования, способов разгрузки РУ с последующей актуализацией настроек пороговых значений (уставок) технологических параметров, временных характеристик процессов;
- оптимизации тепловой схемы технологических систем;
- модернизации схем обвязки оборудования;
- повышения эффективности теплообменного оборудования путем проведения вариантных расчетов и выбора его оптимальной конструкции;
- корректировки существующих и разработки новых алгоритмов ФГУ.

### **Литература**

1. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2007. – С. 67.
2. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2015. – С. 28, 33.
3. РБ-152-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП 001 15). – М.: Ростехнадзор, 2018. – С. 197.
4. ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Атомные станции. Пункты управления. Проектирование. – М.: Стандартиформ, 2014. – С. 4, 21.
5. Ст. МЭК 60960-1988. Принципы проектирования системы отображения параметров безопасности атомных электростанций. – М.: Стандартиформ, 2000.
6. ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Пункты управления. Проектирование. Атомные станции. – М.: Стандартиформ, 2014. – С. 21.
7. ГОСТ Р МЭК 62241-2012. Атомные станции. Блочный пункт управления. Функции и представление сигнализации. – М.: Стандартиформ, 2014. – С. 12.
8. Бютнер В.Э. Использование операторами АЭС ФРГ усовершенствованных вспомогательных систем на базе ЭВМ. // Бюллетень МАГАТЭ. – Осень 1985. – С. 15-20.
9. Анохин Ф.Н., Калинушкин А.Е., Горбаев В.А., Сивоконь В.П. Состояние и перспективы систем поддержки операторов АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 5-16; DOI: <https://doi.org/10.26583/nre.2016.2.01>.
10. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 216 с.
11. Палагин А.А., Ефимов А.В. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. – К.: Наукова думка, 1986. – 132 с.
12. Лаврентичев Д.В., Тверской Ю.С. Математическая модель первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 и оценка ее динамической точности в переменных режимах. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 6. – С. 1-12.
13. Жукавин А.П., Лебедев А.О. Использование математических моделей энергоблока для тестирования алгоритмов систем управления АЭС «Куданкулам». // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 37-40.
14. Жукавин А.П., Крошилин А.Е., Фукс Р.Л. Разработка и особенности верификации тренажерных моделей АЭС. // Теплоэнергетика. – 2010. – № 5. – С. 34-38.
15. Kothe Doug. CASL and the virtual reactor. // Nuclear News. – 2011. – No. 3. – PP. 88-90.
16. Larzelere A.R. Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation (NEAMS). Электронный ресурс: <http://science.energy.gov/media/ascr/ascac/pdf/meetings/nov09/Larzelere.pdf> (дата доступа 05.07.2020).

17. *Аркадов Г.В., Жукавин А.П., Крошилин А.Е., Паршиков И.А., Соловьев С.Л., Шишов А.В.* Виртуально-цифровая АЭС – современный инструмент поддержки жизненного цикла атомных энергоблоков с ВВЭР. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 10. – С. 3-11.

Поступила в редакцию 10.07.2020 г.

#### **Авторы**

Стацура Дмитрий Борисович, заместитель главного инженера по модернизации  
E-mail: StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Тучков Максим Юрьевич, старший начальник смены 4-очереди  
E-mail: TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поваров Петр Владимирович, начальник смены блока,  
E-mail: PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Тихонов Александр Игоревич, начальник смены блока  
E-mail: TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Падун Сергей Петрович, главный конструктор по математическому и программному обеспечению  
E-mail: padun@atomar.net.ru

Воробьев Александр Павлович, начальник отдела  
E-mail: alex@sniip-atom.ru

Майорова Маргарита Михайловна, начальник отдела  
E-mail: Mayorova@sniip-atom.ru

UDC 621.039.4

## **USING THE UNIT SIMULATION MODEL TO IMPROVE DESIGN SOLUTIONS AND OPTIMIZE PROCESS MANAGEMENT**

Statsura D.B.\*, Tuchkov M.Yu.\*, Povarov P.V.\*, Tikhonov A.I.\*,  
Padun S.P.\*\*, Vorobyov A.P.\*\*, Mayorova M.M.\*\*

\* Branch of «Concern Rosenergoatom», Novovoronezh Nuclear Power Plant  
1 Industrial zone Yuzhnnaya, 1396072 Novovoronezh, Voronezh Reg., Russia

\*\* Innovative Company SNIIPATOM, Joint-Stock Company  
5, bld. 1, block 135 Raspletina Str, 123060 Moscow, Russia

### **ABSTRACT**

Advanced design power units are distinguished by a high degree of digital transformation. Therefore, the Operator Information Support System (OISS) is of particular interest, since it can reduce the workload on operating personnel as well as predict possible deviations long before they evolve into severe accidents.

The article analyzes the current standard process documentation that requires solutions to support the operator and determines the list of system functions that should be provided to improve the safety level of nuclear power plants.

A brief overview of the world experience in implementing such solutions is also provided. As an example of the further development of operator support system, the authors consider the operator information support system (OISS), which is being developed at the NvNPP pilot unit with the VVER-1200 reactor. The OISS functions will

make it possible to fulfill the requirements of standard process documentation that are currently not implemented in the power unit design.

The key features of the OISS under development are step-by-step interactive procedures and the unit simulation model. The article provides a brief description of the power unit simulated model and considers several examples of its practical application as part of the OISS to improve design solutions and optimize automatic process control. Further implementation of the OISS is proposed at power units under construction in order to reduce the information overload of operators and create conditions for a step-by-step increase in the automation level of the power unit control.

**Key words:** OISS, technological process, interactive procedure, power unit model, decision making, monitoring, design solutions, optimization, I&C, algorithms.

#### REFERENCES

1. NP-082-07. *Nuclear safety regulations for NPP reactor*. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2007, 67 p. (in Russian).
2. NP-001-15. *General safety regulations for Nuclear Power Plants*. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2015, pp. 28, 33 (in Russian).
3. RB-152-18. *Safety guide in the area of atomic energy use. Comments to federal norms and rules «General provisions for nuclear power plants safety assurance» (NP 001 15)*. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2018, 197 p. (in Russian).
4. GOST R IEC 60964-2012. *Nuclear power plants. Control rooms. Designing*. Moscow. Standartinform Publ., 2014, pp. 4, 21 (in Russian).
5. IEA 60960-1988. *Principles for designing nuclear power plant's safety parameters display systems*. Moscow. Standartinform Publ., 2000 (in Russian).
6. GOST R IEC 60964-2012. *Control Rooms. Design. Nuclear Power Plants*. Moscow. Standartinform Publ., 2014, p. 21 (in Russian).
7. GOST R IEC 62241-2012. *Nuclear Power Plants. Main Control Room. Functions and alarms display*. Moscow. Standartinform Publ., 2014, p. 12 (in Russian).
8. Butner V.E. Use by FRG NPP operators of enhanced computer based auxiliary systems. *Byulleten' MAGATE*, autumn 1985, pp. 15-20 (in Russian).
9. Anokhin F.N., Kalinushkin A.E., Gorbaev V.A., Sivokon V.P. Status and challenges of NPP operators support systems. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 5-16; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.2.01> (in Russian).
10. Bashlykov A.A., Ereemeev A.P. *Expert Support Systems for Decision Making in Nuclear Power Engineering*. Moscow. MEI Publ., 1994, 216 p. (in Russian).
11. Palagin A.A., Efimov A.V. *Simulation Experiment using Mathematical Models of Turbine Sets*. Kiev. Naukova Dumka Publ., 1986, 132 p. (in Russian).
12. Lavrentichev D.V., Tverskoy Yu.S. Mathematical model of VVER-1000 NPP primary circuit and assessment of dynamic accuracy during variable modes. *Vestnik IGEU*. 2015, iss. 6, pp. 1-12 (in Russian).
13. Zhuravkin A.P., Lebedev A.O. Application of power units mathematical models for testing of Kudankulam NPP control system. *Teploenergetika*. 2011, no. 5, pp. 37-40 (in Russian).
14. Zhuravkin A.P., Kroshilin A.E., Fuks R.L. Development and peculiarities of NPP simulator models verification. *Teploenergetika*. 2010, no. 5, pp. 34-38 (in Russian).
15. Kothe Doug. CASL and the virtual reactor. *Nuclear News*. 2011, no. 3, pp. 88-90.
16. Larzelere A.R. Nuclear energy advanced modeling and simulation (NEAMS). Available at: <http://science.energy.gov//media/ascr/ascac/pdf/meetings/nov09/Larzelere.pdf> (accessed Jul 05, 2020).
17. Arkadov G.V., Zhuravin A.P., Kroshilin A.E., Parshikov I.A., Soloviev S.L., Shishov A.V. Virtual digital NPP – modern tool for VVER type NPP life cycles support. *Teploenergetika*. 2014, no. 10, pp. 3-11 (in Russian).

**Authors**

Statsura Dmitry Borisovich, Deputy Chief Engineer for Modernization

E-mail: StatsuraDB@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Tuchkov Maksim Yuryevich, Senior Unit Shift Supervisor – Phase 4

E-mail: TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Povarov Pyotr Vladimirovich, Unit Shift Supervisor

E-mail: PovarovPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Tikhonov Aleksandr Igorevich, Unit Shift Supervisor

E-mail: TihonovAI@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Padun Sergey Petrovich, Chief Designer for Mathematical Tool and Software

E-mail: padun@atomar.net.ru

Vorobyov Aleksandr Pavlovich, Head of Department

E-mail: alex@sniip-atom.ru

Mayorova Margarita Mikhaylovna, Head of Department

E-mail: Mayorova@sniip-atom.ru