


# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25:621.039.5  
DOI 10.26583/gns-2023-02-07  
EDN BHYMCF

## Входные данные для согласования состояний модели и прототипа АЭС с ВВЭР

И.А. Молев , Д.А. Соловьёв  , А.Л. Лобарев , Д.А. Плотников ,  
Х.А. Танаш , Е.В. Чернов 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
 vulture@inbox.ru


**Аннотация.** В статье рассмотрены некоторые возможные входные данные модели энергоблока АЭС для решения задачи согласования состояния модели с состоянием прототипа. Важнейшим параметром, используемым для согласования состояний, является тепловая мощность реакторной установки (РУ). Были рассмотрены способы точной установки мощности РУ в модели, а именно, использование автоматического регулятора мощности (АРМ) и математического борного регулятора. В ходе работ по согласованию состояния модели АЭС с прототипом был проведен численный эксперимент с использованием полномасштабного моделирующего комплекса «ПРОСТОР». Суть его заключалась в получении стационарных состояний модели с мощностью от 94% до 104% с шагом 0,05%. Для моделирования использовались данные 3 загрузки 4 блока Калининский АЭС на 248 эффективные сутки. При анализе результатов численного эксперимента были обнаружены два эффекта. Один из них, выраженный в изломе производной полученного графика зависимости давления в ПГ от мощности, связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК. Исполнительным механизмом регулятора давления в ГПК являются регулирующие клапаны на турбогенераторе. В момент излома графика они открываются на 100%, чем обуславливается дальнейшая невозможность регулирования давления. Давление в ГПК начинает расти. Этот эффект соответствует реальным процессам, происходящим на АЭС. При этом в качестве одного из параметров настройки модели предлагается использовать адаптивный коэффициент к концентрации борной кислоты в реакторе, для управления которым предлагается использовать математический борный регулятор. Вторым эффектом является невозможность точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. В связи с этим предложено использовать дополнительный математический регулятор управления ТЭН КД для согласования состояния модели с прототипом. Данные регуляторы успешно опробованы в составе программного комплекса «ПРОСТОР» для согласования мощности РУ модели и прототипа.

**Ключевые слова:** борный регулятор, регулятор давления, реактор, ВВЭР, ПРОСТОР, ТЭН КД, прототип.

**Для цитирования:** Молев И.А., Соловьёв Д.А., Лобарев А.Л., Плотников Д.А., Танаш Х.А., Чернов Е.В. Входные данные для согласования состояний модели и прототипа АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):57–65. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-07>

## Input data to match model and prototype states of WWER NPP

Ilya A. Molev , Denis A. Solovyev  , Alexey L. Lobarev , Denis A. Plotnikov ,  
Hamza A. Tahash , Evgeniy V. Chernov 

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia  
 vulture@inbox.ru

**Abstract.** The paper considers some possible input data of NPP power unit model for solving the problem of model state matching with prototype state. In the course of work on matching the state of NPP model with the prototype, a numerical experiment using full-scale modeling complex PROSTOR was conducted. Its essence was to obtain steady states of the model with capacity from 94% to 104% with a step of 0,05%. For modeling we used data of Kalinin NPP unit 3 loading 4 on 248 effective days. When analyzing the results of the numerical experiment, two effects were found. One of them, expressed in the bend of the derivative of the obtained graph,

is connected with reaching the upper limit of the possibility to regulate the pressure in the main steam collector. The regulating valves on the turbine generator are the executing mechanism of pressure regulator in main steam collector. At the break of the graph they open at 100%, which causes further inability to regulate pressure. The pressure in the main steam collector starts to increase. This effect corresponds to the real processes occurring at the NPP. In this case, as one of the model tuning parameters, it is proposed to use the adaptive coefficient to the concentration of boric acid in the reactor, for the control of which, it is proposed to use a mathematical boric regulator. It was also shown that it is impossible to accurately control the pressure in the reactor due to the peculiarities of operation of the volume compensator electric heaters automatics. In this regard, it was proposed to use an additional mathematical volume compensator electric heaters regulator to match the state of the model with the prototype. These regulators have been successfully tested as part of the PROSTOR software package to match the states of the model and the prototype.

**Keywords:** boron regulator, pressure regulator, reactor, VVER, PROSTOR, volume compensator electric heaters, prototype.

**For citation:** Molev I.A., Solovyev D.A., Lobarev A.L., Plotnikov D.A., Tahash H.A., Chernov E.V. Input Data to Match Model and Prototype States of WWER NPP. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):57-65 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-07>

## Введение

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием моделирующих комплексов АЭС и постоянным повышением их точности описания реальных процессов, возникают новые пути использования таких комплексов [1]. Так, например, актуальной на сегодня задачей является создание цифрового двойника АЭС, т.е. виртуальной копии АЭС<sup>1</sup>.

Для создания такой копии необходимо решить задачу приведения состояния модели АЭС к состоянию самого энергоблока [2, 3].

Для решения этой задачи мы можем представить модель реакторной установки (РУ) в виде вектор-функции, выражение (1) [4]:

$$\vec{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_n, p_1, p_2, \dots, p_m), \quad (1)$$

где  $\vec{y}$  – вектор всех расчетных значений модели;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры настройки модели или адаптивные коэффициенты модели;

$p_1, \dots, p_m$  – входные данные модели.

Отметим отличие между параметрами или адаптивными коэффициентами модели и входными данными модели. Первые являются свойствами энергоблока или, вернее, оборудования РУ и не должны меняться в течении одной кампании. Например, это гидравлическое сопротивление на выходе из парогенераторов. Вторые являются граничными условиями модели и существуют для приведения состояния модели к текущему состоянию энергоблока. Ясно, что они меняются в течение кампании. Например, для рассматриваемой модели – давление пара в главном паровом коллекторе (ГПК).

Вектор всех расчетных значений модели  $\vec{y}$  в общем случае может иметь большую размерность, но для нашей задачи мы можем ограничить его размерность только измеряемыми экспериментально параметрами: температура, давление и др.

Задачу приведения модели к состоянию энергоблока можно сформулировать как задачу минимизации отклонения данной функции ( $\vec{y}$ ) от экспериментальных данных ( $\vec{y}_{экп}$ ), нормированных на погрешности данных ( $\Delta\vec{y}$ ), выражение (2):

$$\frac{\vec{y} - \vec{y}_{экп}}{\Delta\vec{y}} \rightarrow \min. \quad (2)$$

<sup>1</sup> Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» ИБРАЭ РАН; 2020. URL: <http://ibrae.ac.ru/contents/362/>

### **Параметры управления энергоблоком**

Для управления АЭС используются регуляторы, в первую очередь, это автоматический регулятор мощности (АРМ) и электронная часть системы регулирования турбины (ЭЧСР).

АРМ на АЭС с ВВЭР предназначен для регулирования мощности реактора в следующих наиболее используемых режимах:

- поддержание постоянного значения плотности нейтронного потока (режим «Н»);
- поддержание постоянного давления пара в ГПК (режим «Т»).

Также существуют другие редко используемые режимы работы АРМ, не рассматриваемые в данной статье.

Конечным исполняющим механизмом АРМ является система управления и защиты (СУЗ) РУ.

ЭЧСР в стационарных состояниях блока также имеет несколько режимов работы:

–режим регулирования мощности (РМ). При работе ЭЧСР в режиме РМ, осуществляется регулирование электрической нагрузки генератора в соответствии с установленным заданием. Режим РМ включается, если АРМ реактора находится в режиме «Т»;

–режим регулирования номинального давления свежего пара (РД). При работе ЭЧСР в режиме РД регулятор поддерживает номинальное давление пара перед турбиной. Режим РД включается при работе АРМ реактора не в режиме «Т»;

–режим регулирования минимального давления свежего пара (РДмин). ЭЧСР переходит в режим РДмин автоматически в случае недопустимого снижения давления свежего пара в ГПК.

Конечным исполняющим механизмом ЭЧСР являются регулирующие клапаны турбогенератора.

При работе в стационарном режиме на разных энергоблоках могут использоваться как сочетания ЭЧСР в режиме РМ и АРМ в режиме «Т», так и ЭЧСР в режиме РД и АРМ в режиме «Н».

### **Установка и согласование мощностей модели и реального реактора**

Первым параметром, обращающем на себя внимание при решении задачи восстановления состояния энергоблока, является тепловая мощность реактора.

Полномасштабные моделирующие комплексы имеют в своем составе подсистемы автоматики энергоблока, в которых полностью моделируются вышеописанные регуляторы. То есть существует возможность восстановления состояния реактора через использование модельных аналогов автоматики энергоблока.

Но для решения задач восстановления состояния АЭС в модели важна скорость расчета, которую не может обеспечить вышеописанный стационарный режим работы регуляторов реакторной установки из-за большого времени задержки между возмущением, вносимым конечным исполняющим механизмом регулятора, и изменением измеряемых параметров. Задержка обусловлена инерционностью физических процессов, протекающих на РУ, и связанных с ней систем. При работе АРМ в режиме «Т» измеряемым параметром является давление в ГПК, а исполняющим механизмом являются стержни СУЗ, находящиеся в активной зоне реактора.

С другой стороны, в идеальных условиях при достоверном знании положения органов регулирования (ОР) СУЗ, концентрации борной кислоты, выгорания каждой ТВС, распределения температур и закрутки потока теплоносителя в активной зоне (АЗ) возможно полное моделирование режима работы АРМ и соответственно согласование модельных данных с реальными. Но известные данные не полны и определяются с погрешностями, а некоторые процессы, происходящие в АЗ (такие как закрутка потока теплоносителя [5, 6]), до сих пор мало изучены. В связи с этим для согласования

мощности РУ в модели с реальной необходимо вводить инженерные коэффициенты, учитывающие вышеописанные погрешности и особенности.

Для согласования и приведения мощности, получаемой по модели реактора, к реальной мощности удобно один из таких коэффициентов ввести как множитель к концентрации борной кислоты в реакторе. Но при его скачкообразном изменении при настройке модели и, соответственно, таком же изменении концентрации бора в реакторе скачкообразно изменится реактивность, что приведет к нежелательным физическим эффектам и в том числе реакции на них автоматики АЭС. Чтобы такого скачка мощности не происходило, для быстрой установки состояния модели предлагается использовать математический борный регулятор.

Параметром, подаваемым на вход, математического борного регулятора является тепловая мощность реактора, выходным же или исполняющим механизмом является концентрация борной кислоты во всех узлах модели реактора. Таким образом, математический борный регулятор при задаче поддержания мощности является аналогом АРМ в режиме «Н».

При этом алгоритм работы АРМ был оставлен без изменений, разница между моделируемым АРМ и математическим борным регулятором лишь в конечном исполнительном механизме, т.е. в стержнях СУЗ и концентрации борной кислоты в реакторе соответственно.

### Динамика давления 1-го контура

Для исследования возможности приведения состояния модели АЭС к заданной мощности был проведен численный эксперимент с использованием полномасштабного моделирующего комплекса «ПРОСТОР» [7,8]. Суть его заключалась в получении стационарных состояний модели с мощностью от 94% до 104% с шагом 0,05%. Для моделирования использовались данные 3-й загрузки 4-го блока Калининский АЭС на 248-е эффективные сутки. Приведение к заданной мощности осуществлялось с помощью алгоритмов работы АРМ в режиме «Н», но вместо стержней СУЗ был использован математический борный регулятор, ЭЧСР работал в режиме «РД».

Частичные результаты эксперимента представлены на рисунке 1. Целью эксперимента являлась рассмотрение возможности установки мощности РУ с минимальным отклонением от заданной.

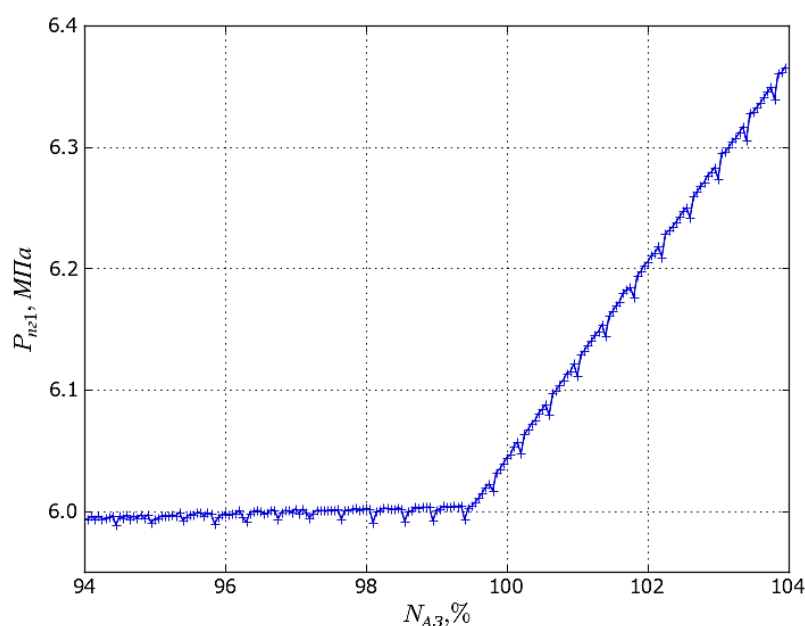


Рисунок 1. Зависимость давления на выходе ПГ-1 от задаваемой мощности  
Figure 1. Dependence of the pressure at the SG-1 outlet on the given power

При исследовании результатов численного эксперимента были обнаружены два эффекта. Один из них, выраженный в изломе производной графика, связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК. Исполняющим механизмом регулятора давления в ГПК являются регулирующие клапаны на турбогенераторе. В момент излома графика они открываются на 100%, чем обуславливается дальнейшая невозможность регулирования давления. Давление в ГПК начинает расти, что и показано на рисунке 2. Этот эффект соответствует реальным процессам, происходящим на АЭС.

Второй эффект, связанный с регулярным небольшим падением давления, определяется алгоритмом работы трубчатых электронагревателей компенсатора давления (ТЭН КД). При равномерном повышении мощности с последующим выходом в стационарное состояние давление в реакторе будет повышаться. При достижении давления 15,75 МПа срабатывает автоматическое отключение всех ТЭН КД, которые включаются только при понижении давления. В этот момент для получения стационарного состояния модель ожидает понижения давления при выключенном ТЭН КД. Изменение давления в реакторе при работе ТЭН КД показано на рисунке 2.

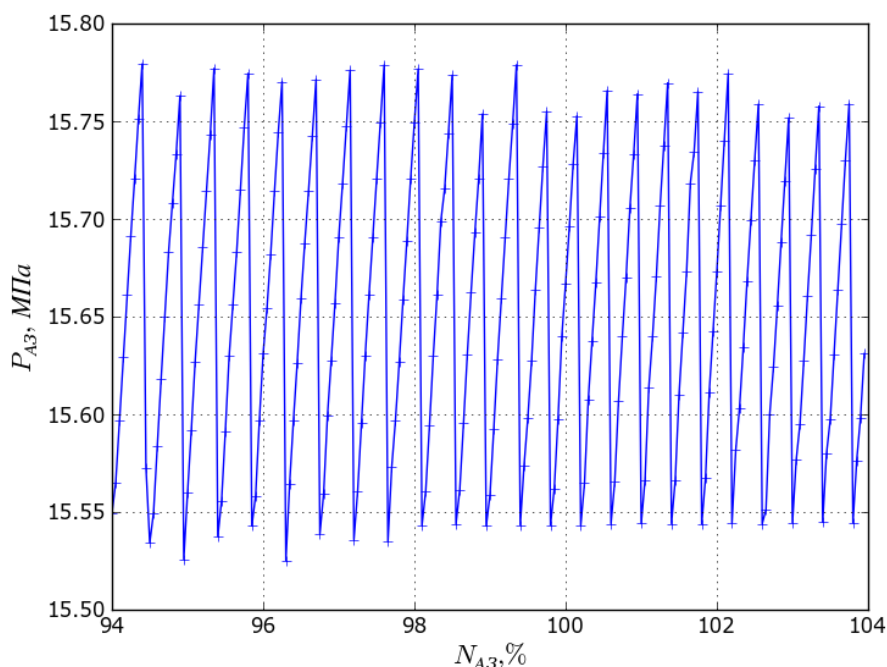


Рисунок 2. Зависимость расчетного давления в реакторе от уровня задаваемой мощности через АРМ  
Figure 2. Dependence of the simulated pressure in the reactor on the level of the set power through the automatic power controller

Можно определить четкие границы изменения давления в реакторе, которые соответствуют уставкам включения и отключения 1-й группы ТЭН КД. Регулярное колебание мощности и других параметров обусловлено именно этими колебаниями давления в реакторе.

Данный эффект также соответствует реальным процессам, происходящим в РУ, и на основании представленных данных можно сделать вывод о невозможности точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. Но так как для восстановления состояния энергоблока в модели необходимо точно согласовывать модельное и реальное давление 1-го контура, то требуется дополнительный алгоритм установления давления в модели реактора.

Одним из простых решений такого алгоритма видится в более чувствительном управлении ТЭН КД. Возможно, модельно изменять уставки включения и выключения 1-ой группы ТЭН КД для получения нужного давления в модели реактора. Так с

изменением в модели уставки регуляторов работы ТЭН КД в процессе получения состояния аналогичного состоянию РУ, данные регуляторы приведут в соответствие стационарному давлению в 1-м контуре. Блок-схема одного из возможных регуляторов, решающих эту задачу приведена на рисунке 3.

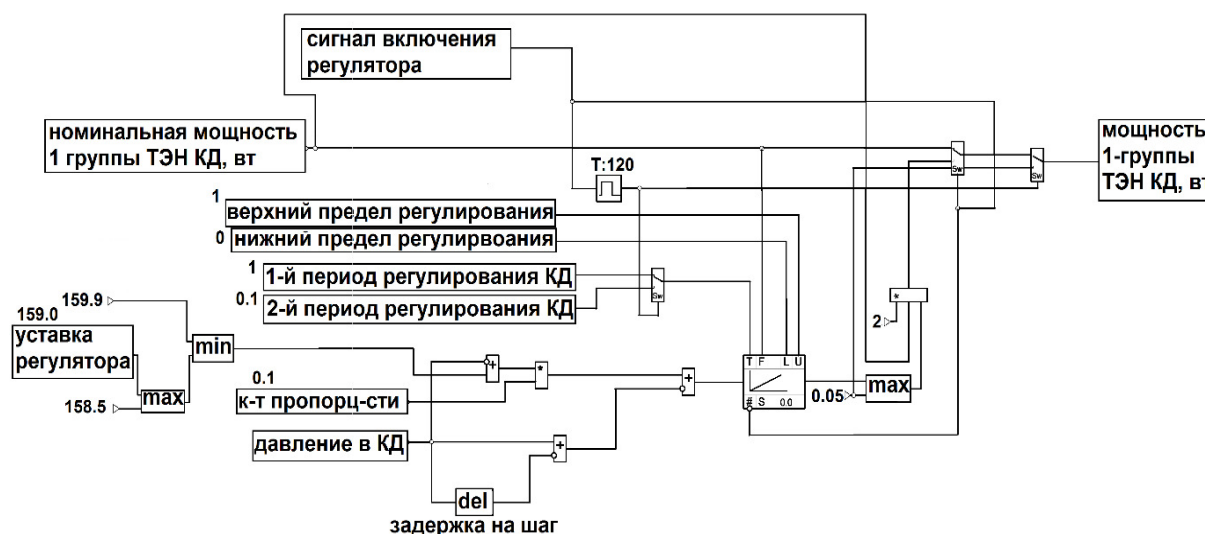


Рисунок 3. Блок-схема математического регулятора управления ТЭН КД

Figure 3. Block diagram of the mathematical controller for the control of the pressurizer heater

Рассмотрим подробнее пример по моделированию изменения давления в реакторе при работе математического регулятора ТЭН КД и сравним полученные результаты с результатами, полученными путем моделирования давления в реакторе без работы этого регулятора. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

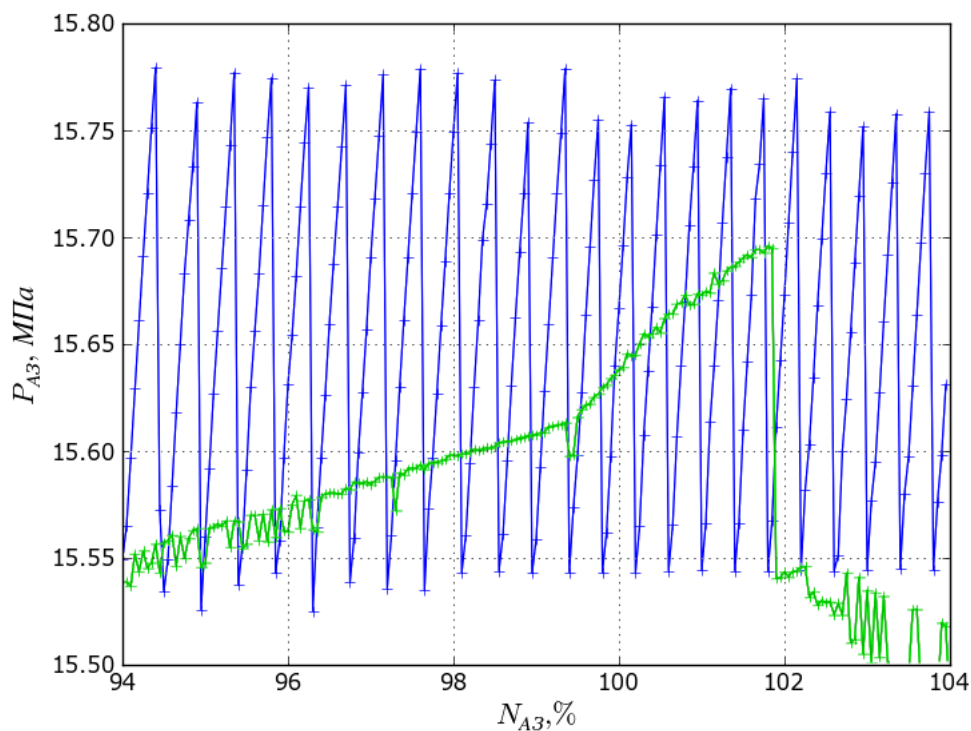


Рисунок 4. Зависимость расчетного давления в реакторе от уровня задаваемой мощности через АРМ при работе математического регулятора ТЭН КД (зеленый) и без работы этого регулятора (синий)  
Figure 4. Dependence of the model pressure in the reactor on the level of the set power through the automatic power controller during the operation of the mathematical controller of the pressurizer heater (green) and without the operation of this controller (blue)

В ходе данного эксперимента уставка математического регулятора ТЭН КД повышалась вместе с уровнем мощности в АЗ, что объясняет положительную производную зеленого графика до 102% мощности. После 102% при достижении давления 15,7 МПа в АЗ сработало импульсно-предохранительное устройство (ИПУ) компенсатора давления, понизившее давление и нарушившее режим работы регулятора.

Также легко видеть из графика, что погрешность установки давления в КД регулятором составляет менее 0,02 МПа.

Излом производной приблизительно при 99,5% мощности связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК 2-го контура. Этот эффект описывался выше в комментариях к рисунку 1.

График зависимости давления во втором контуре от задаваемой мощности при работе регулятора ТЭН КД представлен на рисунке 5.

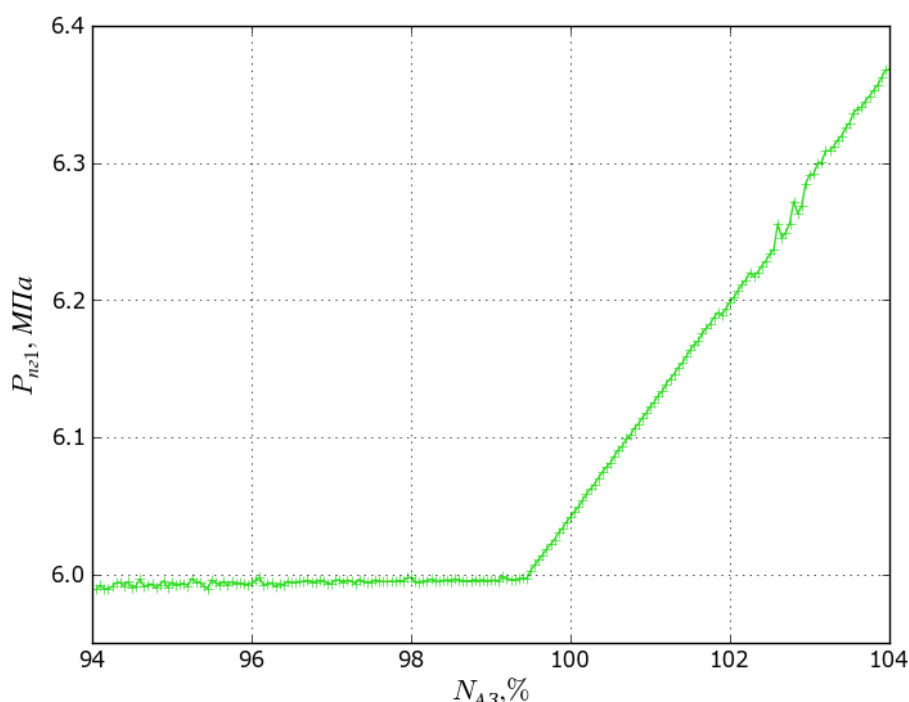


Рисунок 5. Зависимость давления на выходе ПГ-1 от задаваемой мощности через АРМ при работе математического регулятора ТЭН КД

Figure 5. Dependence of the pressure at the outlet of the SG-1 on the set power through the automatic power controller during the operation of the mathematical controller of the pressurizer heater

Сравнив этот график с рисунком 1 легко также обнаружить уменьшение погрешности задаваемого давления, вызванной работой ТЭН КД.

Подчеркнем, что применение данного математического регулятора ТЭН КД, возможно только для получения начального состояния модели РУ аналогичного реальному. Для моделирования динамических процессов этот регулятор использоваться не может. Но при соответствии в начальном состоянии давления в КД модели экспериментально измеряемому, полученному с помощью вышеописанного способа, и известном состоянии работы ТЭН КД легко привести в соответствие процесс в модели реальному процессу РУ.

### Заключение

В статье рассмотрены некоторые возможные входные данные модели энергоблока АЭС для решения задачи согласования состояния модели с состоянием прототипа.



В качестве одного из параметров настройки модели предлагается использовать адаптивный коэффициент к концентрации борной кислоты в реакторе, для управления которым, предлагается использовать математический борный регулятор.

Также была показана невозможность точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. В связи с этим предложено использовать дополнительный математический регулятор управления ТЭН КД для согласования состояния модели с прототипом.

Данные регуляторы успешно опробованы в составе программного комплекса «ПРОСТОР» для согласования состояний модели и прототипа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Паппе И.Н., В.С. Володин Применение математических моделей на различных стадиях жизненного цикла российских АСУ ТП АЭС. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP : материалы II Международной научно-технической конференции, Минск, 27-28 апреля 2021 года*. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; 2021. С. 182–188.
2. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». *Атомная энергия*. 2008;4(4):237–240.
3. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Настройка модели на текущее состояние реактора. *Атомная энергия*. 1996;80(6):482–485.
4. Выговский С.Б., Молев И.А. Страшных В.П. и др. Вариационная методика расчета теплового баланса РУ с ВВЭР-1000 с использованием данных АЭС и программного комплекса «ПРОСТОР». *Ядерные измерительно-информационные технологии*. 2009;30(2):13.
5. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование факторов, определяющих температурную стратификацию теплоносителя в горячих нитках петель 1-го контура РУ с ВВЭР-1000. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, 28-31 мая 2013*. Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2013. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article133-ru.htm>
6. Бай В.Ф., Богачек Л.Н., Макаров С.В. Влияние режимов работы ПВД на температурные поля на входе в ТВС активной зоны и ТФХ активной зоны и ТФХ РУ ВВЭР-1000 Калининской АЭС. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции, 19-22 мая 2015*. Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2015. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article41-ru.htm> (дата обращения: 11.01.2023)
7. Выговский С.Б., Чернов Е.В., Семенов А.А., Страшных В.П., Чернаков В.А., Лупишко А.Н., Богачек Л.Н., Бай В.Ф., Чапаев В.М. Опыт использования программного комплекса ПРОСТОР в расчетной поддержке эксплуатации Калининской АЭС и перспективы его дальнейшего применения на АЭС с ВВЭР-1000. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, 28-31 мая 2013*. Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2013. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/documents/mntk2013-125.pdf> (дата обращения: 21.01.2023)
8. Семенов А.А., Выговский С.Б., Чернаков В.А., Щукин Н.В. Опыт использования программного комплекса ПРОСТОР и перспективы его дальнейшего применения. В кн.: *Сборник трудов научной сессии МИФИ – 2004. Физико-технические проблемы нетрадиционной энергетики. Физико-технические проблемы ядерной энергетики*. 2004;(8):79–80. URL: <http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2004/8/079.pdf> (дата обращения: 21.01.2023)

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**И.А. Молев**, 20% – разработка методики приведения состояния модели реактора к состоянию прототипа, работа с экспериментальными данными, выбор переменных для исследования;  
**Д.А. Соловьёв**, 20% – проведение модельного эксперимента с ТЭН КД при разных уровнях мощности;  
**А.Л. Лобарев**, 15% – исследование изменения давления в реакторе в описываемых экспериментах;  
**Д.А. Плотников**, 15% – создание математического регулятора управления ТЭН КД;  
**Х.А. Танах**, 15% – исследование работы регулятора ГПК в приводимых экспериментах;

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Molev I.A.**, 20% – development of a methodology for bringing the state of a reactor model to the state of a prototype, working with experimental data, choosing variables for research;  
**Solovyov D.A.**, 20% – conducting a model experiment with a KD heating element at different power levels;  
**Lobarev A.L.**, 15% – study of pressure changes in the reactor in the described experiments;  
**Plotnikov D.A.**, 15% – creation of a mathematical controller for the control of the pressurizer hrater;  
**Tanash H.A.**, 15% – study of the operation of the CHP regulator in the experiments presented;



**Е.В. Чернов**, 15% – создание математического борного регулятора и методики его использования.

#### БЛАГОДАРНОСТИ:

Авторы благодарят С.Б. Выговского за многолетнее наставничество и развитие области моделей атомных электростанций.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Отсутствуют.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Илья Александрович Молев**, ведущий инженер, ИЯФит НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7247-3040> ; e-mail: [iamolev@gmail.com](mailto:iamolev@gmail.com)

**Денис Алексеевич Соловьёв**, к.т.н., доцент ИЯФит, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0507-0839> ; e-mail: [vulture@inbox.ru](mailto:vulture@inbox.ru)

**Алексей Леонидович Лобарев**, аспирант ИЯФит, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5258-3357> ; e-mail: [lobarev.alexey@gmail.com](mailto:lobarev.alexey@gmail.com)

**Денис Алексеевич Плотников**, аспирант ИЯФит, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9387-170X> ; e-mail: [pda1995@gmail.com](mailto:pda1995@gmail.com)

**Хамза Ахмад Танах**, аспирант ИЯФит, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7831-8516> ; e-mail: [tanash\\_hamza@yahoo.com](mailto:tanash_hamza@yahoo.com)

**Евгений Владимирович Чернов**, старший преподаватель ИЯФит, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2818-6324> ; e-mail: [chernov.e@inbox.ru](mailto:chernov.e@inbox.ru)

Поступила в редакцию 13.02.2023

После доработки 28.04.2023

Принята к публикации 04.05.2023

**Chernov E.V.**, 15% – creation of a mathematical boron controller and methods of its use.

#### ACKNOWLEDGMENTS:

The authors thank S.B. Vygovsky for many years of mentoring and development of the field of nuclear power plant models.

#### FUNDING:

Absent.

#### CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no conflict of interest.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Ilya A. Molev**, Lead Engineer, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI» Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7247-3040> ; e-mail: [iamolev@gmail.com](mailto:iamolev@gmail.com)

**Denis A. Solovyev**, PhD, Assistant Professor, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0507-0839> ; e-mail: [vulture@inbox.ru](mailto:vulture@inbox.ru)

**Alexey L. Lobarev**, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5258-3357> ; e-mail: [lobarev.alexey@gmail.com](mailto:lobarev.alexey@gmail.com)

**Denis A. Plotnikov**, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9387-170X> ; e-mail: [pda1995@gmail.com](mailto:pda1995@gmail.com)

**Hamza A. Tahash**, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7831-8516> ; e-mail: [tanash\\_hamza@yahoo.com](mailto:tanash_hamza@yahoo.com)

**Evgeniy V. Chernov**, Senior Lecture, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2818-6324> ; e-mail: [chernov.e@inbox.ru](mailto:chernov.e@inbox.ru)

Received 13.02.2023

Revision 28.04.2023

Accepted 04.05.2023