

# ГИБКИЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС: КОМПЕНСАТОР ДАВЛЕНИЯ

**Жарко Е.Ф.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*  
zharko@ipu.ru

*Аннотация. В статье представлены математическая модель компенсатора давления, входящая в состав гибкого моделирующего комплекса (ГМК). Проведены результаты верификации представленной модели компенсатора давления в составе ГМК на динамическом режиме энергоблока АЭС.*

*Ключевые слова: гибкий моделирующий комплекс, компенсатор давления, АЭС, верификация.*

## **Введение**

Процесс развития систем управления энергоблоками АЭС представляет собой весьма сложный и многогранный аспект в области современной энергетики. Одним из ключевых признаков этого процесса является непрерывное расширение и углубление функций, выполняемых системами управления. Это означает, что с каждым годом данные системы становятся все более специализированными и способными решать более широкий спектр задач, связанных с эксплуатацией, безопасностью и эффективностью функционирования атомных электростанций [1].

Одной из важнейших задач является разработка автоматизированных систем управления, эффективно использующих вычислительную технику для обеспечения надежной и экономичной эксплуатации мощных энергоблоков АЭС в различных режимах. Такие системы не только обеспечивают постоянный контроль и управление ключевыми параметрами работы энергоблоков, но и значительно повышают их безопасность и производительность.

При создании моделей сложных динамических систем, таких как АЭС, возникает множество трудностей [2]. Одна из ключевых проблем – это адекватное описание динамических режимов работы АЭС. Когда в модели объединяются несколько элементов – ядерный реактор, парогенератор с его значительной инерционностью и паровая турбина, которая, напротив, является относительно малоинерционным объектом, – это приводит к ограничению диапазона и скорости изменения нагрузки. Такое соединение разных по характеру объектов в единую систему обуславливает сложности в управлении и моделировании [3]. *Во-первых*, нужно учитывать, что энергоблоки, проектируемые для работы при высоких и сверхкритических параметрах пара, обычно не обладают достаточной аккумулирующей способностью. Это означает, что они не могут быстро изменять параметры пара в ответ на внезапные изменения нагрузки. Когда нагрузка изменяется быстро, могут возникнуть значительные перепады давления и температуры, что недопустимо в условиях эксплуатации, так как это может привести к авариям или снижению срока службы оборудования. *Во-вторых*, существуют строгие правила безопасности, которые ограничивают возможность быстрого регулирования параметров реактора. Быстрые изменения мощности могут вызвать нестабильность реактора, что потенциально опасно. Эти правила требуют плавного и предсказуемого изменения мощности, что добавляет дополнительные ограничения к диапазону и скорости изменения нагрузки. В энергоблоках резкое снижение нагрузки на турбогенератор из-за практически мгновенного закрытия клапанов турбины может привести к значительному повышению давления в главном паровом коллекторе. Это недопустимо по условиям эксплуатации, так как высокое давление может повредить оборудование и создать опасные условия для персонала.

Тесная взаимосвязь между компонентами АЭС – реактором, парогенератором и турбиной – требует рассматривать АЭС как единую динамическую систему. Это осложняет моделирование и управление, так как необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов и параметров. Система управления должна быть способна одновременно регулировать работу всех элементов, обеспечивая их согласованное функционирование и соответствие требованиям безопасности. Для анализа и синтеза систем управления энергоблоками АЭС необходимо применять сложный математический аппарат. Такие методы должны учитывать все нюансы работы элементов энергоблока и обеспечить надежное управление в различных режимах работы. Использование компьютерного моделирования и симуляций также является важным инструментом для анализа динамических режимов. Современные программные средства позволяют создавать подробные модели энергоблоков и прогнозировать их поведение в различных ситуациях. Это помогает выявить потенциальные проблемы и оптимизировать работу системы до ее запуска.

Одним из ключевых направлений повышения безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС является внедрение систем поддержки операторов, основу которых составляют быстродействующие модели. Поскольку каждый энергоблок имеет свои уникальные особенности, был разработан гибкий моделирующий комплекс (ГМК), способная адаптироваться к условиям проектируемого или модернизируемого энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 [4]. На рис. 1 и 2 представлена схема разбиения ГМК на функциональные блоки, которые соответствуют различным системам энергоблока [5].

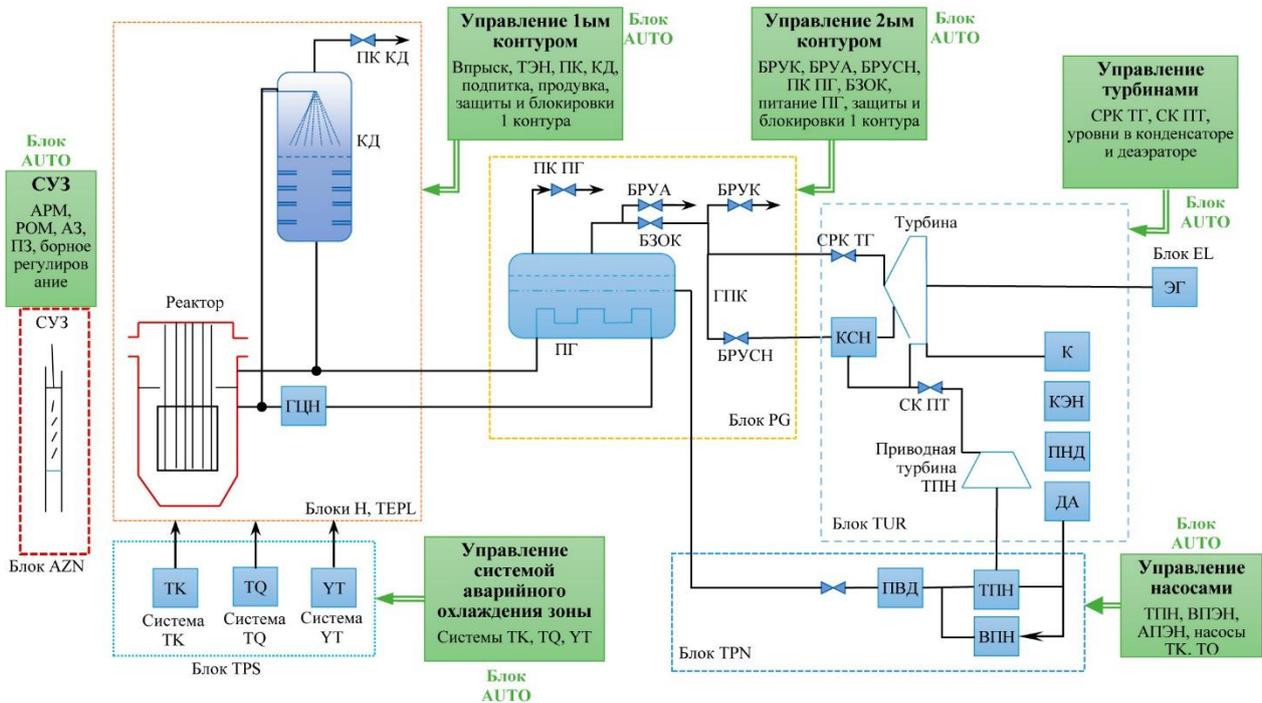


Рис. 1. Разбиение гибкого моделирующего комплекса на функциональные модули

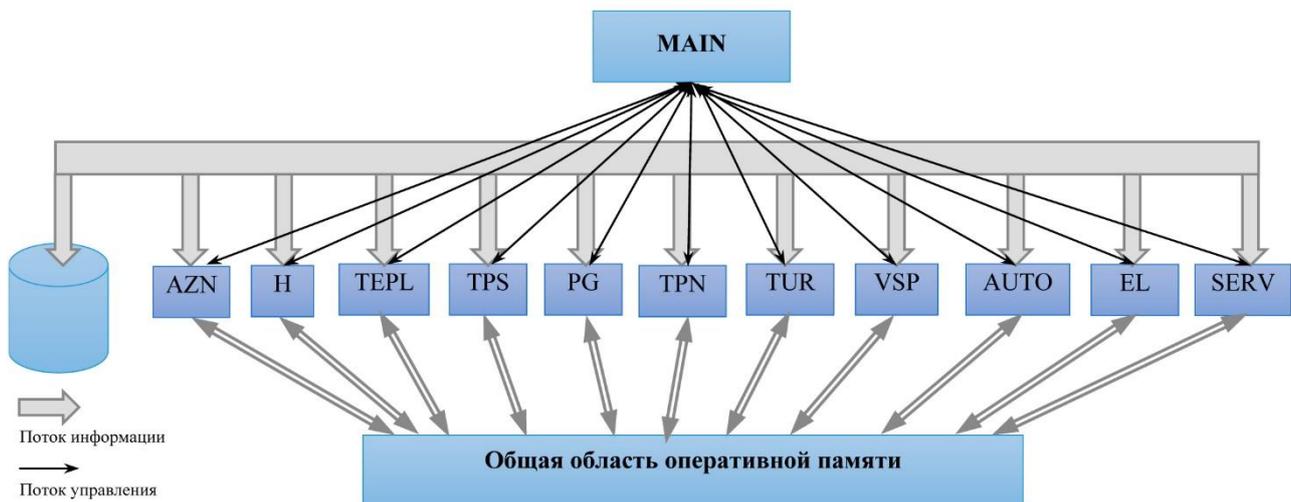


Рис. 2. Структурная схема гибкого моделирующего комплекса

## 1. Модели компенсатора давления

Система паровой компенсации объема теплоносителя является важной частью технологической системы АЭС с реактором ВВЭР. При переходных и аварийных режимах работы АЭС эта система обеспечивает поддержания давления в заданных пределах. Колебания давления ограничиваются упругими свойствами пароводяной смеси, заполняющей компенсатор давления (КД), а также включением электронагревателей или впрыском теплоносителя из холодной нитки главных циркуляционных трубопроводов (ГЦТ) в паровое пространство и конденсацией пара.

Основной трудностью при моделировании КД является недостаточная изученность протекающих в нем процессов. Однако ряд экспериментальных исследований, а также опыт построением соответствующих математических моделей, позволяют сделать некоторые выводы, используемые при построении моделей КД. Так, даже при резком положительном возмущении по температуре наблюдается незначительный перегрев пара в паровом пространстве КД, а вода переходит в недогретое состояние. Расширение пароводяной смеси происходит по линии насыщения. Эти положения легли в основу двух моделей компенсатора давления КД1 и КД2, входящих в расчетный модуль **Н**.

### 1.1. Модуль КД1 – равновесная модель

Многие переходные и аварийные режимы на энергоблоке связаны с падением давления в 1ом контуре. При этом пароводяная смесь в КД находится в состоянии термодинамического равновесия. В этих условиях оправдано применение равновесной модели КД (далее – КД1).

В рамках этой модели предполагается, что давление пара и воды в КД одинаково и равно  $P$  (см. рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения

- $P, R$  – давление и плотность в КД;
- $V_1, R_1, T_1$  – объем, плотность, температура воды в КД;
- $V_2, R_2, T_2$  – объем, плотность, температура пара в КД;
- $J$  – поток массы на межфазной поверхности;
- $Q_1$  – тепловой поток между фазами;
- $G$  – расход теплоносителя в КД (из КД),
- $H$  – высота уровня в КД.

Пар и вода находятся на линии насыщения с плотностью  $R_1$  и  $R_2$ , а объемное паросодержание двухфазной среды равно  $\alpha$ . Тогда общая плотность в КД будет  $R = \alpha R_2 + (1 - \alpha)R_1$ . Основными функциями модуля расчета КД являются определение расхода в КД в зависимости от  $dP/dt$  и определение полной энергии КД как функции давления. Для решения этих задач запишем уравнения сохранения массы и энергии в следующем виде:

$$\begin{cases} V \frac{dR}{dt} = G + G_{\text{ВПР}} + G_{\text{ПК}} \\ V \frac{d(RU)}{dt} = Gh + G_{\text{ВПР}}h_1 + G_{\text{ПК}}h_2 + Q' \end{cases} \quad (1)$$

где  $V$  – объем КД,  $R$  – общая плотность,  $U$  – удельная внутренняя энергия,  $G$  – расход в КД,  $h$  – энтальпия втекающей (вытекающей) воды;  $G_{\text{ВПР}}$  – расход впрыска в КД,  $h_1$  – энтальпия впрыскиваемой воды,  $G_{\text{ПК}}$  – расход через импульсно-предохранительные клапаны,  $h_2$  – энтальпия пара,  $Q$  – подводимое тепло.

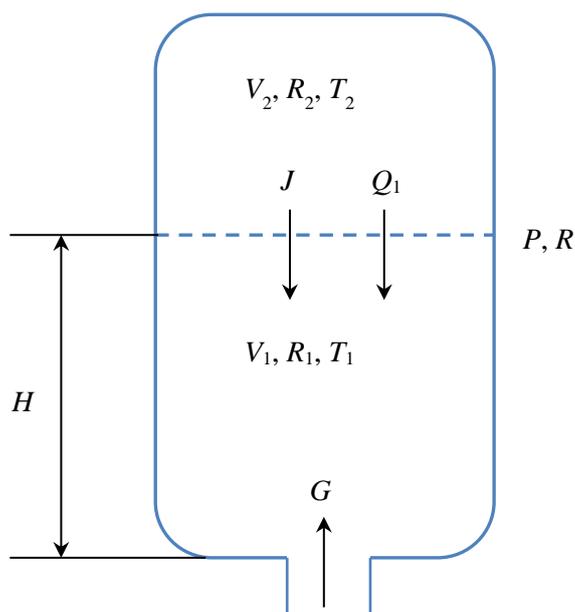


Рис. 3. Модель компенсатора давления

Перепишем эту систему, преобразуя 2е уравнение системы (1):

$$\begin{cases} V \frac{dR}{dt} = G + G_{\text{ВПР}} + G_{\text{ПК}} \\ V \frac{dR}{dt} \left( U + R \frac{\partial U}{\partial R} \right) + VR \frac{\partial U}{\partial P} \frac{dP}{dt} = Gh + G_{\text{ВПР}} h_1 + G_{\text{ПК}} h_2 + Q \end{cases} \quad (2)$$

При решении (2) используется уравнение состояния воды и водяного пара, определяющее значения  $\partial U / \partial R$  и  $\partial U / \partial P$  как функции  $P$  и  $R$ .

Расход впрыска определим следующим образом

$$G_{\text{ВПР}} = \sqrt{(\Delta P / \Delta P_0) R / R_0} \sum_{i=1}^3 G_i^0 K_i,$$

где  $\Delta P_0, R_0, G_i^0$  – соответственно перепад давления на трубопроводе впрыска, плотность теплоносителя холодной нитки, расход впрыска через полностью открытый  $i$ -й клапан при номинальных параметрах 1-го контура;  $K_i$  – степень открытия  $i$ -го клапана впрыска;  $\Delta P, R$  – текущие перепад давления на трубопроводе впрыска и плотность теплоносителя холодной нитки.

Теплообмен пароводяной среды в КД со стенками практически не влияет на процессы в компенсаторе, поэтому в качестве источников энергии учитывается только мощность теплоэлектронагревающих элементов (ТЭН), т.е.  $Q = W_{\text{ТЭН}}$ . Таким образом данная система уравнений (2) содержит 3 неизвестных:  $dP/dt, dR/dt, G$ . Однако, учитывая, что в модели гидродинамики, входящей в расчетный модуль **Н** используется «эффективное»  $dP/dt$ , характеризующее скорость изменения давления в 1-ом контуре, это значение является внешним параметром модели компенсатора давления КД1. Поэтому мы можем разрешить систему уравнений относительно  $G$ , подставив значение  $dR/dt$  из (1) в (2)

$$G = \frac{(G_{\text{ВПР}} + G_{\text{ПК}}) \left( U + R \frac{\partial U}{\partial R} \right) + VR \frac{\partial U}{\partial P} \frac{dP}{dt} - G_{\text{ВПР}} h_1 - G_{\text{ПК}} h_2 - Q}{h - U - R \frac{\partial U}{\partial R}} \quad (3)$$

## 1.2. Модуль КД2 – модель, учитывающая неравновесность паровой и водяной фаз

Область применения равновесной модели компенсатора давления ограничена режимами, связанными с падением давления в 1-ом контуре энергоблока. При росте давления равновесие фаз нарушается вследствие притока «холодного» теплоносителя из ГЦТ, и равновесная модель не применима. Поэтому в рамках ГМК в основном используется модель КД2, учитывающая неравновесность паровой и водяной фаз.

При разработке этой модели учитывались следующие предположения:

- Давление пара и воды одинаково и равно  $P$ ;
- Пар мгновенно переходит в состояние насыщения  $R_2 = \rho_V(P)$  (см. рис. 3).
- Вода в КД может быть недогретой или оставаться на линии насыщения.
- Эффекты сепарации в рамках этой модели не описываются.

Для определения параметров КД записываются уравнения сохранения массы и энергии для каждой из фаз в отдельности

$$\begin{cases} \frac{d(\rho_1 V_1)}{dt} = G + J + G_{\text{ВПР}} \\ \frac{d(\rho_1 V_1 u_1)}{dt} = Gh - P \frac{dV_1}{dt} + W_{\text{ТЭН}} + J h_{s1} + Q_1 + G_{\text{ВПР}} h_{s1} \\ \frac{d(\rho_2 V_2)}{dt} = -J + G_{\text{ПК}} \\ \frac{d(\rho_2 V_2 u_2)}{dt} = -P \frac{dV_2}{dt} - J h_{s2} - Q_2 + G_{\text{ПК}} h_{s2} - Q_{\text{ВПР}} \end{cases}, \quad (4)$$

где

- $\rho_1, V_1, u_1$  – плотность, объем, внутренняя энергия водяной фазы;
- $\rho_2, V_2, u_2$  – плотность, объем, внутренняя энергия паровой фазы;
- $P$  – давление в КД;
- $G_{\text{ВПР}}, G_{\text{ПК}}$  – расходы впрыска и через предохранительные клапаны КД;
- $J$  – поток массы на межфазной поверхности;
- $h_{s1}$  – энтальпия воды на линии насыщения;
- $Q_1$  – тепловой поток между фазами;
- $h_{s2}$  – энтальпия пара на линии насыщения;
- $Q_{\text{ВПР}}$  – тепловой поток от паровой фазы к впрыску.

Систему (4) дополним уравнением сохранения энергии для межфазной поверхности:

$$Jh_{s1} + Q_1 = Jh_{s2} + Q_2. \quad (5)$$

Запишем уравнение сохранения энергии для впрыскиваемой воды:

$$G_{\text{ВВП}}h_{\text{ВВП}} + Q_{\text{ВВП}} = G_{\text{ВВП}}h_{s1}. \quad (6)$$

Остановимся на расчете  $Q_1$ :

$$Q_1 = Sh(T_2 - T_1), \quad (7)$$

где

- $S$  – площадь теплообмена;
- $T_2, T_1$  – температуры пара и воды;
- $h$  – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по соотношению

$$h = c(\lambda/L)(P_r G_r)^{1/3}, \quad (8)$$

где

- $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;
- $L$  – диаметр КД;
- $P_r$  – число Прандтля;
- $G_r$  – число Грасгофа.

Представим систему (4) в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 \frac{dR_1}{dt} + R_1 \frac{dV_1}{dt} - G - J = G_{\text{ВВП}} \\ R_1 V_1 \frac{\partial u_1}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial t} + P \frac{dV_1}{dt} + G(u_1 - h) + J(u_1 - h_{s1}) + R_1 V_1 \frac{\partial u_1}{\partial P} \frac{dP}{dt} = G_{\text{ВВП}}(h_{s1} - u_1) + Q_1 + W_{\text{ТЭН}} \\ -R_2 \frac{dV_1}{dt} + J + (V - V_1) \left( \frac{\partial R_2}{\partial P} \right)_S \frac{dP}{dt} = G_{\text{ПК}} \\ R_2 (V - V_1) \left( \frac{\partial u_2}{\partial P} \right)_S \frac{dP}{dt} - P \frac{dV_1}{dt} + J(h_{s1} - u_2) = G_{\text{ПК}}(h_{s2} - u_2) - Q_1 - Q_{\text{ВВП}}(h_{s1} - h) \end{array} \right. \quad (9)$$

Эта система дополняется уравнением состояния для воды и пара, позволяющим определить зависимости:  $(\partial u/\partial R) = f(P, R)$ ,  $(\partial u/\partial P) = f(P, R)$ ,  $(\partial \rho/\partial P) = f(P, R)$ . Индекс S говорит о том, что производные берутся на линии насыщения. В результате получили систему 4х линейных уравнения относительно неизвестных  $dR_1/dt$ ,  $dV_1/dt$ ,  $G$ ,  $J$ . Значение  $dP/dt$ , как и в равновесной модели, является внешним параметром. Решая систему (9) получим искомые неизвестные. Нахождение полной энергии КД как функции давления  $P$  не представляет сложности. Определяя  $R_1$  и  $V_1$

$$\frac{R_1^i - R_{1i}}{\Delta t} = \frac{dR_1}{dt}, \frac{V_1^i - V_{1i}}{\Delta t} = \frac{dV_1}{dt}, V_2^i = V - V_1^i,$$

получаем значение энергии КД

$$E_{\text{КД}} = R_1^i V_1^i u_1(P, R_1^i) + R_2(P) V_2^i u_2(P).$$

### 1.3. Области применения моделей КД1 и КД2

Рассмотрим области применения модулей, основанных на моделях КД1 и КД2 и входящих в расчетный модуль **Н** ГМК, а также алгоритмы перехода при расчетах с одной из них на другую. В

Модуль, реализующий модель КД1, требует меньше оперативной памяти и обладает более высоким быстродействием. Поэтому в режимах, не сопровождающихся существенным ростом давления в 1-ом контуре, используется модуль с моделью КД1. Предполагается, что пар и вода в КД всегда находятся на линии насыщения, что в таких режимах оправдано и модель КД1 дает достаточно точные результаты.

В остальных режимах применяется модуль, основанный на модели КД2, в которой в процессе расчета определяется, какая модель (КД1 или КД2) должна в данный момент использоваться. При росте давления ( $(dP/dt) > 0$ ), либо когда вода в КД находится в недогретом до линии насыщения состоянии, используется модуль с моделью КД2, учитывающей неравновесность фаз. Расчет по модулю, реализующему модель КД1, возобновляется, когда равновесие фаз восстанавливается.

## 2. Верификация модели компенсатора давления в рамках ГМК

В этом разделе представлено исследование динамического поведения энергоблока во время закрытия отсечного клапана (БЗОК) парогенератора на этапе освоения мощности 75%, основанное на экспериментальных данных и соответствующем моделировании в рамках ГМК. Описание режима следующее: Закрытие БЗОК-3 осуществлялось посредством подачи сигнала с ключа управления с блочного пункта управления (БПУ). Весь процесс от момента подачи сигнала до полного закрытия БЗОК-3 длился 10 с. ГЦН-3 был отключен с БПУ через 20 с после подачи сигнала на закрытие БЗОК-3 (поскольку блокировка, вызывающая отключение ГЦН, не сработала). При достижении давления в ПГ-3 до 76 кгс/см<sup>2</sup> (по данным информационно-вычислительной системы) поступил сигнал на открытие БРУА-3. После того как давление в ПГ-3 снизилось ниже уставки на закрытие, БРУА-3 не закрылось автоматически, а осталось открытым на 30% на протяжении всего переходного процесса.

Экспериментальные и расчетные кривые изменения параметров первичного и вторичного контуров приведены на рис. 4-8 (результаты моделирования обозначены пунктирными линиями, экспериментальные данные — сплошными линиями). При расчете степень открытия отсечного клапана изменялась линейно от 1 до 0 в течение 10 с. Вследствие закрытия БЗОК давление в парогенераторе ПГ-3 увеличилось до 76,5 кгс/см<sup>2</sup>. На 24 с подается сигнал на открытие БРУА. Открытие БРУА и отключение главного циркуляционного насоса в соответствующей петле приводит к снижению давления в парогенераторе (ПГ). Как и в эксперименте, при достижении установленного значения для закрытия БРУА-3 в модели положение клапана оставалось неизменным [6].

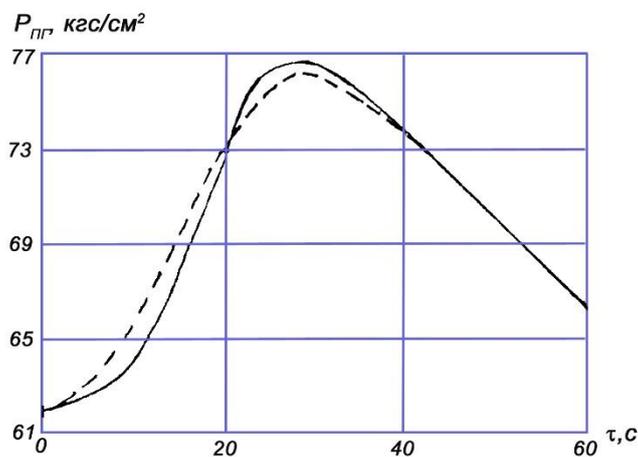


Рис. 4. Изменение давления в ПГ в режиме закрытия БЗОК

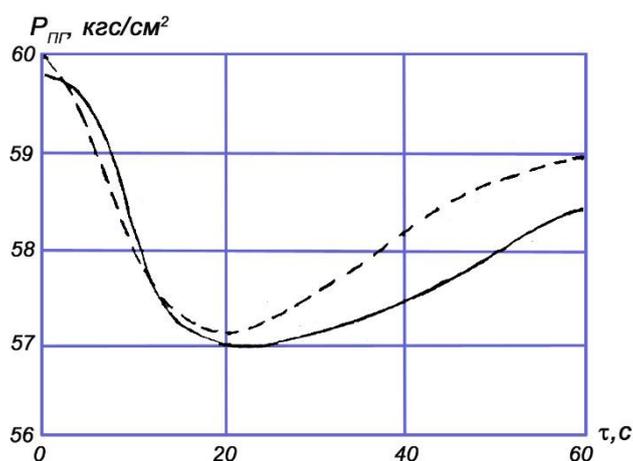


Рис. 5. Изменение давления в ГПК в режиме закрытия БЗОК

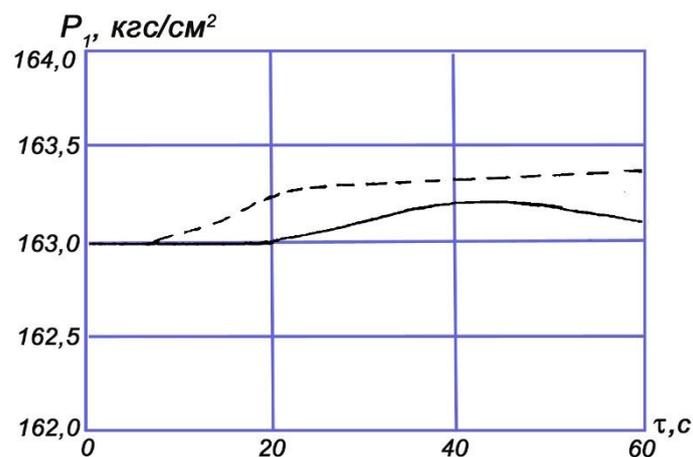


Рис. 6. Изменение давления в 1-ом контуре в режиме закрытия БЗОК

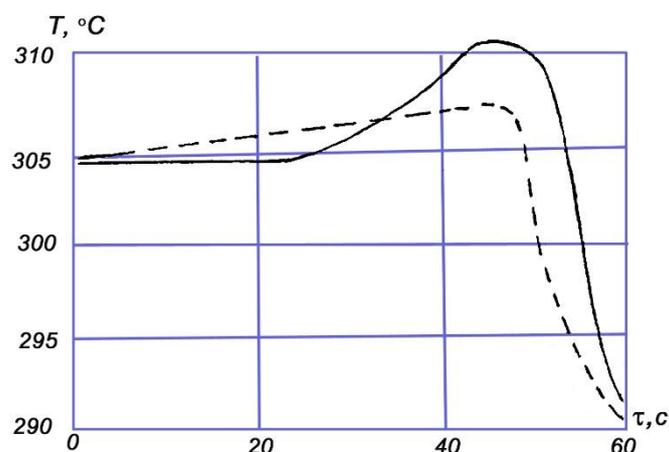


Рис. 7. Изменение температуры горячей нитки в режиме закрытия БЗОК

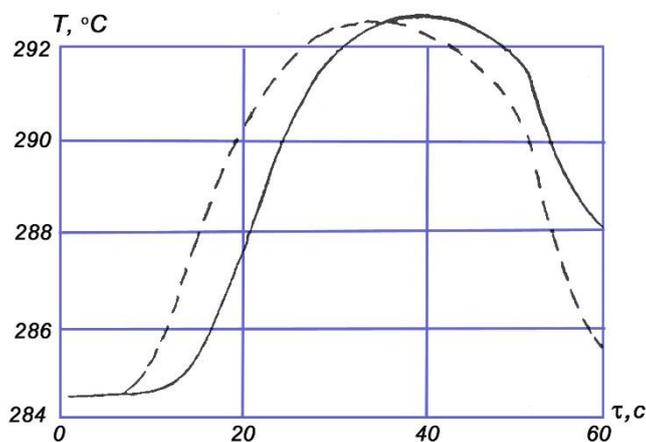


Рис. 8. Изменение температуры холодной нитки в режиме закрытия БЗОК

Моделирование данного переходного процесса выполнялось с использованием ГМК, где учитывались параметры теплообмена, гидравлики и динамических характеристик энергоблока. Модель была настроена таким образом, чтобы максимально точно воспроизвести реальные условия эксперимента, учитывая все фактические данные и показатели датчиков. Как видно, в этом режиме имеется хорошее согласование расчетных на основе ГМК и экспериментальных результатов.

### 3. Заключение

В статье представлена модель компенсатора давления энергоблока АЭС с ректором ВВЭР-1000, входящая в состав верифицированного гибкого моделирующего комплекса [5-7], схема которого представлена на рис. 1. Верификация представленной модели компенсатора объема на динамическом

режиме энергоблока при закрытии отсечного клапана парогенератора на этапе освоения мощности 75% показала хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных, что позволяет использовать гибкий моделирующий комплекс как ядро цифрового двойника АЭС для применения в системах информационной поддержки оператора АЭС, в функционально-аналитических тренажерах, при обработке решений при модернизации энергоблоков [8].

## Литература

1. *Singh P., Singh L.K.* Instrumentation and control systems design for nuclear power plant: An interview study with industry practitioners // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 53, N 11. – P. 3694–3703.
2. *Dong D.* Dynamical modeling and coordinated control design of a multimodular nuclear power-hydrogen cogeneration plant // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 272:116369.
3. *Vajpayee V., Becerra V, Bausch N, Deng J, Shimjith S.R., Arul A.J.* Dynamic modelling, simulation, and control design of a pressurized water-type nuclear power plant // *Nuclear Engineering and Design*. – 2020. – Vol. 370:110901.
4. *Jharko E., Sakrutina E., Chernyshov K.* Intelligent NPP Operators Support Systems: Flexible Modeling Software Package and Digital Twins // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russia, 2020. – P. 658–663.
5. *Жарко Е.Ф.* Гибкий моделирующий комплекс энергоблока АЭС и его верификация // Труды 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 1323–1331.
6. *Жарко Е.Ф.* Гибкий моделирующий комплекс: модель парогенератора // Труды 16-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023). – М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 1199–1207.
7. *Jharko E.* Digital Twin of NPPs: Simulation Systems and Verification // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2021. – P. 852–857.
8. *Poletikin A., Promyslov V., Semenov K.* Digital Twins as a Key Technology for Ensuring Effective Modernization of Complex Industrial Systems // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2021. – P. 628–632.