

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_50

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000 МКП В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ATHLET

А.Л. БуровORCID: 0000-0003-0880-8509 e-mail: burov@tut.by

Белорусский национальный технический университет

*Минск, Беларусь***А.Г. Герасимова**ORCID: 0000-0001-8169-4136 e-mail: gerasimova@bntu.by

Белорусский национальный технический университет

*Минск, Беларусь***А.Д. Мухин**ORCID: 0000-0002-0603-0177 e-mail: adzmukhin@gmail.com

Белорусский национальный технический университет

*Минск, Беларусь***А.В. Орлова**ORCID: 0009-0008-7740-4149 e-mail: akolovich@bcnrs.by

Центр по ядерной и радиационной безопасности

*Минск, Беларусь***А.А. Павловская**ORCID: 0000-0002-9331-5188 e-mail: pawlowskaya@tut.by

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Создана теплогидравлическая модель парогенераторов первого энергоблока Белорусской АЭС: сформирован файл набора входных данных, предназначенный для теплогидравлического расчетного кода ATHLET версии 3.3. Представлены результаты моделирования парогенератора ПГВ-1000МКП с реакторной установкой ВВЭР-1200. Задачей работы являлось исследование и разработка оптимизированной теплогидравлической схемы для модели парогенератора ПГВ-1000МКП с целью дальнейшей ее верификации с проектными данными. Данная модель может быть использована для детерминистического анализа безопасности первого энергоблока Белорусской АЭС, а именно для анализа процессов, происходящих на границе первого и второго циркуляционных контуров. Анализ полученных зависимостей показал, что переходные процессы протекают корректно, и значения основных параметров парогенератора в стационарном режиме соответствуют проектным данным. Полученные результаты позволили обосновать корректный инженерный подход к разработке набора входных данных для программного кода ATHLET и достоверность полученных результатов моделирования.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, ядерный реактор, парогенератор, гидродинамика, теплообмен, детерминистический анализ безопасности.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Буров, А.Л. Теплогидравлическая модель парогенератора ПГВ-1000 МКП в программной среде ATHLET / А.Л. Буров, А.Г. Герасимова, А.Д. Мухин, А.В. Орлова, А.А. Павловская // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 2. С. 50-59. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_50

THERMAL-HYDRAULIC MODEL OF THE PGV-1000MKP STEAM GENERATOR IN THE ATHLET SOFTWARE ENVIRONMENT

A.L. Burov

ORCID: **0000-0003-0880-8509** e-mail: **burov@tut.by**

Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

A.G. Gerasimova

ORCID: **0000-0001-8169-4136** e-mail: **gerasimova@bntu.by**

Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

A.D. Mukhin

ORCID: **0000-0002-0603-0177** e-mail: **adzmukhin@gmail.com**

Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

A.V. Orlova

ORCID: **0009-0008-7740-4149** e-mail: **akolovich@bcnrs.by**

Center for Nuclear and Radiation Safety

Minsk, Belarus

A.A. Pavlovskaya

ORCID: **0000-0002-9331-5188** e-mail: **pawlovskaya@tut.by**

Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Designed is thermal-hydraulic model of steam generators for the primary plant of the Belarusian NPP: an input data set file is developed for ATHLET v.3.3 thermal-hydraulic computer code. The paper represents the results of modeling the PGV-1000MKP steam generator with VVER-1200 reactor facility. The study was aimed to investigation and development of the optimized thermal-hydraulic diagram for PGV-1000MKP steam generator model with the purpose of its further verification against design data. This model can be used for deterministic safety analysis of the primary plant of the Belarusian NPP, particularly for analysis of the processes occurring at the borderline between primary and secondary NPP circulation circuits. Analysis of the resulted dependencies shows the correctness of the transient processes and compliance of the steady-state basic steam generator parameters with design data. The findings give ground to the correct engineering approach to the development of an input data set for ATHLET computer code and to the fidelity of the modeling results.

Key words: nuclear power plant, nuclear reactor, steam generator, hydrodynamics, heat transfer, deterministic safety analysis.

FOR CITATION: A.L. Burov, A.G. Gerasimova, A.D. Mukhin, A.V. Orlova, A.A. Pavlovskaya. Thermal-hydraulic model of the PGV-1000mkp steam generator in the ATHLET software environment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 2. С. 50-59. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_2_50

Введение

Для успешного ввода в эксплуатацию и последующей эксплуатации Белорусской АЭС необходимо постоянно решать многочисленные задачи обеспечения ее безопасности. Анализ безопасности связан с научной оценкой протекающих на атомных электростанциях физических процессов и явлений; она позволяет продемонстрировать выполнение требований по безопасности в отношении всех постулируемых исходных событий, которые могут возникать во всем диапазоне эксплуатационных состояний реакторной установки. При этом существен-

ную роль играет детерминистический анализ безопасности АЭС, позволяющий прогнозировать реакцию на постулируемые исходные события, в частности, моделирование теплогидравлических процессов. Такое моделирование возможно как на натуральных стендах [1], так и с помощью компьютерных кодов; оно должно охватывать как нормальные условия эксплуатации энергоблока, так и различные аварийные ситуации [2].

Используемые инструменты моделирования

В настоящее время существует большое количество расчетных кодов для создания теплогидравлических моделей различных энергетических установок с целью обоснования безопасности. Для выполнения теплогидравлического анализа в настоящей работе был использован компьютерный код ATHLET. Он разработан в GRS (Германия) для численного моделирования нестационарных теплогидравлических процессов, происходящих в реакторных установках с легководными реакторами типа PWR/ВВЭР при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и авариях [3]. Детальное описание математических моделей кода приведено в [4], информация по валидации кода – в [5]. Основу кода составляют четыре модуля, представляющие четыре типа моделируемых процессов: гидродинамику (модуль TFD), теплопередачу (модуль HECU), нейтронную кинетику (модуль NEUKIN), автоматику (модуль GCSM). Базовой моделью кода является гомогенная модель двухфазного течения жидкости и пара в системе, представляющей набор контрольных объемов. Система уравнений, описывающих данную модель, базируется на законах сохранения энергии, моментов, масс жидкости и пара. Для реализованной версии кода базовой опцией является система шести уравнений; также возможно использование пяти уравнений, в этом случае уравнение моментов импульса общее для жидкости и пара. Для контрольного объема имеется возможность расчета текущего изменения физического уровня жидкости (mixture level).

Для расчета относительной межфазной скорости в коде реализована модель, основанная на полуэмпирических данных. Она охватывает все режимы течения, возникающие как при прямоточном, так и при противоточном течении пара и жидкости в вертикальных и горизонтальных каналах. Потери на трение рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха. Существует возможность задания постоянного коэффициента потерь на трение, а также использования корреляции для учета изменения коэффициента при различных режимах течения. Рост потерь давления на трение при двухфазном течении учитывается коэффициентом Мартинелли-Нельсона. Расчет величины критического расхода производится с использованием одномерной термодинамической неравновесной модели с учетом описанной геометрии места истечения. Также возможно использование равновесной гомогенной модели и модели критического истечения. При моделировании процессов в системе с неконденсируемыми газами в качестве базовых используются законы для идеального газа. Для расчета текущей концентрации борной кислоты в моделируемой системе может быть использовано дополнительное уравнение сохранения массы. Существует возможность дополнения кода независимо разработанными модулями посредством общего интерфейса.

Исходные данные и описание разрабатываемой модели

В данной работе анализируется процесс создания теплогидравлической модели парогенератора ПГВ-1000МКП для первого блока Белорусской АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200. Различные аспекты и особенности моделирования паропроводов свежего пара были рассмотрены в [6]. В качестве исходных данных для моделирования парогенератора принимались геометрические и теплогидравлические характеристики парогенератора ПГВ-1000МКП, представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1.
Характеристики парогенератора ПГВ-1000МКП

Table 1.
Specifications of PGV-1000MKP steam generator

Наименование	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт	803
Максимальная тепловая мощность, МВт	859
Паропроизводительность (при $t_{\text{пв}} = 225$ °С, при продувке 15 т/ч), т/ч	1602 ⁺¹¹²
Давление генерируемого пара на выходе из коллектора парогенератора, МПа	7,00±0,10
Температура генерируемого пара на выходе из коллектора пара парогенератора, °С	285,8±1,0
Температура питательной воды в номинальном режиме, °С	225±5
Влажность пара на выходе из коллектора пара парогенератора, % масс., не более	0,20
Давление теплоносителя первого контура на входе в парогенератор, абсолютное, МПа	16,14±0,30
Уровень воды в парогенераторе, мм	2700±50

Таблица 2.
Характеристики парогенератора со стороны первого контура

Table 2.
Specifications of steam generator proximal to the primary circuit

Наименование параметра	Значение
Высота коллектора (без крышки с вытеснителем), мм	5100
Внутренний диаметр коллектора в перфорированной части, мм	834
Внешний диаметр коллектора в перфорированной части, мм	1176
Количество теплообменных трубок на один парогенератор, шт.	10978
Средняя длина теплообменных трубок парогенератора, мм	11063
Внешний диаметр теплообменной трубки, мм	16
Внутренний диаметр теплообменной трубки, мм	13
Общая площадь проходного сечения трубки по первому контуру, м ²	1,457

Для построения модели были выделены следующие объемы парогенератора: верхний объем, участок под погружным дырчатым листом (ПДЛ), участок между внутренним и внешним пакетом трубок, боковой участок под ПДЛ, опускной участок, внутренний пакет трубок, внутренний участок парогенератора, нижний объем, внешний пакет трубок.

На рис. 1 представлены поперечный разрез парогенератора с указанием основных участков для моделирования.

Обозначения элементов нодализационной схемы на примере первого парогенератора из четырех парогенераторов энергоблока представлены в табл. 3.

Схематическое представление объемов по высоте парогенератора для моделирования представлена на рис. 2.

После анализа рассматриваемых данных была составлена нодализационная схема парогенератора ПГВ-1000МКП, представленная на рис. 3.

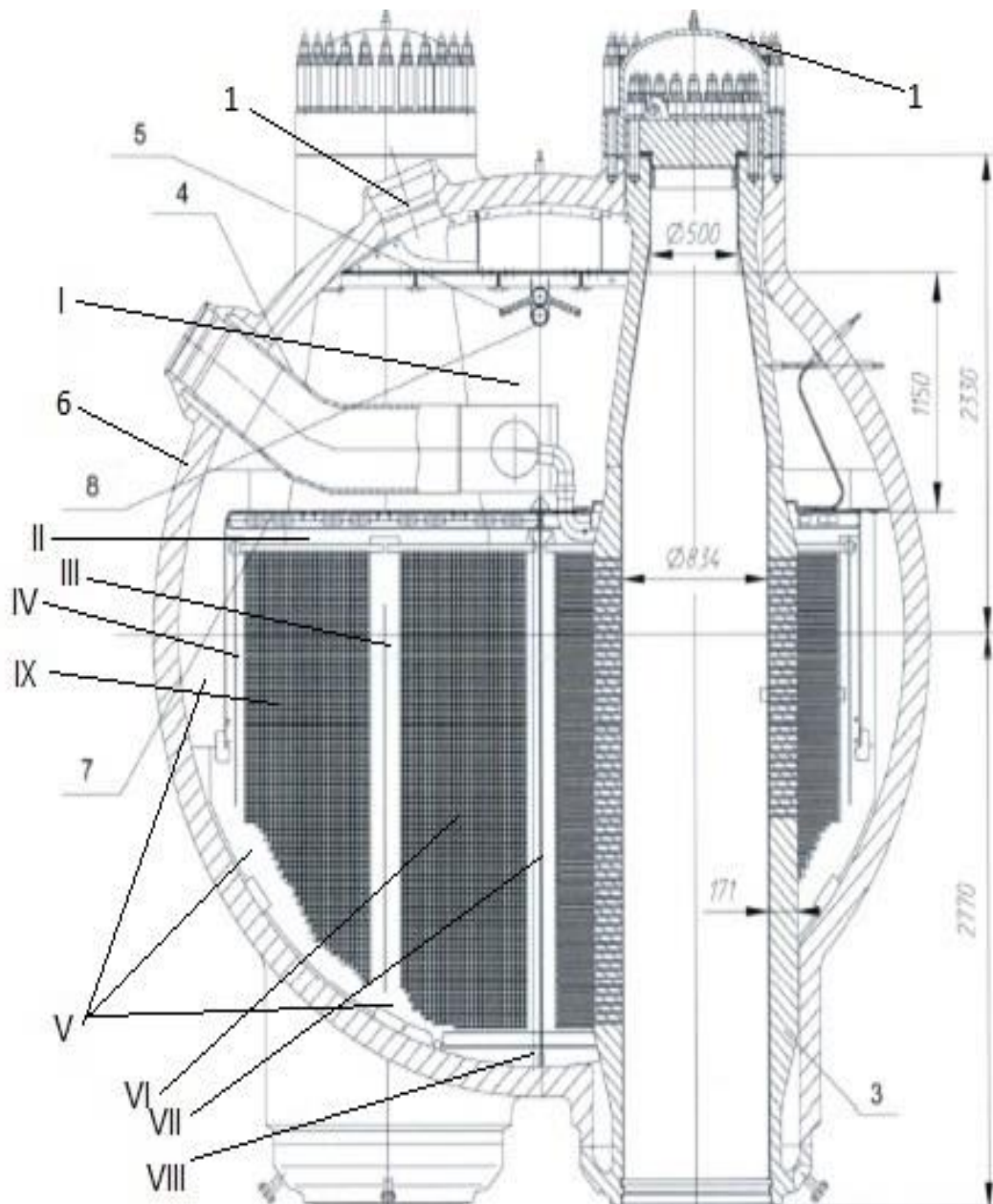


Рис. 1. Поперечный разрез парогенератора ПГВ-1000МКП:

1 – крышка коллектора первого контура, 2 – патрубок свежего пара, 3 – коллекторы теплоносителя первого контура, 4 – устройства подвода и раздачи питательной воды, 5 – устройства подвода и раздачи питательной воды в аварийных режимах, 6 – корпус парогенератора, 7 – погруженный дырчатый лист, 8 – устройство подачи химических реагентов

I – верхний объем, II – участок под ПДЛ, III – участок между внутренним и внешним пакетом трубок, IV – боковой участок под ПДЛ, V – опускной участок, VI – внутренний пакет трубок, VII – внутренний участок парогенератора, VIII – нижний объем, IX – внешний пакет трубок

Fig. 1. Cross-section of PGV-1000MKP steam generator:

1 – primary circuit header cover, 2 – live steam branch, 3 – primary circuit heat medium headers, 4 – feed water supply and dispensing devices, 5 – emergency feed water supply and dispensing devices, 6 – steam generator housing, 7 – submerged perforated sheet (SPS), 8 – chemicals supply device

I – upper volume, II – area for SPS, III – region between internal and external tubing blocks, IV – side area for SPS, V – down-comer region, VI – internal tubing block, VII – internal steam generator region, VIII – lower volume, IX – external tubing block

Таблица 3.

Таблица соответствия наименования элементов нодализационной схемы в расчетном коде ATHLET

Table 3.

Correspondence table of nodalization diagram component names in ATHLET computer code

Участок	Обозначение элементов нодализационной схемы для первого парогенератора
Нижний объем	S1-DNO
Внутренний пучок теплообменных трубок	S1-PKT_IN
Внешний пучок теплообменных трубок	S1-PKT_OU
Участок между внутренним и внешним пучками теплообменных трубок	S1-INN2
Внутренний участок	S1-INN1
Участок между пучками теплообменных трубок и погружным дырчатым листом	S1-PDL
Боковой участок под погружным дырчатым листом	S1-PDL2
Опускной участок	S1-DWNC
Верхний объем над погружным дырчатым листом	S1-TOP

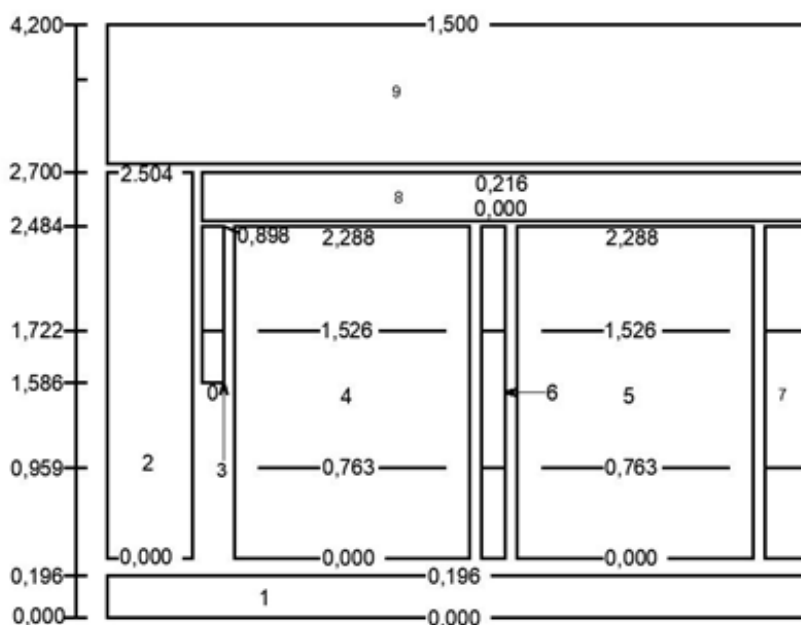


Рис. 2. Расчетная схема (структурная) для моделирования парогенератора ПГВ-1000МКП:

- 1 – нижний объем парогенератора, 2 – опускной участок, 3 – боковой участок под ПДЛ,
 4 – внешний пакет трубок, 5 – внутренний пакет трубок, 6 – участок между внутренним и внешними
 пакетами трубок, 7 – внутренний участок парогенератора,
 8 – участок между трубками и погружным дырчатым листом (ПДЛ), 9 – верхний объем

Fig. 2. Computational (structural) model for PGV-1000MKP steam generator modeling:

- 1 – steam generator lower volume, 2 – down-comer region, 3 – side area for SPS, 4 – external tubing block,
 5 – internal tubing block, 6 – region between internal and external tubing blocks, 7 – internal steam
 generator region, 8 – region between tubing and submerged perforated sheet (SPS), 9 – upper volume

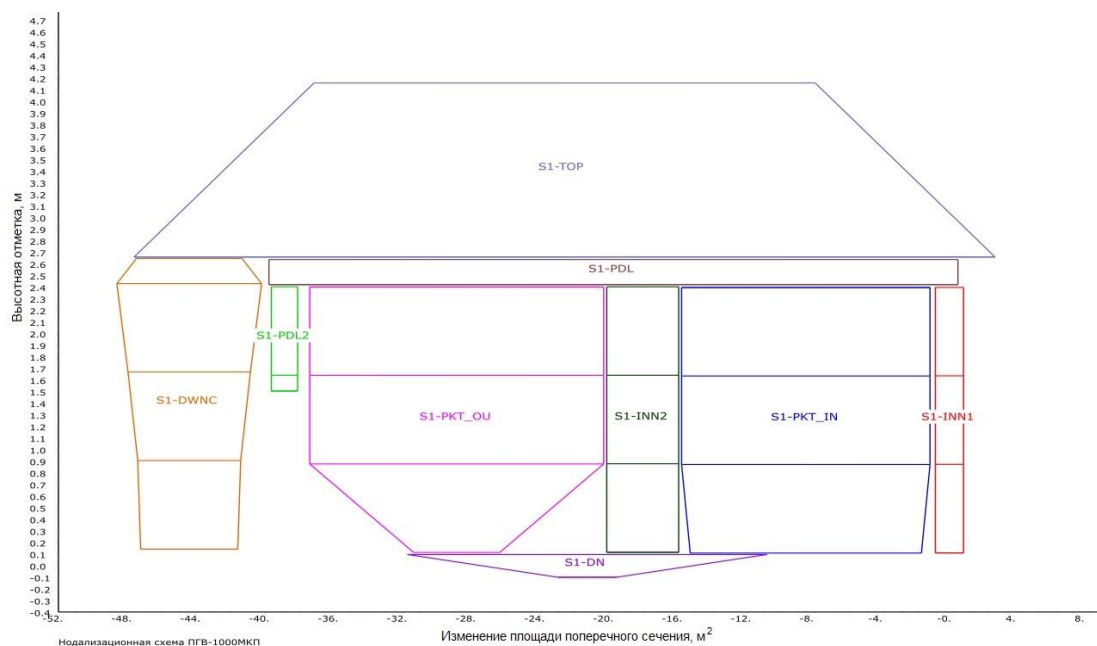


Рис. 3. Нодализационная схема парогенератора ПГВ-1000МКП на примере первого парогенератора

Fig. 3. Nodalization diagram of PGV-1000MKP steam generator by the example of the primary steam generator

Реализованная модель позволяет получить более реальную картину циркуляции потоков теплоносителя, на основе которой можно судить об улучшении модели по сравнению с предыдущими разработками. Для моделирования теплообмена была использована тепловая структура, представленная в расчетной среде ATHLET. Трубные участки были поделены по высоте на три участка (0,763 м, 1,526 м и 2,288 м соответственно). В программной среде ATHLET теплообменные трубки и их тепловые характеристики представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Представление теплообменных трубок парогенератора ПГВ-1000МКП на примере первого парогенератора в программной среде ATHLET

Table 4.

Illustration of heat exchange tubing of PGV-1000MKP steam generator by the example of the primary steam generator in ATHLET software environment

Наименование	Высотная отметка, м	Средняя длина трубок, м	Количество трубок	Тепловой поток, Вт
S1-TBSINL1	0,763	9,71643	2003,76	64020,4
S1-TBSINL2	1,526	9,71643	2078,08	64020,4
S1-TBSINL3	2,288	9,71643	2078,08	64020,4
S1-TBSOUL1	0,763	12,40357	740,24	81725,64
S1-TBSOUL2	1,526	12,40357	2003,76	81725,64
S1-TBSOUL3	2,288	12,40357	2074,08	81725,64

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в виде графиков при отработке расчета. Время моделирования составило 600 с, что достаточно для подтверждения устойчивости модели и достижения стационарного состояния. На рис. 4 представлены результаты моделирования давления в парогенераторе, а на рис. 5 – температуры питательной воды, поступающей в парогенератор.

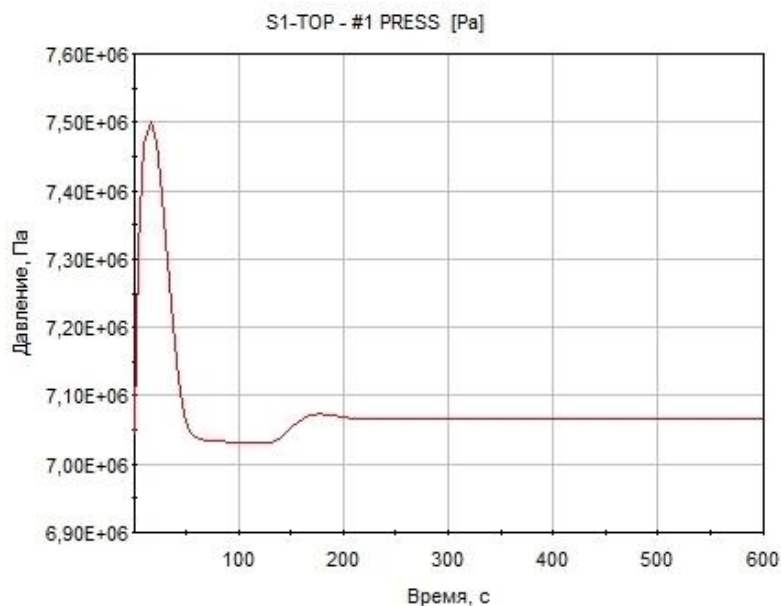


Рис. 4. Давление в парогенераторе

Fig. 4. Pressure within the steam generator

Анализ графика (рис. 4) показывает, что стабилизация давления происходит примерно на 180-й секунде. Установившееся давление составляет 7,05 МПа, что соответствует проектному значению (табл. 1). В период с 0 до 180 с происходит переходный процесс, обусловленный отличием заданных начальных параметров в файле исходных данных и расчетного установившегося значения стационарного состояния, поэтому возникают незначительные колебания, находящиеся в пределах допустимых значений в соответствии с проектными параметрами парогенератора. Данное замечание справедливо также для графиков, изображенных на рис. 5 и 6.

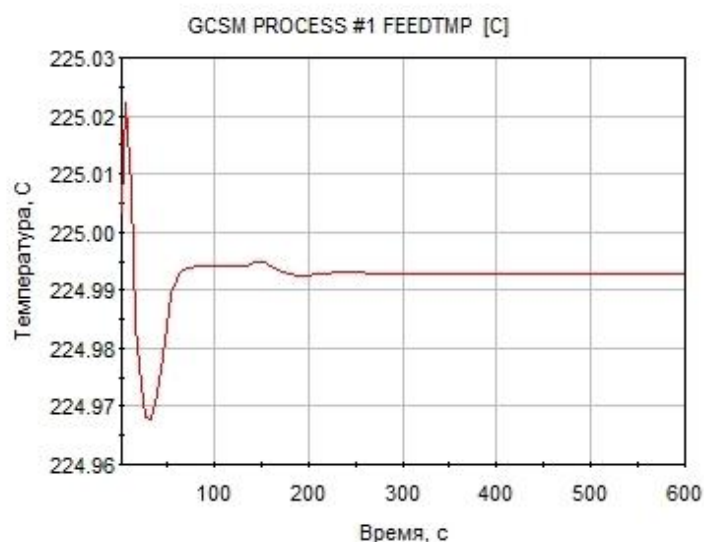


Рис. 5. Температура питательной воды, поступающей в парогенератор

Fig. 5. Temperature of feed water entering the steam generator

При моделировании отмечено, что температура питательной воды поддерживается значению близкой к проектной с допустимым отклонением (табл. 1). Для определения уровня воды в парогенераторе был использован встроенный в расчетный код ATHLET модуль GCSM. На рис. 6 представлены результаты построения графика зависимости уровня воды в парогенераторе от времени, которые показывают, что данный параметр также соответствует проектным данным.

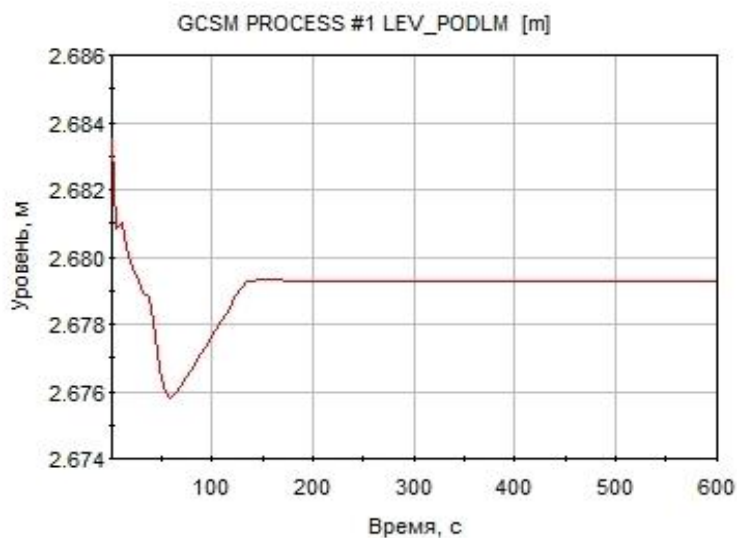


Рис. 6. Уровень воды в парогенераторе

Fig. 6. Water level in the steam generator

При рассмотрении полученного графика уровня воды в парогенераторе мы видим, что стабильный уровень (2,679 м) был достигнут примерно на 120-й секунде, который также соответствует проектным данным (табл. 1). На рис. 7-8 представлены наглядные процессы распределения параметров в самой нодализационной схеме парогенератора (рис. 3).

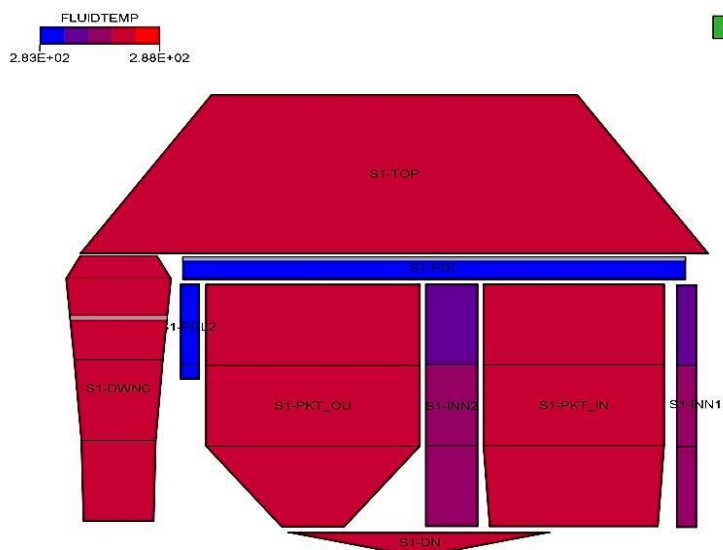


Рис. 7. Распределение температуры теплоносителя второго контура в парогенераторе

Fig. 7. Secondary circuit heat medium temperature distribution in the steam generator

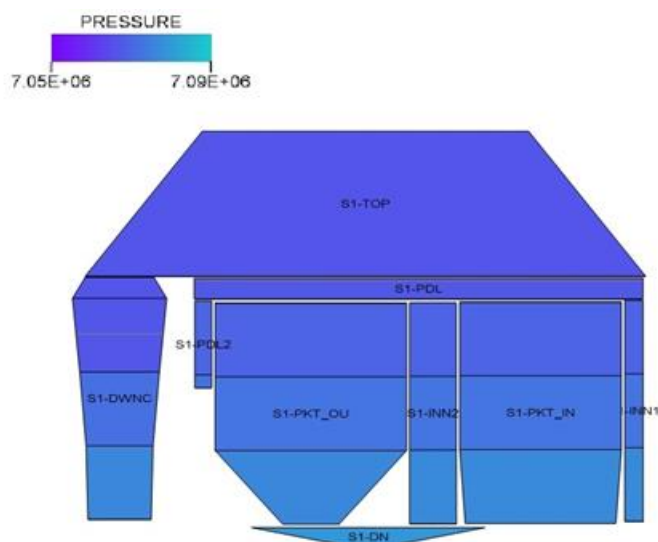


Рис. 8. Распределение давления в парогенераторе

Fig. 8. Pressure distribution in the steam generator

Заключение

Разработана теплогидравлическая модель парогенератора ПГВ-1000МКП, рассмотрены основные технические характеристики, необходимые для составления расчетной модели в программной среде ATHLET. На их основе создана математическая модель, учитывающая реальные процессы, происходящие в парогенераторе, в частности, циркуляцию теплоносителя. Результат показывает устойчивость и сходимость разработанной модели. В стационарном режиме были получены такие параметры, как давление в парогенераторе, температура питательной воды, поступающей в парогенератор и уровень воды. Показано соответствие значений проектным данным парогенератора первого энергоблока Белорусской АЭС.

Библиографический список

1. Буров, А.Л. Экспериментальный стенд для исследования гидродинамических характеристик тепловыделяющих сборок типа ТВСА / А.Л. Буров, Е.В. Секлюцкий // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2015. С. 230-234.
2. Буров, А.Л. Срабатывание аварийной защиты реакторной установки ВВЭР-1000 по ложной причине / А.Л. Буров, А.А. Павловская // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. — Минск: БНТУ, 2017. С. 140.
3. Lerchl, G. GRS-P-1 : ATHLET Mod 2.1 Cycle A. User's manual. / G. Lerchl, H. Austregesilo. – Gesellschaft fur anlagen- und reactorsicherheit mbH, 2006. Vol. 1. – 832 p.
4. Austregesilo, H. GRS-P-1: ATHLET Mod 2.1 Cycle A. Models and methods / H. Austregesilo, C. Bals, A. Hora, G. Lerchl, P. Romstedt. – Gesellschaft fur anlagen-und reactorsicherheit mbH, 2006. Vol. 4. 419 p.
5. Lerchl, G. GRS-P-1: Rev. 1. ATHLET Mod 2.1 Cycle A. Validation. / G. Lerchl, H. Austregesilo, H. Glaeser, M. Hrubisko, W. Luther. – Gesellschaft fur anlagen-und reactorsicherheit mbH, 2006. Vol. 3. 290 p.
6. Буров, А.Л. Доработка теплогидравлической модели первого энергоблока Белорусской АЭС в части моделирования паропроводов свежего пара / А.Л. Буров, А.Г. Герасимова, А.А. Павловская // Современные тенденции в развитии экономики энергетики. – Минск: БНТУ, 2023. С. 55-57.

Дата поступления
в редакцию: 19.04.2023

Дата принятия
к публикации: 05.06.2023