

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ПРОЕКТА АЭС-2006 (РУ В-392М)

С.В. Яуров*, А.В. Боровой*, А.В. Юдин*, М.В. Болгов*, А.Д. Данилов**

* *Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1*

** *ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет»
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84*

Р

Рассмотрены конструкция, режимы работы регенеративного теплообменника (РТО) системы продувки и дренажей парогенераторов энергоблоков № 1, № 2 Нововоронежской АЭС-2 (проект АЭС-2006).

Представлены результаты математического моделирования режимов работы теплообменника с целью выявления причин низкой эффективности.

На основании результатов пусконаладочных работ системы продувки и дренажей парогенераторов блока № 1 Нововоронежской АЭС-2, а также проведенных теплогидравлических расчетов режимов работы РТО выдвинуты предположения в части изменения подключения трубопроводов обвязки [1 – 3]. На блоке № 2 Нововоронежской АЭС-2 выполнена модернизация обвязки РТО по предложениям авторов статьи.

Модернизация в обвязке РТО реализована сначала на блоке № 2 на стадии монтажа систем, а после подтверждения ожидаемого результата применена в апреле 2020 г. на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Приведён сравнительный анализ результатов испытаний теплогидравлических характеристик регенеративных теплообменников системы продувки и дренажей для блока № 1 (до модернизации, после модернизации в ППР-2020) и блока № 2 Нововоронежской АЭС-2.

Указанные доработки позволили добиться более эффективной работы РТО системы продувки и дренажей парогенераторов и системы в целом.

Ключевые слова: АЭС-2006, продувка, парогенератор, модернизация, регенеративный теплообменник, обвязка, переподключение, РУ В-392М, эксплуатация.

КОНСТРУКЦИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ

Регенеративный теплообменник входит в состав системы продувки и дренажей парогенераторов блоков № 1 и № 2 Нововоронежской АЭС-2, предназначен для охлаждения

© С.В. Яуров, А.В. Боровой, А.В. Юдин, М.В. Болгов, А.Д. Данилов, 2022

ния продувочной (котловой) воды из парогенераторов перед поступлением на спецводоочистку (СВО-5) и последующего нагрева очищенной продувочной воды с возвратом в парогенераторы в различных режимах эксплуатации блока [1 – 7].

Теплообменник представляет собой аппарат вертикального типа, состоящий из двух съемных крышек, корпуса, патрубков, опор, строповых устройств, цилиндрических многоходовых змеевиков (расположены внутри корпуса между двумя трубными решетками). Общий вид теплообменника представлен на рис. 1.

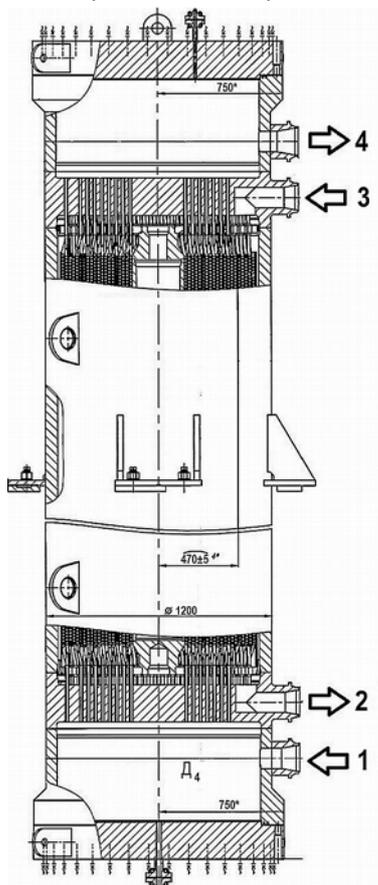


Рис. 1. Конструкция регенеративного теплообменника системы продувки и дренажей ПГ: 1 – подача охлаждаемого теплоносителя из ПГ в РТО; 2 – подача охлажденного теплоносителя из РТО в доохладитель продувки и далее на СВО-5; 3 – подача очищенного теплоносителя от СВО-5 на нагрев в РТО; 4 – возврат очищенного и нагретого теплоносителя от РТО в парогенератор

Охлаждаемая среда из парогенераторов (на очистку) подается «снизу-вверх» по трубному пространству, а нагреваемая очищенная среда (от СВО-5) подается «сверху-вниз». Основные характеристики теплообменника представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики теплообменника системы продувки ПГ

Параметр	Значение
Наружный диаметр теплообменных труб и их толщина, мм	15×1,5
Общее количество теплообменных труб, шт.	488
Площадь поверхности теплообмена (по наружному диаметру труб), м ²	310
Наружный диаметр и толщина корпуса в центральной части, мм	1200×65

Основные параметры теплообменника представлены в табл. 2

Таблица 2

Основные параметры теплообменника системы продувки

Параметр	Значение
Температура на входе в РТО охлаждающей среды от спецводоочистки в ПГ (межтрубное пространство), °С	50
Температура на выходе из РТО охлаждающей среды от спецводоочистки в ПГ (межтрубное пространство), °С	237 – 251
Давление среды, МПа	6,9
Температура на входе в РТО охлаждаемой среды из ПГ (трубное пространство), °С	285
Температура на выходе из РТО охлаждаемой среды из ПГ на спецводоочистку (трубное пространство), °С	≥ 100
Расход среды, т/ч	140

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ПРОДУВКИ ПГ БЛОКА №1 НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ

Проведение пусковых и наладочных работ (ПНР) системы продувки ПГ показало низкую эффективность РТО системы на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 [1 – 3]. При номинальных расходах в системе продувки наблюдались существенно низкие температуры продувочной и подпиточной воды до и после РТО. После проведения комплекса мероприятий по очистке трубного и межтрубного пространств теплообменника его эффективность не увеличилась.

В таблице 3 представлены результаты ПНР РТО системы продувки ПГ блока № 1 НВ АЭС-2 (до модернизации). Так как система продувки ПГ блоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 является замкнутой, то расходы охлаждаемой (продувочной) среды равны расходам охлаждающей (подпиточной) среды. При этом погрешность измерения для температуры составила не более ± 2,0 %, для расхода – не более ± 4,5 %.

Таблица 3

Результаты пусконаладочных работ РТО системы продувки ПГ (до модернизации)

Параметр	Результаты испытаний		Проектные данные
	1	2	
Расход продувки от ПГ/подпитки к ПГ на входе в РТО, т/ч	148,2	60,0	140
Температура на входе в РТО охлаждаемой среды (трубное пространство), °С	281,2	280,0	285,0
Температура на выходе из РТО охлаждаемой среды (трубное пространство), °С	144,4	205,0	≤ 100
Температура на входе в РТО охлаждающей среды (межтрубное пространство), °С	62,08	60,0	50
Температура на выходе из РТО охлаждающей среды (межтрубное пространство), °С	212,12	156,0	237 – 251

Измеренные изменения температуры (до модернизации) в трубном и межтрубном пространствах РТО блока № 1 НВ АЭС-2 для расходов 60 т/ч и 148,2 т/ч пока-

заны на рис. 2а, б.

Проектные изменения температур в трубном и межтрубном пространствах РТО представлены на рис. 2в.

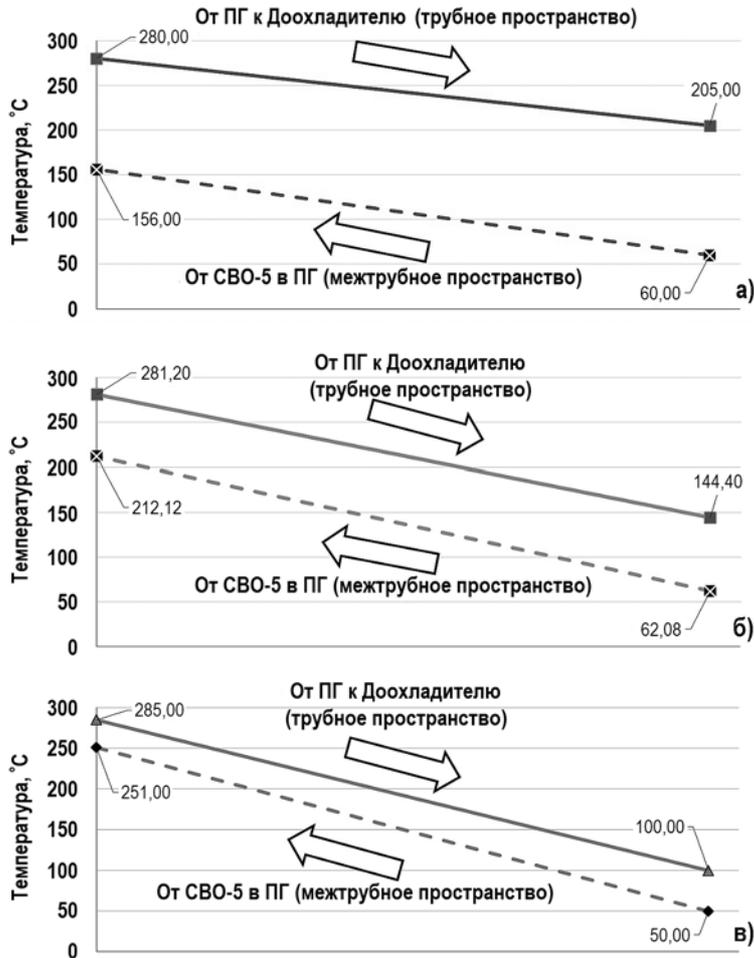


Рис. 2. Измеренные значения перепада температуры (до модернизации) в трубном и межтрубном пространствах РТО системы продувки ПГ: а) - расход 60 т/ч; б) – расход 148,2 т/ч; в) – проектные данные с расходом 140 т/ч

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОБМЕННИКА

Авторами статьи ранее было выдвинуто предположение о причинах низких температур до и после РТО – низкая скорость потока теплоносителя в межтрубном и трубном пространствах теплообменника (0,34 и 0,63 м/с) для проектных расходов среды в системе [1 – 3]. При проектной (текущей) схеме подключения обвязки трубопроводов РТО (охлаждаемая среда из ПГ в трубном пространстве подается «снизу-вверх», нагреваемая среда в межтрубном пространстве «сверху-вниз») направления вынужденного и свободного (конвекционного) движения среды противоположны. В случае возникновения низких скоростей потока котловой воды указанное явление существенно снижает эффективность теплообменника [8 – 11].

Расчеты проводились с помощью программного комплекса Ansys (теплогидравлический модуль CFX) [12, 13]. Цель проведения расчета – определение скорости теплоносителя в трубках РТО для проектной схемы обвязки теплообменника.

Для оценки скорости в теплообменных трубках регенеративного теплообменника была построена 3D-модель (рис. 3) и проведен теплогидравлический расчет для номинального режима работы РТО (расход 140 т/ч). Конфигурация обвязки РТО проектная – подвод горячей воды из ПГ в трубки – «снизу-вверх».

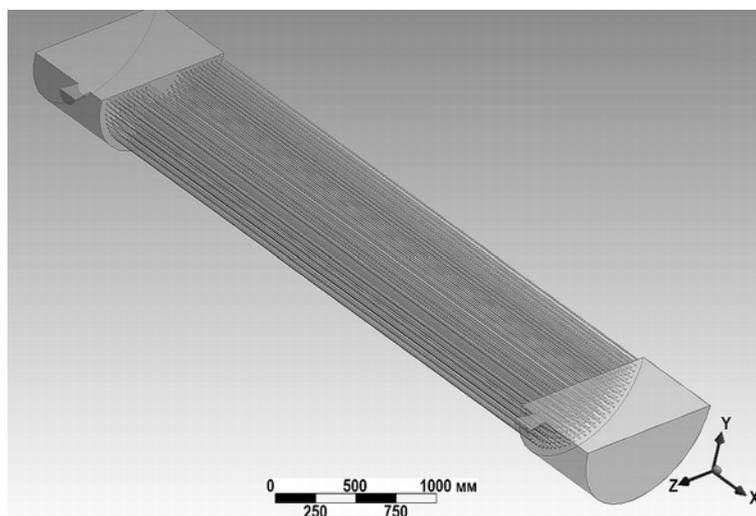


Рис. 3. 3D-модель регенеративного теплообменника

Результаты расчета показали, что средняя скорость в трубках РТО составляет не более 0,47 м/с.

Расчет, в котором подвод горячей воды из ПГ в трубки РТО осуществляется «сверху-вниз» (т.е. схема подключения обвязки РТО противоположная проектной, предлагаемая авторами), показал, что средняя скорость в трубках РТО составит 0,7 м/с.

Результаты расчетов подтвердили предположения о влиянии схемы подключения обвязки РТО на его эффективность.

ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ ПГ ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБВЯЗКИ РТО НА БЛОКЕ № 1 НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

Предложенный вариант переподключения обвязки РТО был принят к реализации первоначально на блоке № 2 НВ АЭС-2 ещё во время монтажа системы продувки, а после подтверждения ожидаемого результата во время ПНР системы применен в апреле 2020 г. на блоке № 1 НВ АЭС-2 (рис. 4).

Изменение направления потока охлаждаемой и нагреваемой среды повышает эффективность теплообменника (рис. 5 – 7), а также способствует вымыванию шлама из теплообменных трубок в нижнюю камеру.

На рисунках 5 – 7 представлены результаты сравнительного анализа с проектными данными работы РТО (перепады температуры Δt в трубном и межтрубном пространствах в зависимости от расходов среды) системы продувки ПГ блока № 1 НВ АЭС-2 до модернизации и блоков № 1, № 2 после модернизации. Измерение температуры и расходов среды проводилось штатными технологическими (проектными) средствами (термопары и расходомерные шайбы), при этом погрешность измерения для температуры составила не более $\pm 2,0\%$, для расхода – не более $\pm 4,5\%$.

На основании рис. 5 – 7 можно сделать вывод, что при текущей конфигурации обвязки РТО на блоке № 1 (после модернизации) параметры РТО в полной мере соответствуют как расчётным (проектным) значениям, так и параметрам РТО на блоке № 2.

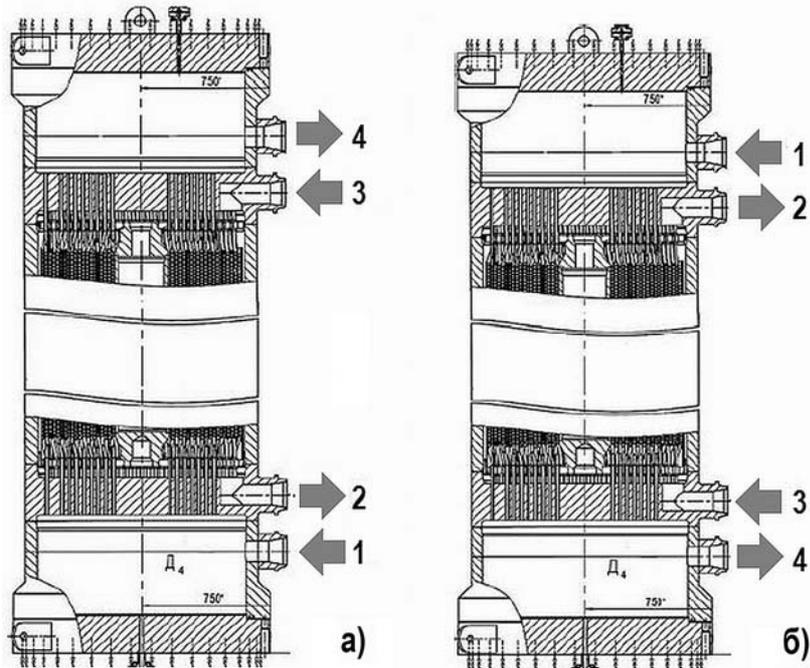


Рис. 4. Обвязка РТО системы продувки ПГ: а) – до модернизации на блоке № 1 НВ АЭС-2; б) – после модернизации в 2020 г. на блоках № 1 и № 2 НВ АЭС-2 (1 – подача охлаждаемого теплоносителя из ПГ в РТО; 2 – подача охлажденного теплоносителя из РТО в доохладитель продувки и далее на СВ0-5; 3 – подача очищенного теплоносителя от СВ0-5 на нагрев в РТО; 4 – возврат очищенного и нагретого теплоносителя от РТО в ПГ)

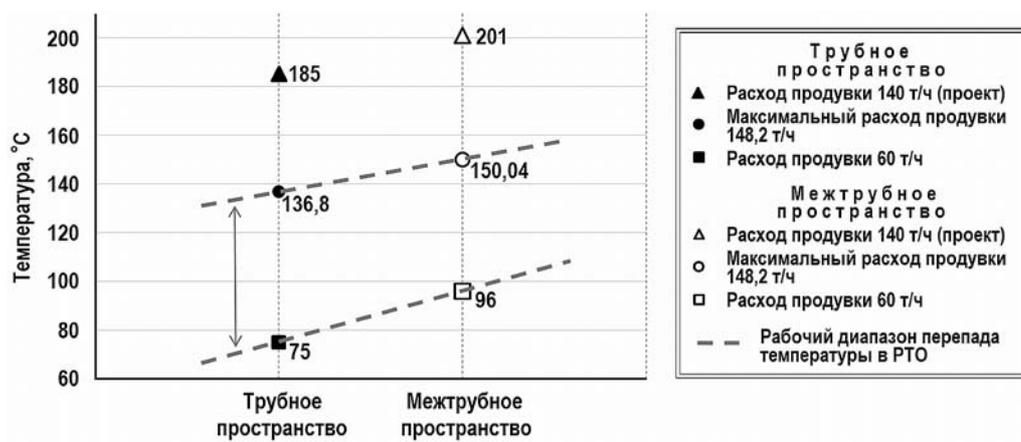


Рис. 5. Перепад температуры Δt в трубном и межтрубном пространствах РТО на блоке № 1 НВ АЭС-2 до модернизации

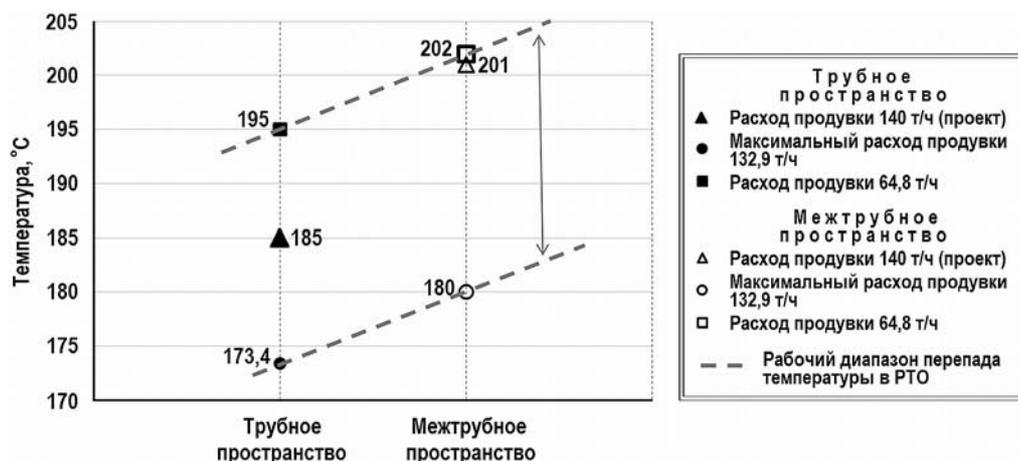


Рис. 6. Перепад температуры Δt в трубном и межтрубном пространствах РТО на блоке № 1 НВ АЭС-2 после модернизации в ППР-2020

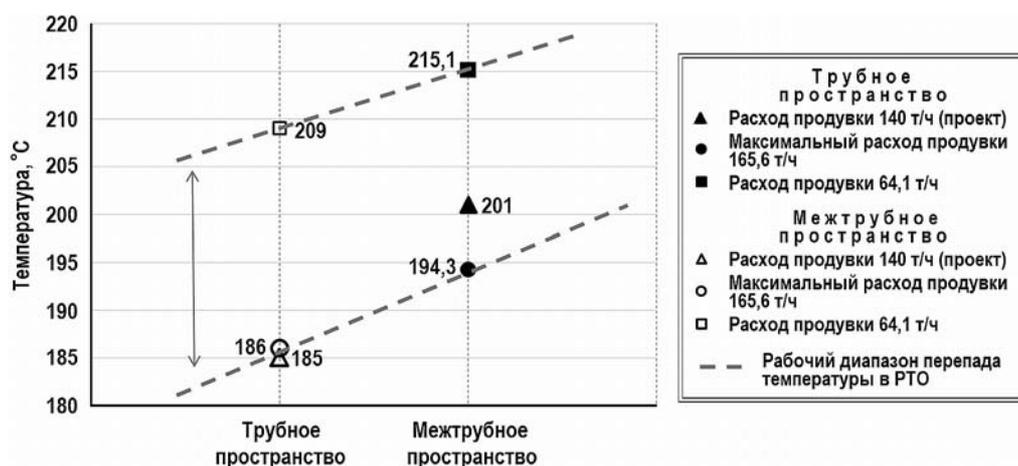


Рис. 7. Перепад температуры Δt в трубном и межтрубном пространствах РТО на блоке № 2 НВ АЭС-2

Результаты испытаний новой конфигурации подключения РТО на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 показали, что РТО блока обеспечивает максимально приближенные к проектным (расчётным) данным перепады температуры на трубном и межтрубном пространствах.

ВЫВОДЫ

Пусковые и наладочные работы системы продувки ПГ блока № 1 Нововоронежской АЭС-2 выявили недостаточную эффективность РТО с точки зрения обеспечения температурных перепадов в трубном и межтрубном пространстве

С учётом ПНР РТО системы продувки ПГ блока № 1 по предложениям авторов статьи (с подтвержденным теплогидравлическим расчетом теплообменника), и рекомендаций разработчиков системы и завода-изготовителя РТО на блоке № 2 было выполнено переподключение трубопроводов обвязки РТО так, чтобы охлаждаемая среда из ПГ в трубном пространстве подавалась «сверху-вниз», а нагреваемая среда в межтрубном пространстве — «снизу-вверх» (вынужденное и конвекционное движения среды совпадают).

Результаты испытаний данной конфигурации подключения РТО на блоке № 2 выявили, что РТО блока обеспечивает максимально приближенные к проектным (расчётным) данным перепады температуры на трубном и межтрубном пространстве.

Испытания новой конфигурации подключения РТО на блоке № 1 показали:

– РТО также обеспечивает максимально приближенные к проектным (расчётным) данным перепады температуры на трубном и межтрубном пространстве;

– ожидаемый (расчётный) результат от модернизации РТО подтвердился.

Изменение схемы подключения регенеративного теплообменника позволило

– снизить температурный перепад между трубопроводами питательной воды и патрубками возврата продувочной воды в ПГ;

– снизить тепловую нагрузку на доохладитель продувки, и, как следствие, снизить тепловую нагрузку на систему промежуточного контура потребителей нормальной эксплуатации;

– обеспечить проектные режимы работы систем продувки ПГ и промконтура потребителей нормальной эксплуатации.

По данным результатам испытаний было принято решение о модернизации обвязки РТО на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Литература

1. Яуров С.В., Галиев К.Ф., Боровой А.В., Вольнов А.С. Опыт ввода в эксплуатацию системы продувки парогенераторов проекта АЭС-2006 (РУ В-392М). // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 151-161. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2017.3.14>.

2. Вольнов А.С., Боровой А.В., Гончаров Е.В., Яуров С.В. Ввод в эксплуатацию системы продувки парогенераторов проекта АЭС-2006 (РУ В-392М). Предложения по модернизации. / Сб. тез. докл. XIII Международной научно-практической конференции по атомной энергетике. – Севастополь: СГУ, 2017. – С. 56-57.

3. Яуров С.В., Боровой А.В., Данилов А.Д. Математическое моделирование гидравлических процессов в коллекторной схеме объединения трубопроводов системы продувки парогенераторов энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 134-145. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2021.3.11>.

4. РБ-002-16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. «Водно-химический режим атомных станций». – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – С. 13.

5. Щелик С.В., Шестаков Н.Б., Богомолов И.Н. Выбор и оптимизация режима продувки парогенераторов Калининской АЭС. // Сб. тр. ФГУП ОКБ «Гидропресс». – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2006. – С. 37-45.

6. Лукаевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 391 с.

7. Жуков А.Г., Лукашов Ю.Ю. Прогрессивные концепции оптимизации технологических систем продувки парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (153). – С. 51-54.

8. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. Учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

9. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов, 5-е изд. – М.: ИздАТ, 1994. – 288 с.

10. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 318 с.

11. Андрущечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.

12. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в Ansys Workbench. – Самара: СГТУ, 2010. – 271 с.

13. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособ. – СПб.: СПбПУ, 2009. – 143 с.

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.

Авторы

Яуров Сергей Васильевич, ведущий инженер по управлению реактором

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Боровой Андрей Владимирович, ведущий инженер по эксплуатации
E-mail: BorovoyAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Юдин Андрей Владимирович, ведущий инженер по ремонту
E-mail: YudinAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Болгов Михаил Владимирович, заместитель начальника цеха по ремонту
E-mail: BolgovMV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Данилов Александр Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор
E-mail: danilov-ad@yandex.ru

UDC 621.039

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE REGENERATIVE HEAT EXCHANGER OF THE STEAM GENERATOR PURGE SYSTEM OF THE NPP-2006 PROJECT (RU V-392M)

Yaurov S.V. *, Borovoy A.V. *, Yudin A.V. *, Bolgov M.V. *, Danilov A.D. **

* Branch of «Concern Rosenergoatom», Novovoronezh Nuclear Power Plant
1 Industrial zone Yuzhnaya, 396072 Novovoronezh, Voronezh Reg., Russia

** Voronezh State Technical University

84 20-letiya Oktyabrya Str., 394006 Voronezh, Voronezh Reg., Russia

ABSTRACT

The design and operating modes of the regenerative heat exchanger (RHE) of the purge and drainage system of steam generators of power units No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2 (AES-2006 project) are considered.

The results of mathematical modeling of the operating modes of the heat exchanger in order to identify the causes of low efficiency are presented.

Based on the results of the commissioning of the purge and drainage system of the steam generators of the Novovoronezh NPP-2 unit No. 1, as well as the thermohydraulic calculations of the RHE operating modes, the authors of the article put forward assumptions regarding changes in the re-routing of the strapping pipelines [1 – 3]. At unit No. 2 of Novovoronezh NPP-2, the RHE binding was upgraded according to the proposals of the authors of the article.

The modernization in the RHE binding was implemented first at unit No. 2 at the installation stage of the systems, and after confirming the expected result, it was applied in April 2020 at unit No. 1 of Novovoronezh NPP-2.

A comparative analysis of the test results of the thermohydraulic characteristics of regenerative heat exchangers of the purge and drainage system for unit No. 1 (before modernization, after modernization in 2020) and unit No. 2 of Novovoronezh NPP-2 is presented.

These improvements made it possible to achieve a more efficient RHE of the purge and drainage system of steam generators and the system as a whole.

Key words: AES-2006, purge, steam generator, modernization, regenerative heat exchanger, strapping, re-routing, RU V-392M, operation.

REFERENCES

1. Yaurov S.V., Galiev K.F., Borovoy A.V., Volnov A.S. Experience of Commissioning the AES-2006 Design (V-392M Reactor Plant) Steam Generator Blowdown System. *Izvestiya*

vuzov. *Yadernaya Energetika*. 2017, no. 3, pp. 151-161; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.14> (in Russian).

2. Volnov A.S., Borovoy A.V., Goncharov E.V., Yaurov S.V. Commissioning of the Steam Generator Purge System of the NPP-2006 Project (RU V-392M). Upgrade Proposals. *Proc. of the XIII-th International Scientific and Practical Conference on Nuclear Energy*. Sevastopol. Sevastopol'sky Gosudatstvenny Universitet Publ., 2017, pp. 56-57 (in Russian).

3. Yaurov S.V., Borovoy A.V., Danilov A.D. Mathematical Modeling of Hydraulic Processes in the Collector Scheme of Connection of Pipelines of the Steam Generator Purge System of the Novovoronezh NPP-2 Power Unit No. 1. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 3, pp. 134-145; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.3.11> (in Russian).

4. RB-002-16. *Safety Guide in the Area of Atomic Energy Use. Water-Chemical Regime of Nuclear Power Plants*. Moscow. NTC YaRB FBU Publ., 2016, 13 p. (in Russian).

5. Shchelik S.V., Shestakov N.B., Bogomolov I.N. Selection and Optimization of the Purge Mode of the Kalinin NPP Steam Generators. In *Proc. of the OKB Gidropress JSC 2006*. Podolsk. OKB Gidropress JSC Publ., 2006, pp. 37-45 (in Russian).

6. Lukasevich B.I., Trunov N.B., Dragunov Yu.G., Davidenko S.E. *Steam Generators of VVER Reactor Installations for Nuclear Power Plants*. Moscow. IKTs Akademkniga Publ., 2004, 391 p. (in Russian).

7. Zhukov A.G., Lukashov Yu.Yu. Progressive Concepts of Optimization of Technological Systems for Purging Steam Generators of Nuclear Power Plants with VVER-1000. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazsky Region. Tekhnicheskie Nauki*. 2010, no. 1, pp. 51-54 (in Russian).

8. Rassokhin N.G. *Steam Generator Sets of Nuclear Power Plants. Textbook for Universities*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 384 p. (in Russian).

9. Margulova T.Kh. *Nuclear Power Plants. Textbook for Universities*. Moscow. IzdAT Publ., 1994, 288 p. (in Russian).

10. Trunov N.B., Logvinov S.A., Dragunov Yu.G. *Hydrodynamic and Thermochemical Processes in Steam Generators of Nuclear Power Plants with VVER*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2001. 318 p. (in Russian).

11. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Y., Generalov V.N., Kosourov K.V., Semchenkov Yu.M., Ukraintsev V.F. *NPP with VVER-1000 Type Reactor. From Physical Basics of Exploitation to Evolution Design*. Moscow. Logos Publ., 2010, 604 p. (in Russian).

12. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering Analysis in Ansys Workbench*. Samara. Samarsky Gosudatstvenny Tekhnicheskyy Universitet Publ., 2010, 271 p. (in Russian).

13. Snegirev A.Yu. *High-Performance Computing in Technical Physics. Numerical Modeling of Turbulent flows: Textbook*. St.Petersburg. SPbPU Publ., 2009, 143 p. (in Russian).

Authors

Yaurov Sergey Vasilievich, Lead Reactor Control Engineer

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Borovoy Andrey Vladimirovich, Lead Engineer for Technical Operation and Repair

E-mail: BorovoyAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Yudin Andrey Vladimirovich, Lead Engineer for Technical Operation and Repair

E-mail: YudinAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Bolgov Mikhail Vladimirovich, Deputy Head of Operations Department

E-mail: BolgovMV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Danilov Aleksandr Dmitrievich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: danilov-ad@yandex.ru