

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОЛЛЕКТОРНОЙ СХЕМЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКА № 1 НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

**С.В. Яуров\*, А.В. Боровой\*, 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*



Предлагается к рассмотрению одно из направлений модернизации системы продувки парогенераторов энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2, основанное на полученном опыте ввода в эксплуатацию системы в 2016 г. [1, 2].

Представлены результаты математического моделирования гидравлики трубопроводов из карманов коллекторов парогенераторов (ПГ) системы продувки, объединяющихся в один коллектор. Все расчеты проводились в теплогидравлическом модуле CFX программного комплекса Ansys [3, 4]. Ansys CFX базируется на решении методом контрольных объемов уравнений Навье-Стокса, а в качестве входных геометрических (конструкционных) данных используется сеточное разбиение области течения.

Результаты расчета показали значительную неравномерность распределения расходов продувочной воды из карманов коллекторов ПГ за счет применения в составе технологической схемы коллектора, в который объединяются трубопроводы продувки (коллектор продувки).

Расчеты симметричной схемы объединения трубопроводов продувки выявили её преимущество по сравнению с коллекторной схемой; неравномерность распределения расходов продувочной воды из карманов коллекторов ПГ отсутствует.

Предлагается

– исключить из состава системы продувки ПГ коллекторную схему объединения трубопроводов и применить симметричную;

– применить в составе технологической схемы многоходовые краны позиционного регулирования вместо электромагнитных и электроприводных клапанов (альтернатива симметричной схемы).

Указанные доработки позволят обеспечить равномерный вывод окислов железа из карманов парогенераторов.

Переделка коллекторов продувки парогенераторов и (или) установка многоходовых кранов могут быть также выполнены на энергоблоках с парогенераторами ПГВ-1000М.

**Ключевые слова:** парогенератор, продувка, эксплуатация, карман коллектора парогенератора, эксплуатация, электромагнитный клапан, модернизация, водно-химический режим, коллектор продувки.

## ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОДУВКИ И ДРЕНАЖЕЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Система продувки и дренажей парогенераторов (ПГ) по второму контуру предназначена для вывода части «котловой» воды из парогенератора на очистку и возврат её после очистки назад в ПГ [6 – 9], а также для поддержания водно-химического режима второго контура [5]. Состав системы продувки ПГ энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 [1, 2] представлен на рис. 1.

Подробное описание системы продувки парогенераторов, её преимуществ, недостатков, а также сравнение с системой продувки серийных блоков с реакторами ВВЭР представлены в [1, 2].

Как показал опыт эксплуатации системы продувки парогенераторов на действующих АЭС с реакторами ВВЭР, в сварном соединении № 111 (зона приварки горячего коллектора ПГ к патрубку ГЦТ) возможно появление трещин, первопричиной которых является образование коррозионного повреждения металла вследствие протекания активных коррозионных процессов. Трещиноподобные дефекты значительной протяженности и высоты, в том числе и сквозные, к настоящему времени (период 1998 – 2014 гг.) обнаружены на десяти ПГ АЭС с ВВЭР [10 – 12].

Одно из направлений решения данной проблемы является организация непрерывного отвода (продувки) теплоносителя второго контура на очистку из карманов ПГ [13 – 16].

В проекте АЭС-2006 (РУ В-392М) предусматривается проведение продувки из карманов ПГ в режиме непрерывной продувки – до 5 м<sup>3</sup>/ч, в режиме периодической продувки – до 20 м<sup>3</sup>/ч (максимальный общий расход продувки 140 м<sup>3</sup>/ч с четырех ПГ).

Трубопроводы продувки из карманов ПГ объединены в один коллектор (см. рис. 1) по классической схеме [17 – 20]. Для организации периодической продувки по каждому трубопроводу индивидуально предназначены электромагнитные клапаны (ЭМК), на каждом трубопроводе по одному ЭМК. Для организации периодической продувки по одному трубопроводу, входящему в коллектор, достаточно перевести в положение «закрыто» три ЭМК из четырех.

Авторами предлагается заменить коллекторную схему объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ на симметричную.

Предлагается использовать вместо электромагнитных и электроприводных клапанов продувки из карманов ПГ краны позиционного регулирования с МЭО (альтернатива симметричной схемы).

## КОЛЛЕКТОРНАЯ СХЕМА ОБЪЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Модель коллектора, предназначенного для объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ в проекте АЭС-2006 (РУ В-392М) блока № 1 Нововоронежский АЭС-2 представлена на рис. 2. Данная 3D-модель вошла в основу для построения расчетной области, при этом расчетная сетка включала в себя 101107 элементов.

Для оценки распределения расходов теплоносителя через трубки Ду 32 за счет присутствия в технологической схеме коллектора был проведен оценочный гидравлический расчет коллектора продувки. Расчет проводился для режимов непрерывной (5 м<sup>3</sup>/ч) и периодической продувки (20 м<sup>3</sup>/ч).

При проведении расчета в качестве граничных условий принималось давление на входе в коллектор (из карманов ПГ) 7,0 МПа, расход на выходе из коллектора 5 м<sup>3</sup>/ч

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

(вариант расчета для режима непрерывной продувки), расход на выходе из коллектора 20 м<sup>3</sup>/ч (вариант расчета для режима периодической продувки), температура воды 285°С. В качестве модели турбулентности выбрана *k-ε*-модель.

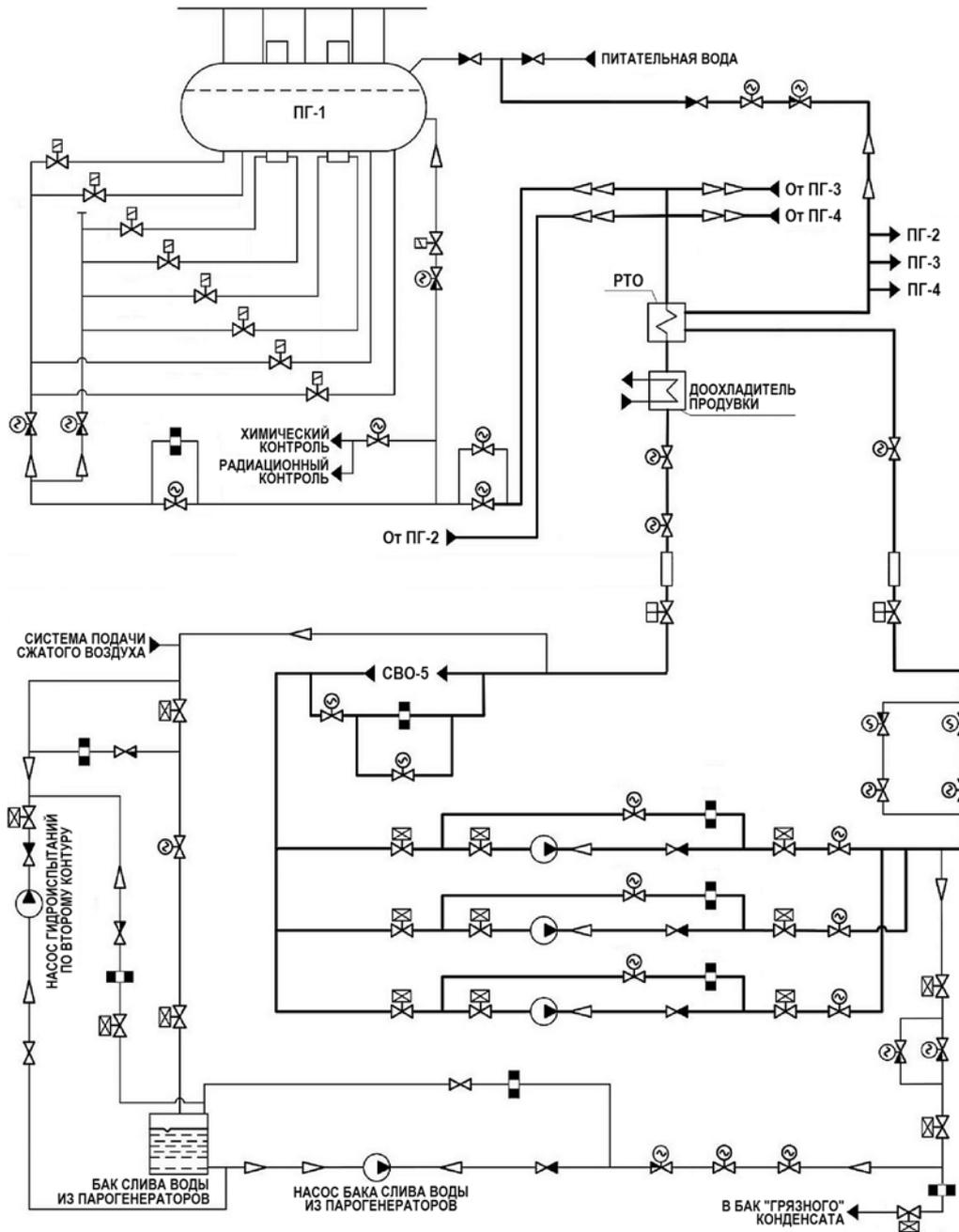


Рис. 1. Состав системы продувки и дренажей ПГ энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2

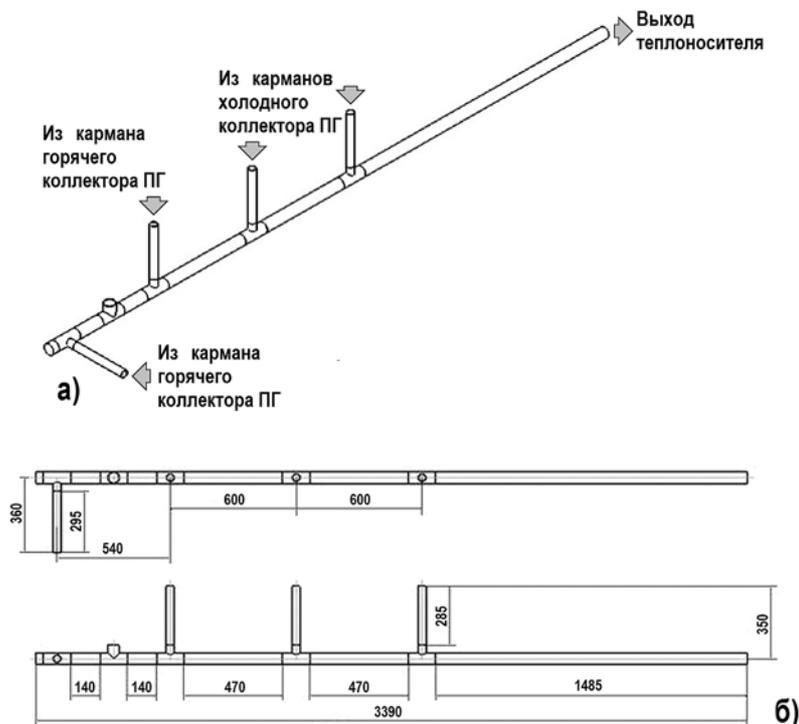


Рис. 2. Модель коллектора продувки из карманов ПГ(коллекторная схема объединения трубопроводов): а) – 3D-модель; б) – геометрические размеры модели

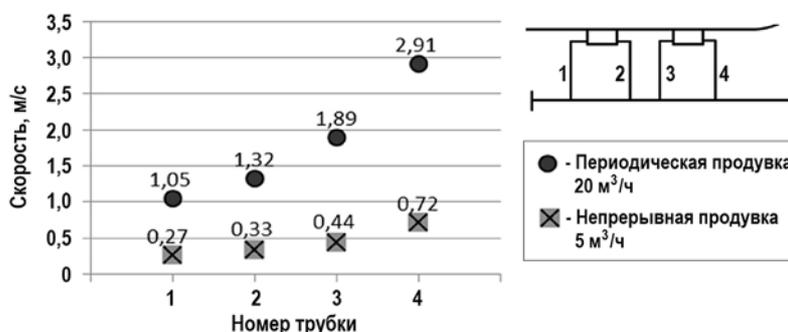


Рис. 3. Распределение скорости теплоносителя в коллекторе продувки из карманов ПГ (коллекторная схема объединения трубопроводов) для режимов непрерывной и периодической продувки

Результат распределения скоростей теплоносителя для коллекторной схемы объединения трубопроводов продувки показан на рис. 3.

Стоит отметить, что расход теплоносителя в коллекторе трубопроводов карманов ПГ варьируется как 1/2,7 для режима непрерывной продувки и 1/2,8 для режима периодической продувки.

Приведенные расчеты справедливы для начального периода эксплуатации. В дальнейшем, как показывает опыт, в трубопроводе с наименьшим расходом и скоростью движения среды происходит накопление шлама (так называемое зарастание). Вследствие этого скорость движения среды в трубопроводе продолжает снижаться вплоть до полного прекращения расхода через данный трубопровод, после чего зарастание начинается в одном из трех оставшихся трубопроводов с наименьшим расходом. В конечном итоге, если не принять меры по продувке обратным то-

ком и промывке трубопроводов в период ППР, вся продувка из кармана одного коллектора ПГ будет осуществляться через один трубопровод (вместо двух).

### СИММЕТРИЧНАЯ СХЕМА ОБЪЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Исходя из полученного результата теплогидравлического расчета течения теплоносителя в коллекторной схеме продувки карманов ПГ предлагается симметричная схема объединения трубопроводов продувки карманов (рис. 4). Выбор данной схемы обусловлен предположением естественного обеспечения равномерности расходов продувки из карманов ПГ. 3D-модель симметричной схемы вошла в основу для построения расчетной области, расчетная сетка включает в себя 122336 элементов. Расчет проводился для режима непрерывной продувки (расход  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и режима периодической продувки (расход  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

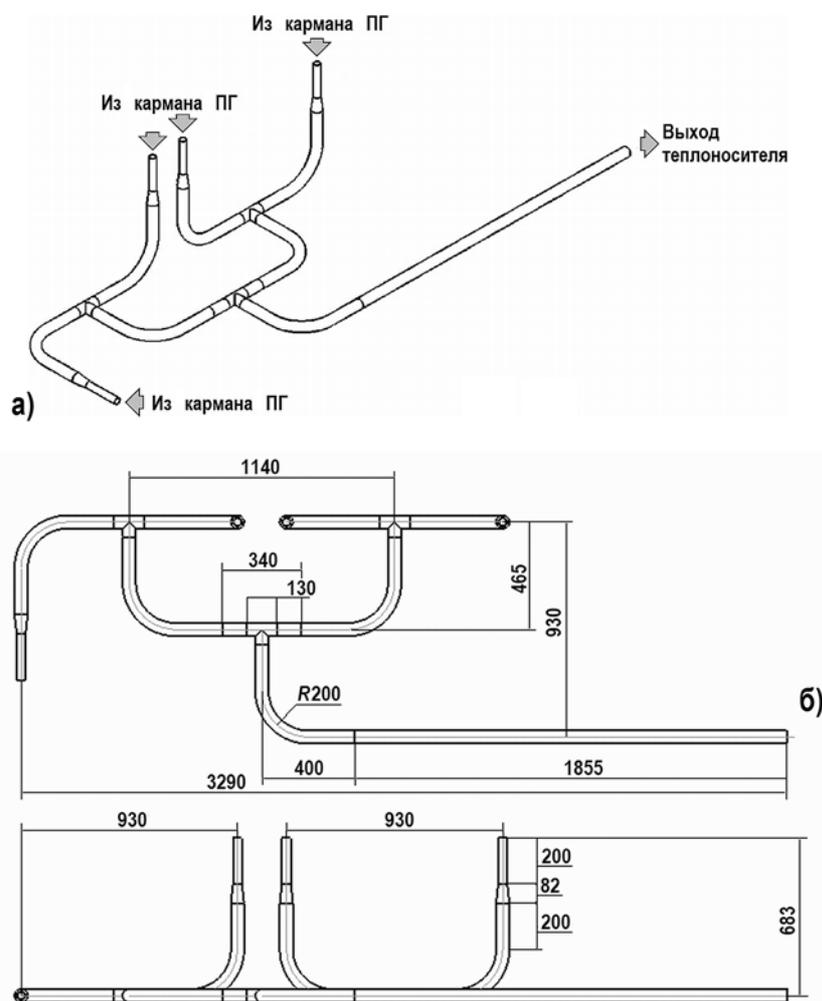


Рис. 4. Модель симметричной схемы объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ: а) – 3D-модель; б) – геометрические размеры модели

При проведении расчета в качестве граничных условий принималось давление на входе модели симметричной схемы (из карманов ПГ)  $7,0 \text{ МПа}$ , расход на выходе из модели  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (вариант расчета для режима непрерывной продувки), расход на выходе из модели  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  (вариант расчета для режима периодической продувки),

температура воды 285°C. В качестве модели турбулентности выбрана *k-ε*-модель.

Результаты расчета для симметричной схемы объединения трубопроводов продувки приводятся на рис. 5.

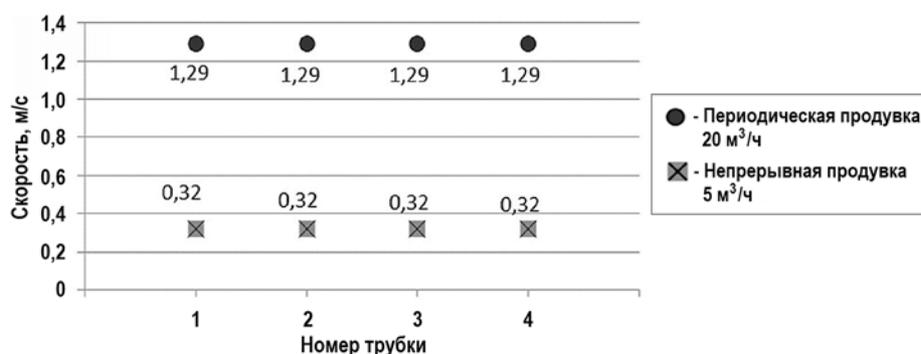


Рис. 5. Распределение скорости теплоносителя в симметричной схеме объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ для режимов непрерывной и периодической продувки

Гидравлический расчет для данной схемы объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ показал равномерное распределение расходов теплоносителя по трубопроводам из карманов ПГ, что является неоспоримым преимуществом по сравнению с «коллекторной» схемой объединения трубопроводов продувки особенно в случаях выхода из строя ЭМК.

### МНОГОХОДОВОЙ КРАН ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С МЕХАНИЗМОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ОДНОБОРОТНЫМ

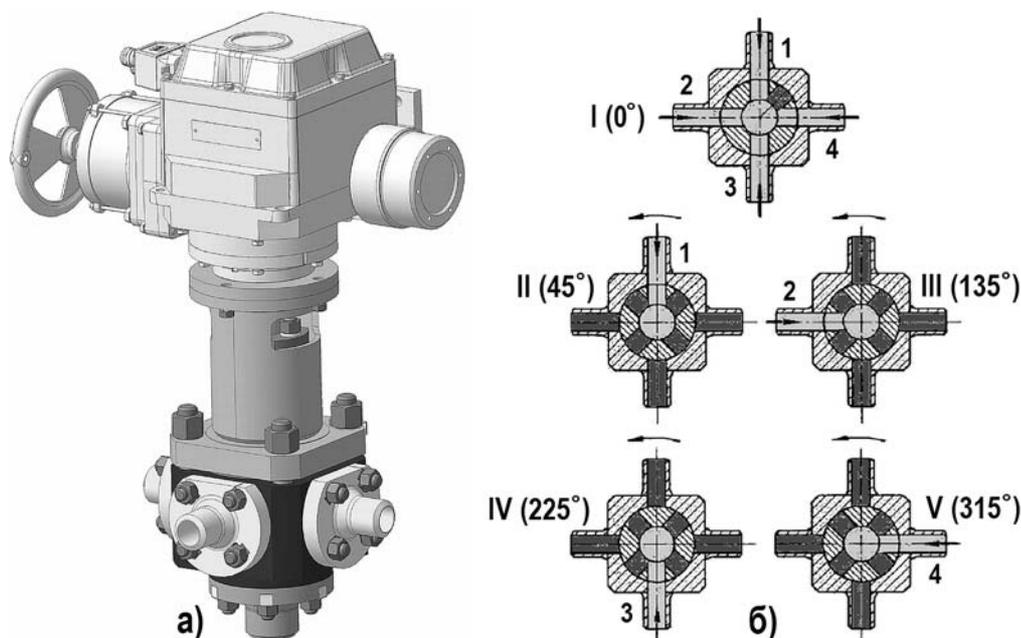


Рис. 6. Конструкция многоходового крана позиционного регулирования с механизмом электрическим однооборотным: а) — 3D-модель крана; б) — режимы (положения) работы крана

Симметричная схема объединения трубопроводов продувки имеет преимущество по сравнению с коллекторной схемой как в случае работы системы в режиме непрерывной продувки, так и в случае отказа (поломки) ЭМК при работе системы в ре-

жиме периодической продувки. Однако сама по себе она не решает проблемы низкой надежности и недостаточного ресурса ЭМК (5000 циклов) и электроприводов арматуры (3000 циклов). Для обеспечения требований ОКБ «Гидропресс» по организации периодической продувки целесообразно рассмотреть устройство – многоходовой кран позиционного регулирования с механизмом электрическим однооборотным (рис. 6). Описание идеи конструкции многоходового крана [1, 2] авторы представили в 2017 г. Позднее была выполнена разработка конструкции совместно со специалистами АО «ЦКБМ».

Теплоноситель по четырем трубкам из карманов ПГ попадает в корпус крана, внутри корпуса крана имеется поворотная цилиндрическая пробка с шестью отверстиями. Пять входных отверстий Ду 32 расположены горизонтально (четыре отверстия взаимно перпендикулярны, одно отверстие находится под углом 45 градусов). Выходное отверстие Ду 50 направлено вертикально вниз. Теплоноситель, проходя через отверстия в пробке, выходит через выходной патрубок в корпусе.

Пробка приводится в движение механизмом электрическим однооборотным (МЭО); один такой кран заменяет четыре ЭМК.

Кран имеет пять положений (рис. 6 б). В положении I расход организован через все четыре трубки – данное положение предназначено для организации постоянной продувки со всех четырех трубок карманов коллектора ПГ. В положениях II – V расход организован по одной из трубок (данное положение предназначено для организации периодической продувки с одной из трубок карманов коллектора ПГ).

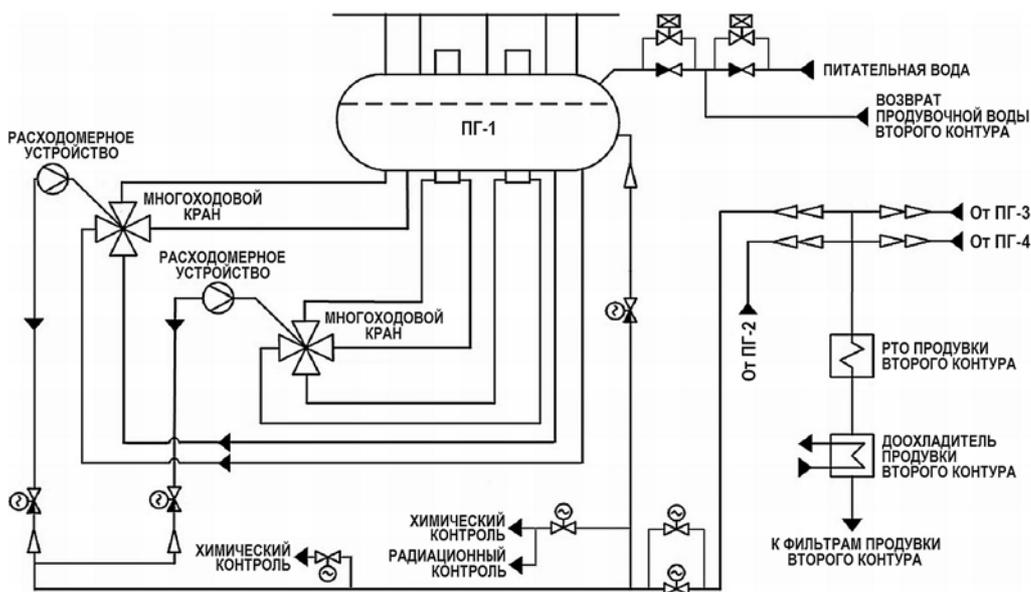


Рис. 7. Технологическая схема системы продувки и дренажей парогенераторов с применением многоходового крана позиционного регулирования с МЭО

Схема продувки ПГ, имеющая в своем составе краны с МЭО, показана на рис. 7.

Для определения эффективности работы многоходового крана позиционного регулирования с МЭО был проведен гидравлический расчет на предмет определения неравномерности расходов по трубопроводам продувки из карманов коллектора ПГ. При проведении расчета в качестве граничных условий принималось давление на входе модель симметричной схемы (из карманов ПГ) 7,0 МПа, расход на выходе из модели 5 м<sup>3</sup>/ч (вариант расчета для режима непрерывной продувки), расход на выходе из модели 20 м<sup>3</sup>/ч (вариант расчета для режима периодической продувки),

температура воды 285°С. В качестве модели турбулентности использовалась  $k$ -модель. Расчет проводился для режима непрерывной и периодической продувки.

Для организации продувки из карманов коллектора ПГ достаточно одного крана на каждый парогенератор.

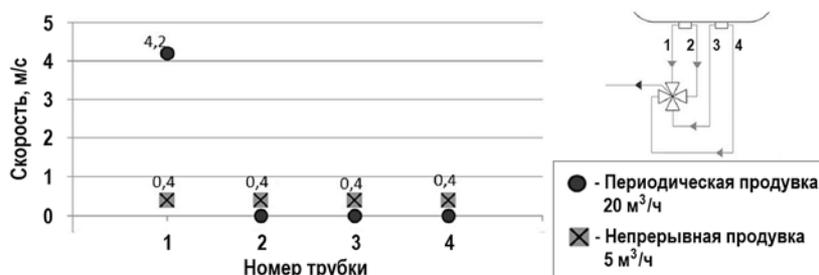


Рис. 8. Распределение скорости теплоносителя с многоходовым краном позиционного регулирования в трубопроводах продувки из карманов ПГ для режимов непрерывной и периодической продувки

Анализ полученных результатов показал (рис. 8), что в режиме, когда все четыре трубопровода из кармана ПГ открыты (режим непрерывной продувки), распределение расходов равномерное, не зависящее от суммарного расхода из карманов коллектора ПГ. Характер распределения расходов схож с распределением расходов, полученных для симметричной схемы объединения трубопроводов продувки из карманов ПГ. Переход крана в режим периодической продувки (продувается одна трубка) приводит к более эффективной организации продувки котловой ПГ из карманов коллекторов по сравнению со схемным решением в проекте АЭС-2006 (РУ 392М).

## ВЫВОДЫ

Проведен гидравлический расчет коллектора продувки, в который объединяются трубопроводы системы продувки из карманов коллекторов ПГ. Расчетным образом определено, что расход теплоносителя в коллекторе трубопроводов карманов ПГ варьируется как 1 к 2,7 для режима непрерывной продувки и 1 к 2,8 для режима периодической продувки, т.е. наблюдается неравномерный вывод шлама из карманов ПГ.

Предложена альтернатива коллектору продувки – симметричная схема объединения трубопроводов продувки. Гидравлический расчет показал равномерное распределение расходов теплоносителя по трубопроводам из карманов ПГ, т.е. наблюдается равномерный вывод котловой воды из карманов ПГ. Это является неоспоримым преимуществом по сравнению с коллекторной схемой.

Также предложена конструкция многоходового крана позиционного регулирования, позволяющая исключить как коллекторную схему объединения трубопроводов, так и симметричную. Гидравлический расчет такого крана показал результаты, аналогичные симметричной схеме, однако у таких кранов имеется преимущество (восемь кранов на четыре ПГ вместо 36-ти арматур, применённых в проекте). Из недостатков стоит отметить потребность в проведении испытаний кранов с МЭО, так как отсутствует опыт их использования на Российских АЭС.

## 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.
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 модерни-

зации. / Сб. тез. докл. XIII Международной научно-практической конференции по атомной энергетике. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2017. – С. 56-57.

3. Буряка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в Ansys Workbench. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 271 с.

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

5. Установка реакторная В-392М. Нормы водно-химического режима второго контура парогенератора. 392М Д14. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007. – 21 с.

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

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

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

10. Поваров В.П. Анализ повреждаемости сварных швов №111 ПГВ-1000 и предложения по их устранению. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 28-38.

11. Нетяга Н.Н., Саакян С.П., Поваров В.П. Оценка рисков повреждения узла приварки коллектора к патрубку ПГ АЭС с ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 31-43.

12. Бакиров М.Б., Киселев А.С., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. Анализ эксплуатационной нагруженности узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М при нестационарных термосиловых воздействиях. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. – № 6. – С. 111-117.

13. Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф. Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне сварного соединения № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 3-12.

14. Бакиров М.Б., Поваров В.П., Громов А.Ф., Левчук В.И. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 15-24.

15. Бакиров М.Б., Еремин А.А., Левчук А.С., Поваров В.П., Громов А.Ф. Разработка технологии непрерывного контроля целостности металла в критических зонах оборудования АЭС ультразвуковым методом. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 6 – С. 60-67.

16. Поваров В.П., Саакян С.П., Чепурко В.А. Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР. // Вестник кибернетики. – 2017. – № 2 (26). – С. 24-31.

17. 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.

18. Сиряпина Л.А., Маргулова Т.Х. Повышение эффективности продувки парогенераторов АЭС с ВВЭР. // Теплоэнергетика. – 1984. – № 2. – С. 59-60.

19. 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.

20. *Бабич А.Ю., Горяев Е.Ю., Грушкин А.Н., Князев Р.А., Матвеев М.В., Никитин Б.Ю., Новиков А.Ю., Петров А.Р., Пономарева Т.В., Рыжов С.Н., Саитов Р.Р., Тимшина Д.К., Чудинова В.А., Агафонова Н.Д.* Выбор оптимальной конструкции парогенератора для блока ВВЭР-1200: сравнение характеристик парогенератора в 4- и 2-петлевой компоновке. / Сб. «Неделя науки СПбПУ Материалы научного форума с международным участием». – СПб.: Институт энергетики и транспортных систем, 2015. – С. 123-125.

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

#### **Авторы**

Яуров Сергей Васильевич, ведущий инженер по управлению реактором  
E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

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

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

UDC 621.039

### **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**

Yaurov S.V. \*, Borovoy A.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 article proposes to consider one of the directions of modernization of the steam generator purge system of the Novovoronezh NPP-2 power unit No. 1, based on the experience of putting the system into operation in 2016 [1, 2].

The results of mathematical modeling of the hydraulics of pipelines from the pockets of the collectors of steam generators (SG) of the purge system, combined in one collector, are presented. The calculations were performed in the thermohydraulic CFX module of the Ansys software package [3, 4].

Ansys CFX is based on the solution of the Navier-Stokes equations by the control volume method, and a grid partition of the flow region is used as the input geometric (structural) data.

The results of the calculation showed a significant unevenness in the distribution of purge water consumption from the pockets of the SG collectors due to the use of a collector in the technological scheme, which combines the purge pipelines (purge collector).

Calculations of the symmetric scheme of connection of purge pipelines revealed its advantage in comparison with the collector scheme, there is no unevenness in the distribution of purge water flows from the pockets of the SG collectors.

The authors suggest:

1) to exclude the collector scheme of connection of pipelines from the structure of the system of purging of PG and to apply the symmetric scheme of connection of

pipelines.;

2) use multi-way position control valves as part of the technological scheme instead of electromagnetic and electric drive valves (an alternative to the symmetrical scheme).

These improvements will ensure the uniform removal of iron oxides from the pockets of steam generators.

Modification of steam generator purge collectors and / or installation of multi-pass cranes can also be performed on power units with PGV-1000M steam generators.

**Key words:** steam generator, purge, operation, steam generator collector pocket, operation, electromagnetic valve, modernization, water-chemical regime, purge collector.

#### 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 (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. Sevastopolsky Gosudatstvennyy Universitet Publ., 2017, pp 56-57 (in Russian).
3. Buryaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering Analysis in Ansys Workbench*. Samara. Samarsky Gosudatstvennyy Tekhnichesky Universitet Publ., 2010, 271 p. (in Russian).
4. Snegirev A.Yu. *High-Performance Computing in Technical Physics. Numerical Modeling of Turbulent flows: Textbook*. St.Petersburg. SPbPU Publ., 2009, 143 p. (in Russian).
5. *Reactor Installation V-392M. Norms of Water-Chemical Regime of the Second Circuit of the Steam Generator. 392M D14*. Podolsk. FGUP OKB «Gidropress» Publ., 2007, 21 p. (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. Rassokhin N.G. *Steam Generator Sets of Nuclear Power Plants. Textbook for Universities*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 384 p. (in Russian).
8. 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).
9. Margulova T.Kh. *Nuclear Power Plants. Textbook for Universities*. Moscow. IzdAT Publ., 1994, 288 p. (in Russian).
10. Povarov V.P. Analysis of damage welds No. 111 in the PGV-1000 steam generator and damage repair proposals. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 1, pp. 68-73 (in Russian).
11. Netyaga N.N., Saakyan S.P., Povarov V.P. Assessment of risks of damage of welded joint of manifold and steam generator connection sleeve for NPP with VVER. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 4, pp. 41-43 (in Russian).
12. Bakirov M.B., Kiselev A.S., Levchuk V.I., Povarov V.P., Gromov A.F. Analysis of operational loads in the zone of a steam generator collector to nozzle weld joint considering transient thermally induced force effects. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2014, no. 6, pp. 111-117 (in Russian).
13. Bakirov M.B., Levchuk V.I., Povarov V.P., Gromov A.F. An analysis of factors causing the occurrence of off-design thermally induced force effects in the zone of weld joint No. 111-1 in a PGV-1000M steam generator and recommendations on excluding them. *Teploenergetika*. 2014, v. 61, no. 8, pp. 541-550 (in Russian).
14. Bakirov M.B., Povarov V.P., Gromov A.F., Levchuk V.I. Development of technology for

continuous acoustic-emission monitoring of metal operational damaging of nuclear power plants main equipment. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 3, pp. 15-24 (in Russian).

15. Bakirov M.B., Eremin A.A., Levchuk V.I., Povarov V.P., Gromov A.F. Development of technology of continuous control of integrity of metal in critical zones of the equipment of the NPP by an ultrasonic method. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Severo-Kavkasky Region. Tekhnicheskie Nauki*. 2014, no. 6, pp. 60-67 (in Russian).

16. Povarov V.P., Saakian S.P., Chepurko V.A. Statical data analysis for the header to steam generator pipe welding assembly failures, NPP with VVER type reactors. *Vestnik Kibernetiki*. 2017, no. 2 (26), pp. 24-31 (in Russian).

17. Shchelik S.V., Shestakov N.B., Bogomolov I.N. Selection and optimization of the purge mode of the Kalinin NPP steam generators. In *Sbornik Trudov FGUP OKB «Gidropress» 2006*. Podolsk. FGUP OKB «Gidropress» Publ., 2006, pp. 37-45 (in Russian).

18. Siriapina L.A., Margulova T.Kh. Improving the efficiency of purging steam generators of nuclear power plants with VVER. *Teploenergetika*. 1984, no. 2, pp. 59-60 (in Russian).

19. 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-Kavkasky Region. Tekhnicheskie Nauki*. 2010, no. 1, pp. 51-54 (in Russian).

20. Babich A. Yu., Goryaev E. Yu., Grushkin A. N., Knyazev R. A., Matveev M. V., Nikitin B. Yu., Novikov A. Yu., Petrov A. R., Ponomareva T. V., Ryzhov S. N., Saitov R. R., Timshina D. K., Chudinova V. A., Agafonova N. D. Selection of optimal steam generator design for the VVER-1200 block: comparison of steam generator characteristics in 4- and 2-loops components. *SPbPU Science Week Proceeding of the Scientific Forum with International Participation*. St. Petersburg. Institut Energetiki i Transportnykh Sistem Publ., 2015, pp. 123-125 (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

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

E-mail: danilov-ad@yandex.ru