

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ГЕРМЕТИЧНОЙ ОБОЛОЧКЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ № 1, 2 НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

С.Л. Соловьев*, А.В. Шишов*, В.П. Поваров, С.В. Яуров****

**Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций»*

109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25

***Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»*

396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1



Представлена информация об основных подходах к проектированию системы вентиляции герметичного ограждения (ГО) энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 (проект АЭС-2006).

Авторами статьи разработана CFD-модель герметичного ограждения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2, включающая в себя основные строительные элементы и основное оборудование, расположенное в границах ГО.

Выполнена серия замеров температуры воздуха ГО при работе энергоблоков на мощности. По результатам измеренных значений температуры проведена серия расчетов с целью определения поля температуры воздуха внутри ГО.

Выявлено, что при обеспечении проектных характеристик по холодопроизводительности ступеней систем вентиляции достигаются проектные показатели температуры воздуха в ГО, стен и оборудования. Кроме того, при надлежащем перемешивании воздуха в ГО можно существенно снизить среднюю температуру воздуха в наиболее «горячих» помещениях.

По результатам расчетов установлены причины низкой эффективности работы систем вентиляции, предложены конкретные меры по существенному повышению ее производительности.

Предложенный подход определения характеристик вентиляционных систем с использованием современных методов трехмерной вычислительной гидрогазодинамики позволяет оптимизировать и модернизировать существующие системы вентиляции, а также проводить оценку работоспособности вентиляции на стадии проектирования АЭС. Разработанная и предложенная CFD-модель дает возможность делать это на современном уровне, не прибегая к вопросам стендового/экспериментального моделирования.

Ключевые слова: АЭС-2006, вентиляция, CFD, модернизация, герметичное ограждение, опыт эксплуатации, численное моделирование, парогенератор.

Для цитирования: Соловьев С.Л., Шишов А.В., Поваров В.П., Яуров С.В. Расчетное моделирование тепломассообменных процессов, протекающих в герметичной оболочке энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 37-48. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.03>

СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ ГЕРМЕТИЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

Системы вентиляции помещений внутри защитных оболочек (30) современных АЭС поколения 3+ предназначены не только для удаления избыточного тепла, влаги и поддержания оптимальных условий окружающей среды для нормальной работы оборудования, создания нормальных климатических условий для работы персонала при проведении планово-предупредительных ремонтов и перегрузочных работ в период останова блока, очистки воздуха от активных аэрозолей, но и для создания разрежения не менее 200 Па в необслуживаемой зоне и 150 Па в зоне ограниченного доступа [1–7]. Создаваемая разность давлений по замыслу проектантов должна препятствовать распространению воздуха с содержанием радиоактивных аэрозолей в помещения ограниченного доступа персонала через возможные неплотности при нормальном режиме работы станции.

Принципиальные решения в отношении вентиляции помещений внутреннего контайнмента приняты исходя из концепции разделения помещений на две зоны: зона ограниченного доступа (предусмотрен доступ и возможность кратковременного пребывания персонала при работе энергоблока на мощности) и необслуживаемая зона (доступ персонала возможен только в ходе планово-предупредительного ремонта).

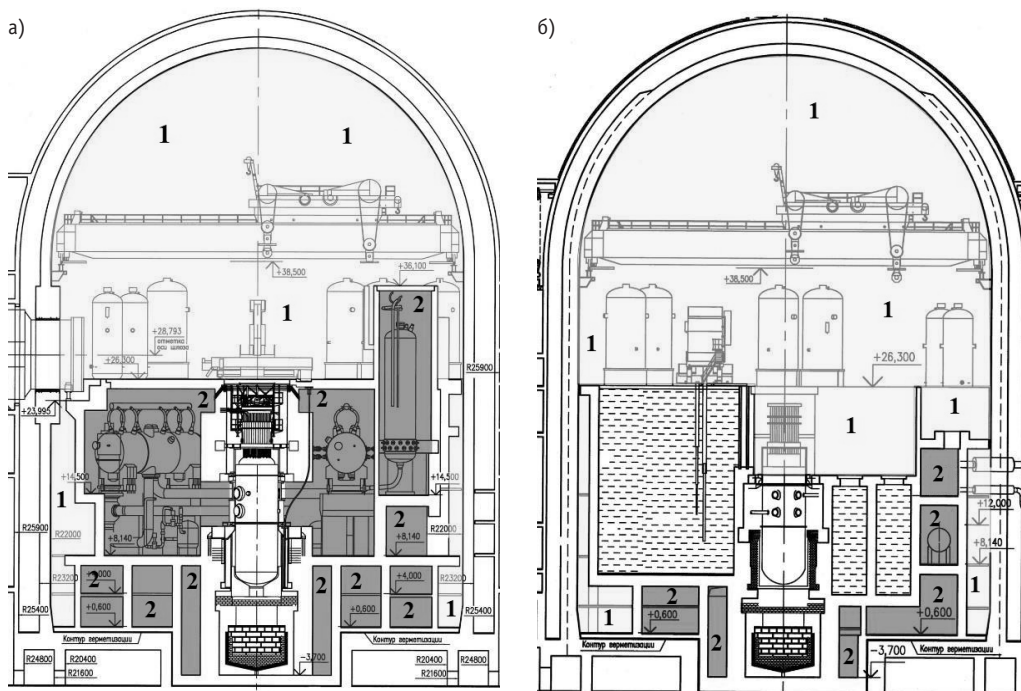


Рис. 1. Концепция разделения помещений герметичной оболочки (1 – зона ограниченного доступа; 2 – необслуживаемая зона): а) поперечный разрез ГО; б) продольный разрез ГО

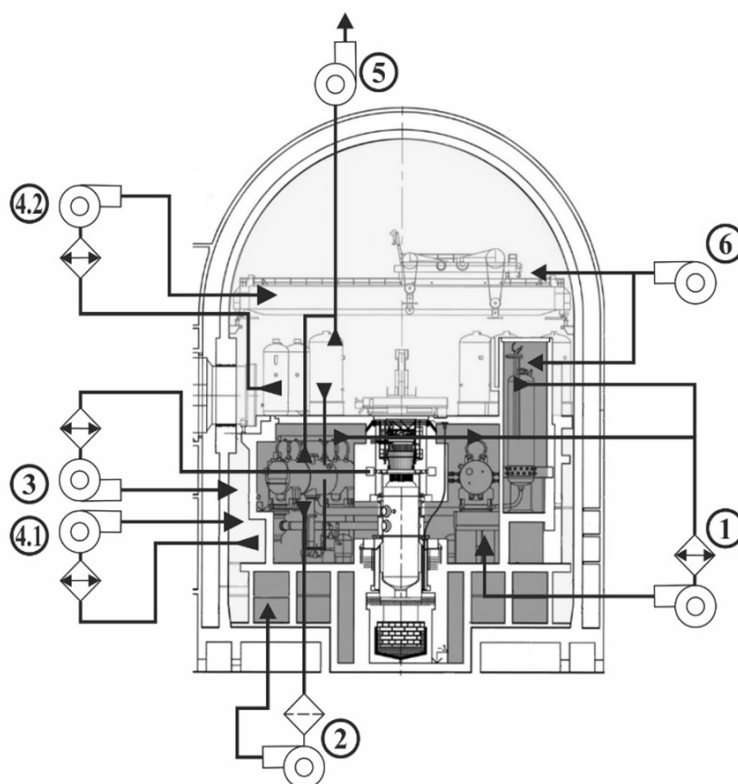


Рис. 2. Принципиальная схема системы охлаждения и вентиляции ГО: 1 – рециркуляционная система охлаждения необслуживаемой зоны; 2 – рециркуляционная система очистки воздуха внутри помещений герметичного ограждения; 3 – рециркуляционная система охлаждения приводов системы управления и защит; 4.1 – рециркуляционная система охлаждения зоны кольцевых коридоров, примыкающих к ним помещений и расположенного в них оборудования; 4.2 – рециркуляционная система охлаждения центрального зала герметичного ограждения; 5 – система вытяжной вентиляции; 6 – система приточной вентиляции

Согласно проекту энергоблоков № 1 и № 2 Нововоронежской АЭС-2 [8–11], в зону ограниченного доступа входят центральный зал, помещения электродвигателей ГЦН и другие помещения (рис. 1, поз. 1). В необслуживаемую зону входит выгороженный объем внутреннего контайнмента, включающий в себя боксы парогенераторов (ПГ) и главных циркуляционных насосов (ГЦН), шахту реактора, вентильные камеры и другие помещения, где размещено оборудование и трубопроводы первого контура (рис. 1, поз. 2).

При этом, согласно проекту, температура воздуха при нормальном режиме работы АЭС

- в необслуживаемых помещениях в режиме нормальной эксплуатации до $+60^{\circ}\text{C}$;
- в обслуживаемых и периодически обслуживаемых помещениях зоны контролируемого доступа от $+20$ до $+40^{\circ}\text{C}$;
- в помещениях ограниченного доступа внутреннего контайнмента в режиме нормальной эксплуатации от $+33$ до $+40^{\circ}\text{C}$.

Для обеспечения теплоотвода от технологического оборудования и трубопроводов, поддержания в помещениях ГО заданной температуры воздуха предусматриваются рециркуляционные установки охлаждения воздуха, расположенные внутри ГО (рис. 2).

1. Рециркуляционная система охлаждения необслуживаемой зоны. Система охлаждает помещения главного циркуляционного контура и парогенераторов, компен-

сатора давления, опорную и упорную фермы. Система включает в себя четыре установки из которых две находятся в работе, а две – в резерве (рис. 2, поз. 1).

2. Рециркуляционная система очистки воздуха внутри помещений герметичного ограждения (ГО). Система предназначена для очистки воздуха от радиоактивных загрязнений и поддержания радиационной обстановки в помещениях ГО на заданном приемлемом уровне и включает в себя две идентичные установки, одна из которых находится в работе, а другая – в резерве (рис. 2, поз. 2).

3. Рециркуляционная система охлаждения приводов системы управления и защит (СУЗ). Предназначена для воздушного охлаждения приводов СУЗ и включает в себя три установки, из которых две находятся в работе, а третья – в резерве (рис. 2, поз. 3).

4. Рециркуляционная система охлаждения зоны ограниченного доступа. Состоит из двух независимых систем. Первая система (рис. 2, поз. 4.1) служит для охлаждения зоны кольцевых коридоров, примыкающих к ним помещений и расположенного в них оборудования. Включает в себя три установки, из которых две находятся в работе, а третья – в резерве. Вторая система (рис. 2, поз. 4.2) служит для охлаждения помещения центрального зала. Включает в себя три установки, из которых две находятся в работе, а третья – в резерве.

5. Система вытяжной вентиляции (рис. 2, поз. 5).

6. Система приточной вентиляции (рис. 2, поз. 6), которая совместно с системой вытяжной вентиляции создает разрежение внутри помещений ГО. Приточный воздух подается в коридоры, откуда через клапаны избыточного давления перепускается в необслуживаемые и периодически обслуживаемые потенциально загрязненные помещения за счет разрежения, создаваемого вентиляторами вытяжных установок. Такая схема исключает перетекание воздуха из «грязных» помещений и создает направленное движение потока в их сторону.

В качестве хладоносителя для систем вентиляции и кондиционирования воздуха используется вода промежуточного контура ответственных потребителей, промежуточного контура потребителей нормальной эксплуатации. Эти системы выполнены по замкнутой схеме, а от них отвод тепла осуществляется системами технического водоснабжения ответственных потребителей (в летнее время добавляется отвод тепла водой ответственных и неответственных потребителей холодильными машинами компрессионного типа).

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ГЕРМЕТИЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

В ходе эксплуатации выяснилось, что для энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 температура воздуха в ГО превышает значения, указанные в проекте, вне зависимости от времени года и температуры окружающего воздуха $t_{\text{нв}}$ (рис. 3). Более того, в помещениях, где расположены приводы системы управления и защит (СУЗ) значение температуры близко к уставке срабатывания аварийной защиты в 120°C.

Температура в центральном зале доходит до 55°C при проектном значении 40°C, а в помещении боксов ПГ – до 80°C, превышая на 20°C проектное значение, что может привести к потере прочностных свойств бетона и возможному снижению срока эксплуатации АЭС. Замеры температуры производились с помощью штатных термомпар (погрешность измерения не более $\pm 2,0$ %).

При этом отмечено недостаточное перемешивание воздуха в ГО вследствие затруднения развития свободной конвекции внутри ГО, вызванного ограниченностью внутреннего пространства.

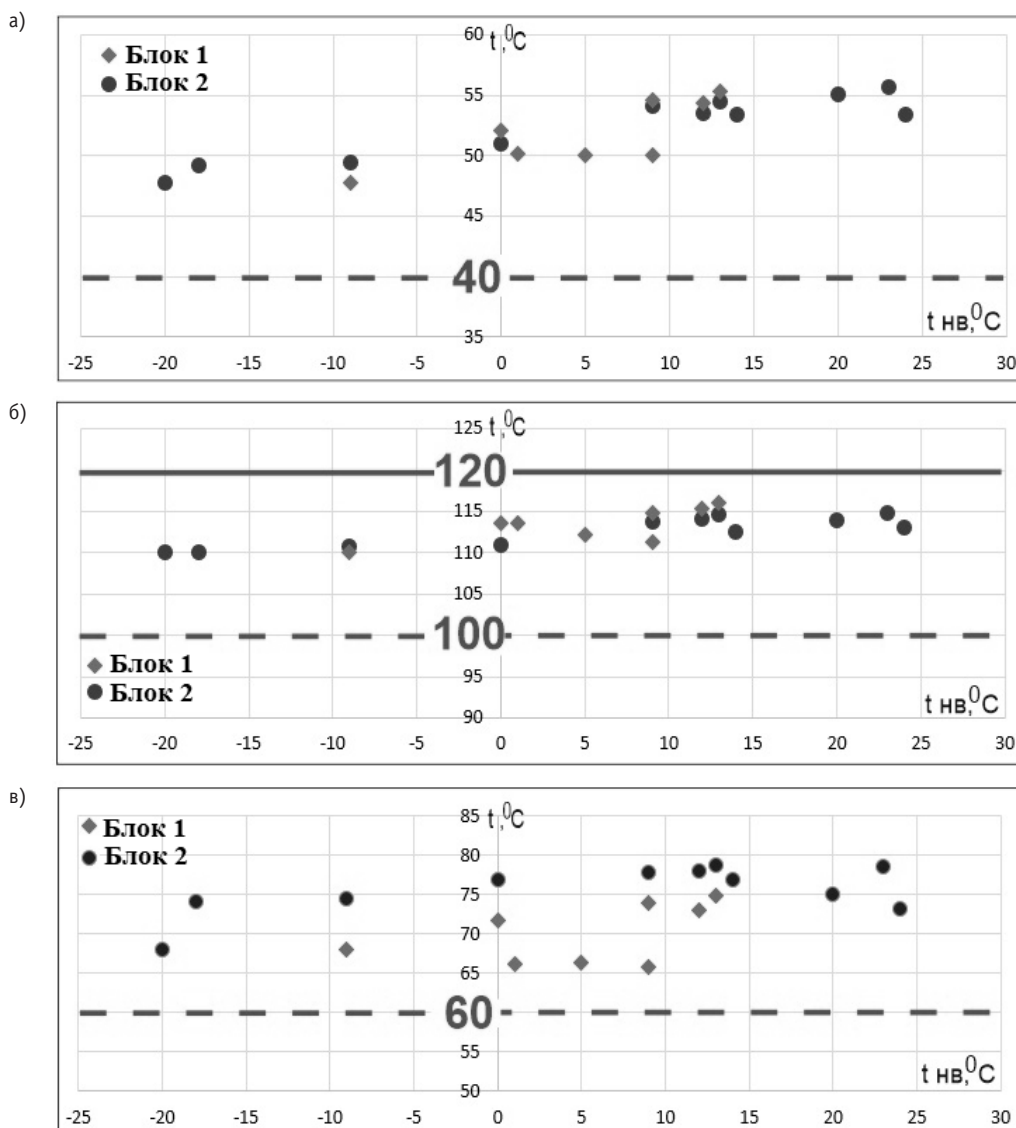


Рис. 3. Измеренные значения температуры воздуха по помещениям ГО энергоблоков №1, 2 Нововоронежской АЭС-2 в зависимости от температуры наружного воздуха ($t_{\text{нв}}$): а) температура в центральном зале ГО (40 $^\circ\text{C}$ – проектное значение температуры); б) температура в районе расположения органов СУЗ и верхнего блока (100 $^\circ\text{C}$ – проектное значение температуры, 120 $^\circ\text{C}$ – значение температуры для уставки срабатывания аварийной защиты); в) температура в боксах парогенераторов (60 $^\circ\text{C}$ – проектное значение температуры)

Анализ данных, полученных в ходе пуско-наладочных работ (ПНР) и эксплуатации энергоблоков, показал, что причины превышения температуры следует искать по следующим направлениям:

- низкая (по сравнению с проектом) производительность вентиляционных установок;
- повышенные тепловые потери с поверхности трубопроводов и оборудования первого контура;
- неэффективное перемешивание потоков воздуха в ГО.

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ГЕРМЕТИЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ

С целью оценки относительного влияния причин отклонения температур от их проектных значений были выполнены трехмерные теплогидравлические расчеты распределения температуры воздуха в ГО при номинальных режимах эксплуатации с помощью аттестованного в системе Ростехнадзора расчетного кода CFD (Computational Fluid Dynamics) класса STAR-CCM+ [12-21].

Для этого разработаны CFD-модели помещений ГО, включающих в себя основное оборудование и вентиляционные установки (рис. 4).

Особенностью конструкции теплообменников вентиляционных аппаратов является оребрение теплообменных трубок с внешней стороны. Наружный диаметр трубок 22 мм, толщина стенки 2,5 мм, ребро представляет собой спираль из ленты шириной 9 мм и толщиной 1 мм, навитой на внешнюю поверхность трубки с шагом 5 мм, что приводит к определенным затруднениям с точки зрения моделирования с помощью разработанной CFD-модели.

Одним из этапов выполнения теплогидравлических расчетов распределения температуры и потоков воздуха в ГО является валидация разработанной базовой CFD-модели.

В ходе выполнения валидации модели выявлены основные неопределенности, заключающиеся в оценке величины тепловых потерь в воздух ГО с поверхности трубопроводов систем и оборудования, свойств изоляционных материалов конкретных изготовителей и партий поставки, качества изготовления и монтажа быстросъемной тепловой изоляции.

Для оценки этого влияния была решена обратная задача – по результатам эксплуатационных замеров температуры в заранее известных точках с применением CFD-модели подбирались такие тепловые потери, при которых расчетная температура в точках геометрии CFD-модели равняется измеренной температуре в этой же точке ГО.

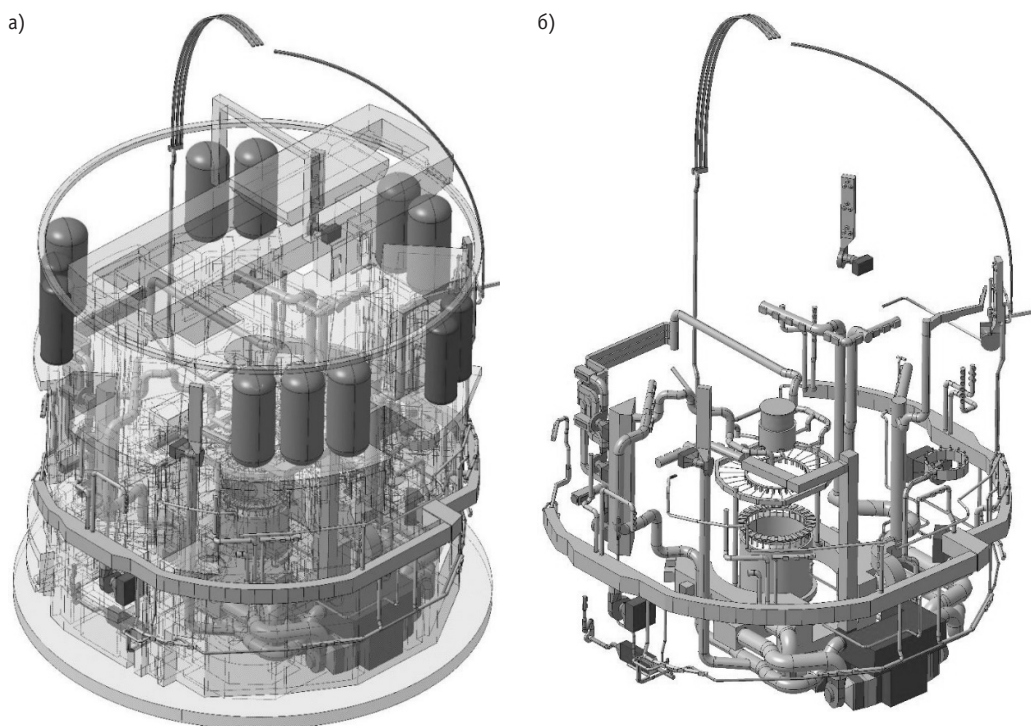


Рис. 4. CFD-модели ГО: а) основное оборудование; б) вентиляционные установки

Проектные значения тепловых потерь при номинальной мощности энергоблока составляют для зоны ограниченного доступа 700 кВт, а для необслуживаемой зоны 600 кВт.

В результате расчета получены следующие значения тепловых потерь при номинальной мощности реакторной установки:

- для энергоблока № 1 зона ограниченного доступа 535 кВт, необслуживаемая зона 1550 кВт, суммарные тепловые потери выше проектных в 1,6 раза;
- для энергоблока № 2 зона ограниченного доступа 650 кВт, необслуживаемая зона 1685 кВт, суммарные тепловые потери в 1,8 раза выше проектных.

Указанные расхождения между энергоблоками № 1 и № 2 могут быть связаны со свойствами изоляционных материалов конкретных изготовителей и партий поставки, качеством изготовления и монтажа быстросъемной тепловой изоляции (БСТИ).

Тепловые потери, полученные при решении обратной задачи, используются для проведения расчетов по оценке распределения температуры и потоков воздуха в ГО в рамках обоснования модернизации оборудования вентиляции и обеспечения достижения проектных показателей по температуре воздуха в ГО. Тепловые потери от СУЗ приняты равными проектному значению в 680 кВт. При этом обратная задача по определению реальных тепловых потерь от чехлов ОР СУЗ не решена по причине отсутствия проектных точек измерения температуры на входе в подсистему вентиляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчетная температура воздуха в ГО для энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 представлена в табл. 1, для энергоблока № 2 – в табл. 2. Результаты, получен-

Таблица 1

Сравнение расчетных и эксплуатационных значений температуры воздуха в ГО энергоблока № 1 ($T_{го}$ – средняя температура воздуха в ГО, $T_{пг}$ – средняя температура в боксах ПГ)

Дата измерения	$T_{го}$, °C расчет	$T_{го}$, °C измерение	$T_{пг}$, °C расчет	$T_{пг}$, °C измерение
15 октября 2020 г.	55.5	55.3	75.0	74.9
25 октября 2020 г.	54.5	54.4	74.5	73.8
03 января 2021 г.	52.0	52.1	75.5	71.8

Таблица 2

Сравнение расчетных и эксплуатационных значений температуры воздуха в ГО энергоблока № 2 ($T_{го}$ – средняя температура воздуха в ГО, $T_{пг}$ – средняя температура в боксах ПГ)

Дата измерения	$T_{го}$, °C расчет	$T_{го}$, °C измерение	$T_{пг}$, °C расчет	$T_{пг}$, °C, измерение
15 октября 2020 г.	53.5	54.5	77.0	78.7
03 июля 2020 г.	52.5	55.1	75.0	75.1
21 января 2021 г.	49.5	49.2	71.0	74.2

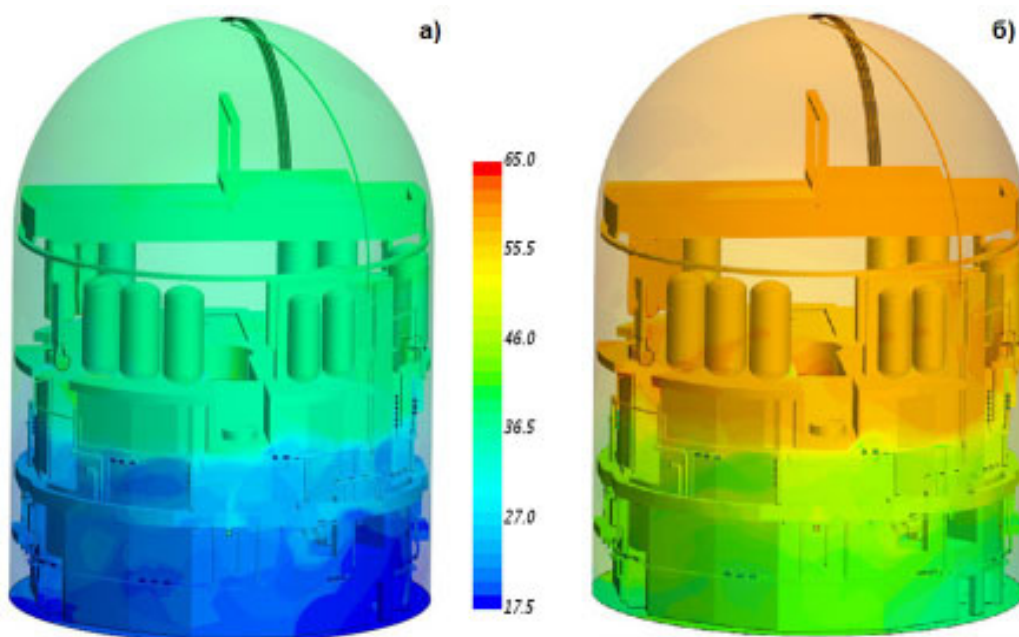


Рис. 5. Результаты расчета температуры воздуха ГО: а) проектные данные; б) рассчитанные данные (по результатам эксплуатационных измерений)

ные в ходе проведения расчетов, достаточно близки к измеренным значениям температуры в точках расположения датчиков внутри ГО. В дальнейшем был выполнен расчет поля температуры воздуха внутри ГО с использованием CFD-модели, разработанной авторами статьи.

Результаты численного моделирования распределения температуры воздуха в ГО и эксплуатационные данные на работающем энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 от 15 октября 2020 г. приведены на рис. 5 в единой цветовой шкале.

Согласно расчетным результатам, температура в подкупольном пространстве и в кольцевых коридорах выше проектных характеристик в среднем на 20°C. Зоны минимальных температур при этом сохраняют свое прежнее положение относительно основных элементов ГО – это помещения на нулевой высотной отметке. Выявлено, что при обеспечении проектных характеристик по холодопроизводительности ступеней систем вентиляции достигаются проектные показатели температуры воздуха в ГО, стен и оборудования. Кроме того при надлежащем перемешивании воздуха в ГО можно существенно снизить среднюю температуру воздуха в наиболее «горячих» помещениях.

ВЫВОДЫ

Из результатов расчетного анализа следует, что по высоте контейнента имеется существенная стратификация по температуре воздуха в ГО, достигающая 20°C и более (см. рис. 5). Для выравнивания температуры воздуха требуется организовать его перемешивание за счет направленной циркуляции между отдельными системами вентиляции или в общем проходе между подкупольным пространством центрального зала и областью приямка.

На текущий момент температура внутри помещений ГО измеряется в двух точках на уровне кабины оператора полярного крана в центральном зале и в боксах ПГ, что по результатам вычислений не отображает в полной мере распределение температу-

ры воздуха по помещениям АЭС. Поэтому предлагается установить дополнительные датчики температуры в нижней и верхней частях боксов ПГ, кольцевых коридорах и центральном зале.

При замене теплообменных поверхностей ступеней систем вентиляции необходимо проведение полномасштабных испытаний для подтверждения проектных характеристик по холодопроизводительности, а также по возможности восстановления проектных значений температуры охлаждающей воды на входе в ступени вентиляционных установок.

Предложенный подход определения характеристик вентиляционных систем с использованием современных методов трехмерной вычислительной гидрогазодинамики позволяет оптимизировать и модернизировать существующие системы вентиляции, а также проводить оценку работоспособности вентиляции на стадии проектирования АЭС. Разработанная и предложенная CFD-модель дает возможность делать это на современном уровне, не прибегая к вопросам стендового (экспериментального) моделирования. На дальнейших этапах отработки CFD-модели целесообразно провести серию расчетов, связанных с оценкой теплообменных характеристик трубок вентиляционных установок со спиральным оребрением.

Литература

1. Андрушечко 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.
2. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов, 5-е изд. – М.: ИздАТ, 1994. – 288 с.
3. НП-036-05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции важных для безопасности. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005. – С. 14.
4. Тихомиров К.В., Сергеев Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. Учебник для вузов, 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1991. – 480 с.
5. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
6. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. Учебник для вузов, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
7. Слонимский И.Б. Монтаж систем вентиляции и кондиционирования воздуха ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 133 с.
8. Нововоронежская АЭС. Проект АЭС-2006. Электронный ресурс:
<http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf>
(дата доступа 26.10.2022).
9. Нововоронежская АЭС-2 Энергоблок №1. Отчет по обоснованию безопасности. Глава 9 Вспомогательные системы энергоблока. ОАО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ» 2016 г.
10. АЭС-2006. Установка реакторная. В-392М. Блок верхний. Расчет теплогидравлический. ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007 г.
11. АЭС-2006. Нововоронежская АЭС-2. Установка реакторная В-392М. Расчет теплогидравлический. Часть 4б. Тепловые потери с оборудования. ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007 г.
12. Самарский А. А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
13. Денисихина Д.М. Использование программы STAR-CCM+ при проектировании систем вентиляции. Учебное пособие. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПбГАСУ: СПб, 2013. – 68 с.
14. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
15. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
16. Пейре Р., Тейлор Т. Д. Вычислительные методы в задачах механики. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 351 с.

17. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. II. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
18. Кирилов П.Л, Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984 – 296 с.
19. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. – М.: Наука, 1989. – 366 с.
20. Chui E.H., Raithby G.D. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method // Numerical Heat Transfer, Part B, 23: 269-288, 1993.
<https://doi.org/10.1080/10407799308914901>
21. Ferziger J. H., Peric M. Computational method for fluid dynamics. М.: – Berlin, Heidelberg, 1999. – 389 p.

Поступила в редакцию 29.10.2022 г.

Авторы

Соловьев Сергей Леонидович, научный руководитель, д.т.н.,

E-mail: SLSoloviev@vniiaes.ru

Шишов Андрей Владимирович, главный эксперт, канд.т.н.,

E-mail: AVShishov@vniiaes.ru

Поваров Владимир Петрович, заместитель Генерального директора/директор, д.т.н.,

E-mail: PovarovVP@nvnp1.rosenergoatom.ru

Яуров Сергей Васильевич, главный технолог,

E-mail: YaurovSV@nvnp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039

Computational Simulation of the Heat and Mass Transfer Processes Occurring in the Containment of Novovoronezh NPP II's Units 1 and 2

Soloviev S.L.*, Shishov A.V.*, Povarov V.P.**, Yaurov S.V.**

*All-Russian Research Institute for Operation for Nuclear Power Plants, JSC

25 Ferganskaya St., 109507 Moscow, Russia

** Novovoronezh Nuclear Power Plant, Branch of Concern Rosenergoatom

1 Yuzhnaya Industrial Zone, 396072 Novovoronezh, Voronezh Reg., Russia

ABSTRACT

The paper presents information on the key approaches to the design of the containment ventilation system for units 1 and 2 of Novovoronezh NPP II (NPP-2006 project).

The authors have developed a CFD model for the containment of Novovoronezh NPP II's units 1 and 2, which includes the key structural components and the basic equipment installed within the containment.

A series of the containment air temperature measurements was undertaken during power operation of the units. Based on the measured temperature values, a series of calculations was undertaken to determine the air temperature field inside the containment.

It is revealed that when ensuring the design characteristics of the cooling capacity of the ventilation system stages, the design parameters of the air temperature in the GO, walls and equipment are achieved. In addition, with proper mixing of the air in the GO, it is possible to significantly reduce the average air temperature in the most "hot" rooms.

Based on the calculation results, causes have been identified for the low efficiency

of the ventilation system, and specific measures have been proposed for increasing significantly the system capacity.

The proposed approach to determining the characteristics of ventilation systems using modern methods of three-dimensional computational hydro-gas dynamics makes it possible to optimize and modernize existing ventilation systems, as well as to assess the efficiency of ventilation at the design stage of nuclear power plants. The developed and proposed CFD model makes it possible to do this at the modern level without resorting to bench/experimental modeling issues.

Key words: NPP-2006, ventilation, CFD, modernization, containment, operating experience, numerical simulation, steam generator.

For citation: Soloviev S.L., Shishov A.V., Povarov V.P, Yaurov S.V. Computational Simulation of the Heat and Mass Transfer Processes Occurring in the Containment of Novovoronezh NPP II's Units 1 and 2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2023, no. 4, pp. 37-48; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.03> (in Russian).

REFERENCES

1. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Yu., Generalov V.N., Kosourov K.V., Semchenkov Yu.M., Ukraintsev V.F. *NPPs with VVER-1000 reactors. From the physical fundamentals of operation to the design evolution*. Moscow. Logos Publ., 2010, 604 p. (in Russian).
2. Margulova T.Kh. *Nuclear Power Plants*. Textbook for universities. Moscow. Izdat Publ., 1994, 288 p. (in Russian).
3. NP-036-05. *Federal Standards and Regulations in the Field of Using Atomic Energy. Regulations for Installation and Operation of Ventilation Systems Important to Safety*. FBU NTTs YaRB Publ., 2005, 14 p. (in Russian).
4. Tikhomirov K.V., Sergeenko E.S. *Heat engineering, heat and gas supply and ventilation*. Textbook for universities. 4th ed. Moscow. Stroyizdat Publ., 1991, 480 p. (in Russian).
5. Bogoslovsky V.N., Kokorin O.Ya., Petrov L.V. *Air conditioning and refrigeration*. Textbook for universities. Stroyizdat Publ., 1985, 367 p. (in Russian).
6. Kokorin O.Ya. *Air conditioning facilities. Fundamentals of calculation and design*. Textbook for universities. 2nd ed. Mashinostroyeniye Publ., 1978, 264 p. (in Russian).
7. Slonimsky I.B. *Installation of the heat and nuclear power plant ventilation and air conditioning systems*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 133 p. (in Russian).
8. Novovoronezh NPP. AES-2006 design. Available at: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (accessed 26.10.2022) (in Russian).
9. *Unit 1 of Novovoronezh NPP II. Safety analysis report. Chapter 9 Unit-level auxiliary systems*. 000 ATOMENERGOPROEKT Publ., 2016 (in Russian).
10. *NPP-2006. V-392M reactor facility. Upper unit. Thermal-hydraulic calculation*. OKB GIDROPRESS Publ., 2007 (in Russian).
11. *NPP-2006. Novovoronezh NPP II. V-392M reactor facility. Thermal-hydraulic calculation. Part 46. Equipment heat losses*. OKB GIDROPRESS Publ., 2007 (in Russian).
12. Samarsky A.A., Gulina A.V. *Numerical methods*. Moscow. Nauka Publ., 1989, 432 p. (in Russian).
13. Denisikhina D.M. *Use of the STAR-CCM+ program in the design of ventilation systems*. Training guide. St. Petersburg. SPbGASU Publ., 2013, 68 p. (in Russian).
14. Bystrov Yu.A., Isaev S., Kudryavtsev N.A., Leontyev A.I. *Numerical simulation of the heat transfer vortex intensification in tube banks*. St. Petersburg. Sudostroyeniye Publ., 2005, 392 p. (in Russian).
15. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 124 p. (in Russian).
16. Peire R., Taylor T. D. *Computational methods in problems of mechanics*. St. Petersburg. Hydrometeoizdat Publ., 1986, 351 p. (in Russian).

17. Fletcher K. *Computational methods in fluid dynamics*. Vol. II. Moscow. Mir Publ., 1991, 552 p. (in Russian).
18. Kirillov P.L., Yuryev Yu.S., Bobkov V.P. *Handbook of thermal-hydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 296 p. (in Russian).
19. Lapin Yu.V., Strelets M.Kh. *Internal flows of gas mixtures*. Moscow. Nauka Publ., 1989, 366 p. (in Russian).
20. Chui E. H., Raithby G. D. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. *Numerical Heat Transfer*. 1993, v. 23, iss. 3, pp. 269-288.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10407799308914901>.
21. Ferziger J. H., Peric M. *Computational method for fluid dynamics*. Berlin. Heidelberg Publ., 1999, 389 p.

Authors

Sergey L. Soloviev, Scientific Supervisor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: SLSoloviev@vniiaes.ru

Andrey V. Shishov, Chief Expert, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: AVShishov@vniiaes.ru

Vladimir P. Povarov, Deputy Director General/Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Sergey V. Yaurov, Chief Process Engineer

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru