

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС С РУ ВВЭР ПРИ НАРУШЕНИЯХ РЕЖИМА НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Матвеев Е.Л., Черкасова М.С., Тутукин А.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

В процессе эксплуатации трубопроводов энергоблоков АЭС может возникнуть аварийная ситуация, связанная с разгерметизацией оборудования с последующим вытеснением воздушной среды потоком теплоносителя в воздушное пространство помещений и, вследствие этого, движением фронта влажности от места истечения.

Для обнаружения и идентификации в автоматизированном режиме течей теплоносителя путем измерительного мониторинга независимых физических параметров (влажность, объемная доля аэрозолей, температура и т.п.) в помещениях с контролируемым оборудованием и трубопроводами используется «Система обнаружения течи автоматизированная полномасштабная» (АСОТТ). Эта система является главным инструментом реализации концепции «течь перед разрушением» (ТПР), суть которой заключается в необходимости обнаружения и контроля течи, начиная с определенной величины расхода на ранней стадии ее возникновения [1].

Однако без моделирования термодинамических процессов невозможно создание эффективных алгоритмов для систем обнаружения течи теплоносителя. Существует несколько наиболее часто используемых путей проведения анализа термодинамических процессов – аналитический и экспериментальный. В качестве недостатков аналитического подхода можно выделить сложность метода, а также необходимость введения дополнительных существенных ограничений, сужающих область применения его результатов. Недостатками экспериментального анализа являются трудоемкость, высокая стоимость и невозможность охватить явление в целом – исследовать картину зависимости полученных результатов от того или иного параметра задачи.

С учетом современных достижений вычислительной математики и техники широкое распространение получает анализ физических процессов при помощи численного моделирования.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования изменения физических параметров (температура, относительная и абсолютная влажность) парогазовой смеси при возникновении течи (в диапазоне от 114 до 1140 кг/ч в соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам контроля течи в ГОСТ Р 58328 [2]) теплоносителя в помещениях с трубопроводами первого контура АЭС с РУ ВВЭР. Моделирование динамики исследуемых физических величин в ходе аварийного процесса выполнено при помощи программного кода Ansys Fluent 2019 R3 [3].

1. Объект контроля

В качестве объекта исследования рассматриваются трубопроводы первого контура энергоблоков №3, 4 Кольской АЭС. Согласно проектной документации, в контролируемых помещениях расположены главные циркуляционные трубопроводы (ГЦН) по всей длине, включая главные запорные задвижки (ГЗЗ), главные циркуляционные насосы (ГЦН) и парогенераторы (ПГ). Помимо этого, в контролируемых помещениях расположены рециркуляционные и вытяжные системы вентиляции воздуха, обеспечивающие проектный температурно-влажностный режим в помещениях.

На рисунке 1 представлена геометрическая модель гидравлического тракта (объема помещений, занятого воздухом) контролируемых помещений энергоблока № 3 Кольской АЭС. Влияние всех исключенных из модели твердотельных объектов на интенсивность процессов транспорта влаги было учтено с помощью граничных условий.

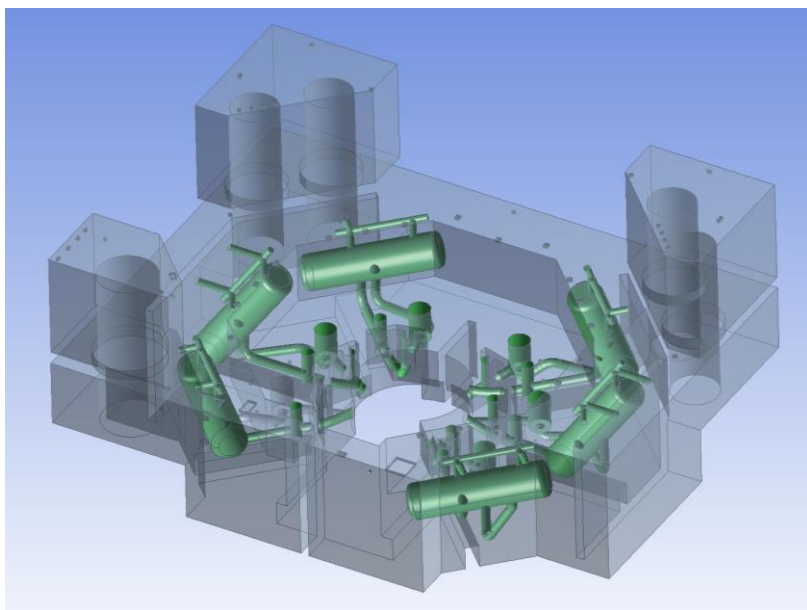


Рис. 1. Модель гидравлического тракта контролируемых помещений энергоблока № 3 Кольской АЭС

Диагностирование целостности оборудования и трубопроводов базируется на измерении и обнаружении изменений влажности и температуры воздушной среды в местах расположения контролируемого оборудования в результате появления течей теплоносителя.

Контроль течей теплоносителя трубопроводов первого контура проводится по сигналам подсистемы АСОТТ-ПКВ, включающего в себя термогигрометры ИВА-6Б, распределенные в разных частях помещений (рис. 2) [4], при помощи которых проводится измерение характеристик воздушной среды.

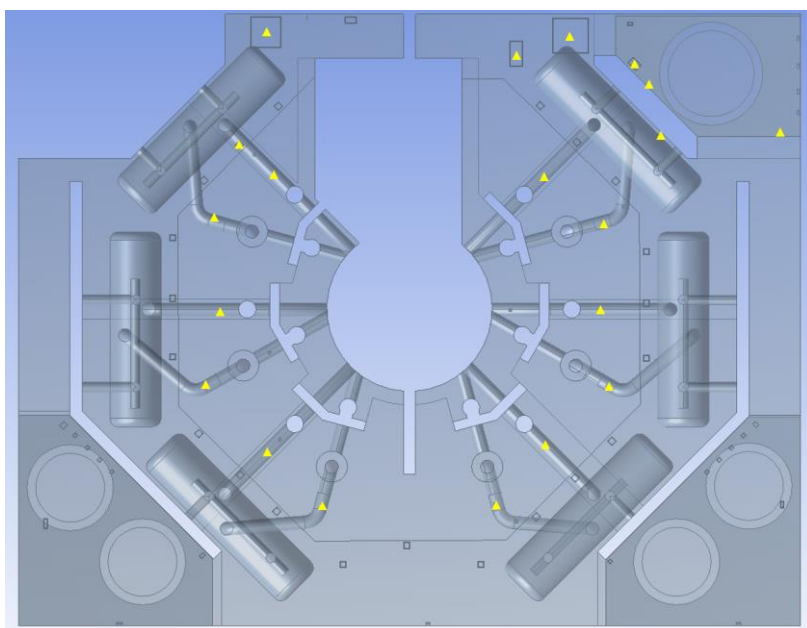


Рис. 2. Места расположения ППВ для энергоблока №3 Кольской АЭС (вид сверху)

Поскольку целью работы является определение характеристик температурно-влажностного режима в воздушном пространстве контролируемых помещений, расположение источника парогазовой смеси (ПГС) было представлено в шести различных областях, представленных на рисунке 3.

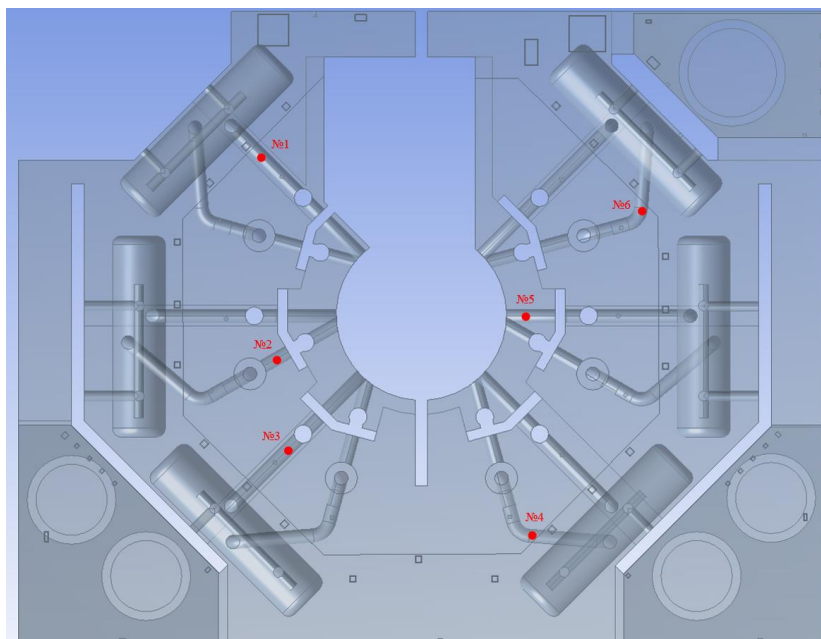


Рис. 3. Места расположения течей для энергоблока №3 Кольской АЭС (вид сверху)

Сеточная модель на основе многогранников и параллелепипедов с максимальной длиной ячейки 0.2 м была подготовлена с помощью среды Ansys Fluent Meshing (рис. 4).

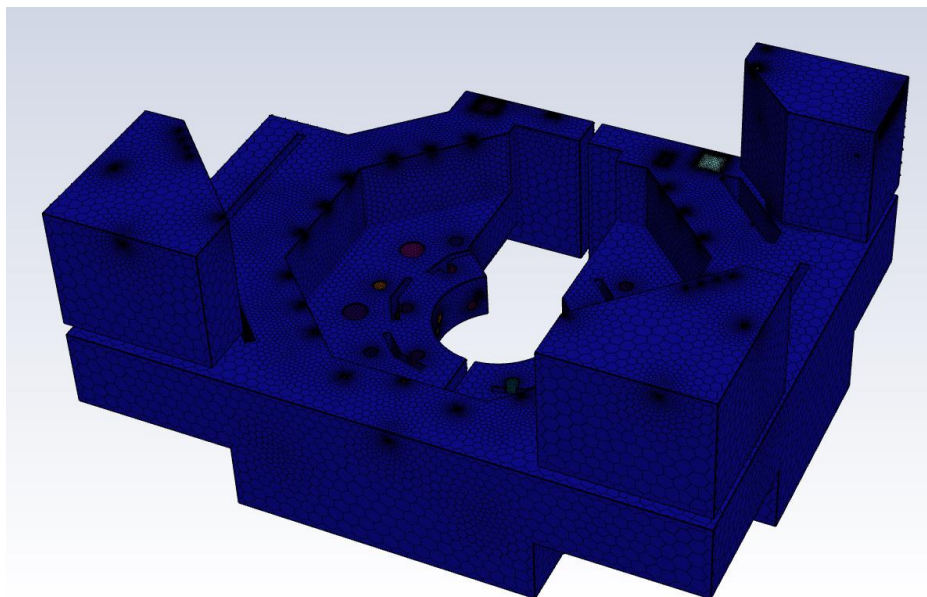


Рис. 4. Объемная сеточная модель

Одними из основных показателей качества полученной сетки, определяющими, насколько близка полученная сетка к идеальной, являются показатели Skewness и Orthogonal quality. Согласно рекомендациям [5], [6], качество сетки признается удовлетворительным, если максимальные значения каждого из двух показателей не превышает 0.8. В данном случае максимальные значения параметров равны 0.7, и доля

сеточных ячеек со значениями обоих параметров до 0.3 составляет около 90 % от общего количества сеточных ячеек, что позволяет говорить о хорошем качестве сетки.

Рабочая среда в контролируемых помещениях представляет собой двухфазную и двухкомпонентную паровоздушную смесь. В качестве базовых компонентов смеси используются модели пара, полученные международной ассоциацией по изучению свойств воды и пара IAPWS-IF97 [7]. Данные модели описывают поведение паровоздушной смеси в широком диапазоне температур (от 0 °С до 800 °С) и давлений (от 0 МПа до 100 МПа). Температура теплоносителя «горячей» нитки принималась равной 300 °С, «холодной» – 280 °С.

В настоящее время для технических объектов сложной формы, наиболее актуальной является задача решения системы уравнений Навье-Стокса, осредненной по Рейнольдсу (Reynolds averaged Navier – Stokes или RANS). Поэтому для моделирования экспериментов использовалось RANS-приближение уравнений движения жидкости в гидравлическом тракте контролируемых помещений. В качестве модели турбулентного переноса использовалась двухслойная дифференциальная realizable k-ε модель турбулентности, а процессы испарения воды и конденсации пара были учтены с помощью модели evaporation-condensation.

2. Стационарный режим

Распределение температуры и влажности воздушного пространства контролируемых помещений на момент времени, предшествующий аварии (момент времени 0), получено в результате отдельного расчета, в котором учтен теплообмен ПГ и трубопроводов с окружающей средой, температура которой различна в отдельных участках помещений, также были учтены температура и влажность теплоносителя систем вентиляции. При моделировании теплообмена учитывались процессы конвективного переноса тепла и теплопроводности. В свою очередь, температура и влажность теплоносителя систем вентиляции была подобрана ранее на основании экспериментальных данных в местах расположения ПП.

На рисунке 5 показано распределение температуры в стационарном режиме, полученное в результате численного решения.

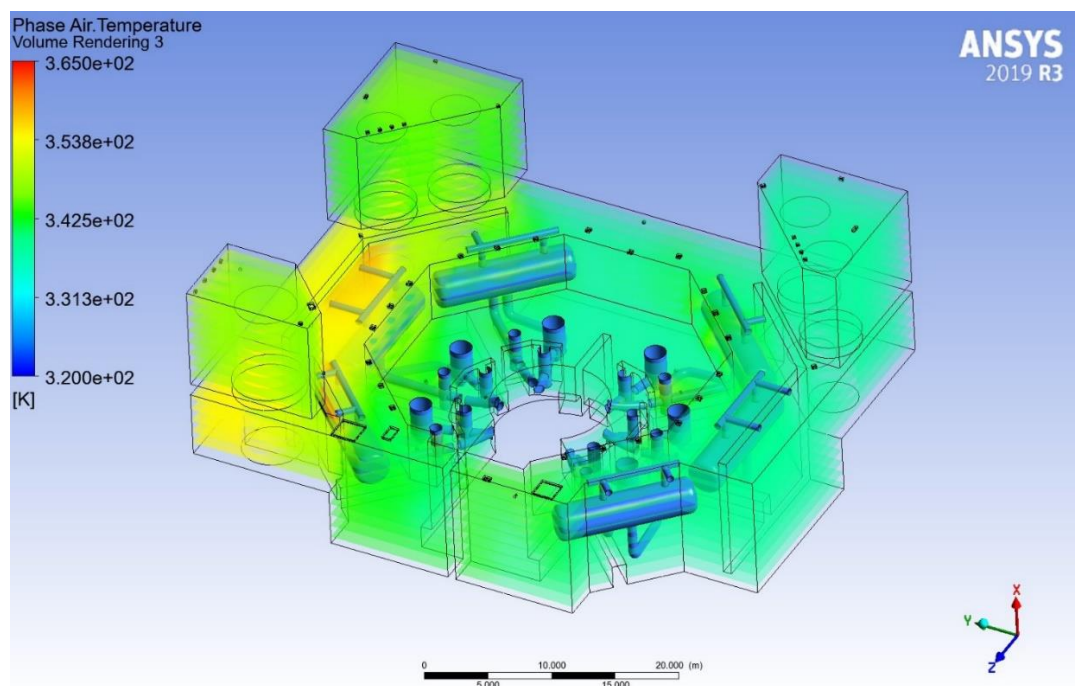


Рис. 5. Распределение температуры в стационарном режиме

На рисунке 6 показаны направления движения паровоздушной смеси (поведение пространственных линий тока), направленной из систем рециркуляции воздуха к вытяжным вентиляционным отверстиям.

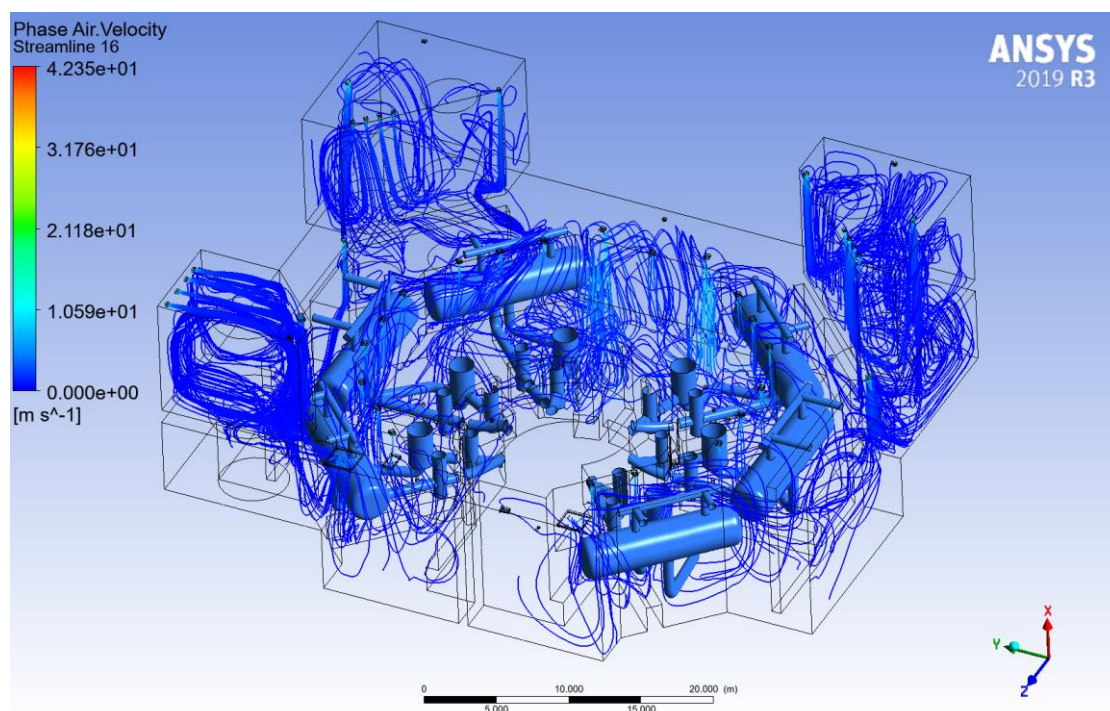


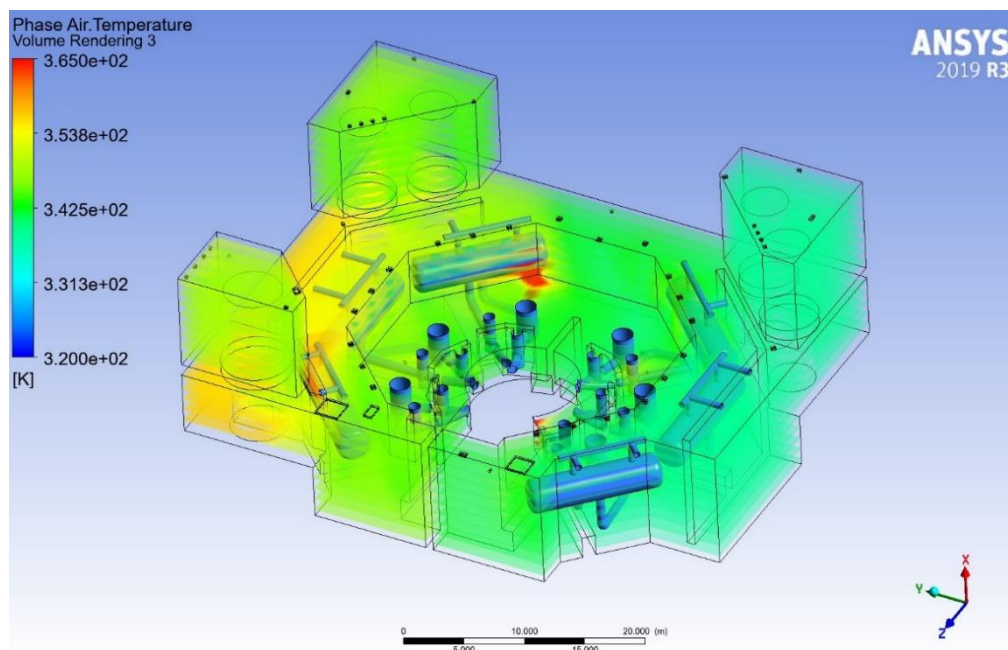
Рис. 6. Направления движения паровоздушной смеси в стационарном режиме

При моделировании стационарного режима максимальное отклонение расчетной температуры и относительной влажности воздуха от измеренных в процессе эксплуатации не превышало 19 и 20 % соответственно (среднее отклонение не превышало 11 и 12 %). С учетом сложности математической модели и большого количества неопределённостей в исходных данных полученные значения погрешностей свидетельствуют о хорошем согласовании результатов моделирования и измерений. На основании этих результатов можно ожидать, что расчеты нестационарной задачи с учетом течи теплоносителя будут давать корректные результаты.

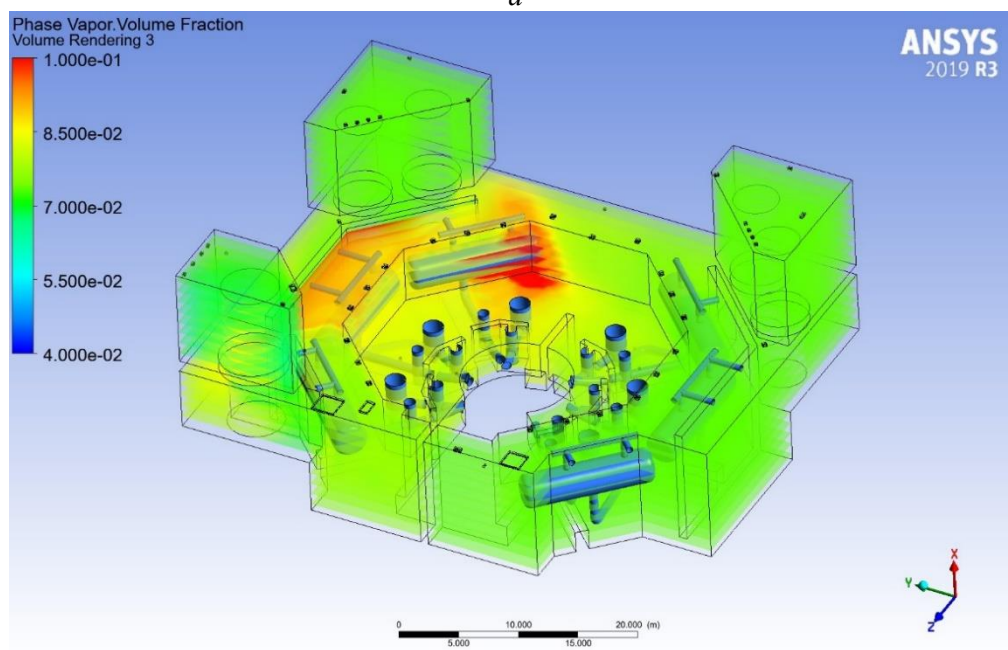
3. Нестационарный режим

При проведении расчетов в нестационарном режиме предполагалось, что в контролируемых помещениях возникала течь теплоносителя. Расчеты были выполнены для пяти вариантов мощности источника течи: 114, 456, 513, 798 и 1140 кг/ч. Для каждого значения расхода течи было рассмотрено шесть вариантов расположения источника течи на трубопроводах. В качестве начальных значений для нестационарного моделирования были выбраны значения, полученные в стационарном режиме.

На рисунке 7 приведено распределение температурно-влажностного режима контролируемых помещений энергоблока № 3 Кольской АЭС по истечении 60 минут с момента возникновения течи в месте расположения № 4, расход которой равен 798 кг/ч. Воздух в помещениях энергоблока № 3 Кольской АЭС с температурой не менее 365 К на рисунке 7а представлен красным цветом.



a



б

*Рис. 7. Температурно-влажностный режим контролируемых помещений энергоблока № 3 Кольской АЭС через 60 минут с момента возникновения течи:
а – температура, б – относительная влажность*

Результаты моделирования в нестационарном режиме показали, что при возникновении течи трубопроводов первого контура энергоблоков № 3, 4 Кольской АЭС в контролируемых помещениях в течение первых 15 минут после возникновения течи происходит значительное изменение стационарного состояния, что позволяет использовать результаты CFD-моделирования для получения замыкающих соотношений между параметрами течи и регистрируемыми значениями температуры и относительной влажности.

По истечении 60 минут с момента возникновения течи наблюдались значительные изменения температуры и относительной влажности, а также значительные средние изменения суммарной абсолютной влажности.

Заключение

Таким образом, полученные результаты CFD-моделирования были использованы для получения замыкающих соотношений между параметрами течи и регистрируемыми значениями температуры и относительной влажности, на основании которых были разработаны новые алгоритмы и откалиброваны уже существующие по оценке величины течи теплоносителя на данных, поступающих от датчиков контроля температуры и влажности АСОТТ. Также результаты моделирования могут быть полезны на этапе проектирования системы контроля при выборе мест размещения датчиков.

Список литературы

1. НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». – Введ. 2016-02-15. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015. – 57 с.
2. ГОСТ Р 58328-2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением». – Введ. 2019-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 49 с.
3. Ansys Inc. Ansys Fluent 2019 F3, Ansys Help, 2019.
4. ООО ИЦД НИКИЭТ, 1003.051.00.00 П9. Система контроля течи теплоносителя энергоблока №3 Кольской АЭС. Описание комплекса технических средств. Инв. № 350-0459, 2022.
5. AnsysHelp: [сайт]. – 2021. – URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html (дата обращения: 29.07.2022).
6. AnsysClub: [сайт]. – 2012. – URL: <https://cae-club.ru/publications/rekomendacii-pokachestvu-setki-dlya-fluent> (дата обращения: 21.07.2022).
7. Wagner W., Kruse A. The Industrial Standard IAPWS-IF97: Properties of Water and Steam, Springer, Berlin, 1998.