

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕЧИ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

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

Введение

Согласно современным требованиям безопасной эксплуатации (НП-001-15, НП 082-07, НП 089-15) энергоблоки АЭС должны быть оснащены системами контроля течей. Системы контроля течей (далее – СКТ) должны обеспечивать выдачу информации о появлении течи, а также аварийного сигнала на блочный пульт управления реактором в случае обнаружения течи выше предела, установленного по проектной чувствительности СКТ, после которого РУ должна в штатном режиме нормальной эксплуатации переводиться в режим расхолаживания и останова. Этот подход основан на том, что для определенных типов металла мгновенному катастрофическому разрушению предшествует устойчивый докритический медленный рост дефектов. Данное обстоятельство положено в основу концепции «течь перед разрушением» применительно к трубопроводам АЭУ [1], в которой сформулированы основные требования к системам контроля течи трубопроводов на АЭС.

Поскольку по показаниям СКТ принимается решение о продолжении эксплуатации энергоблока, то одним из важных требований, предъявляемых к СКТ, является верификация программного средства СКТ (ПС СКТ), с помощью которого реализованы алгоритмы математической обработки результатов измерения физических величин с целью определения параметров течи.

Согласно [2], основным содержанием процедуры верификации программы является аттестация алгоритма обработки данных, реализуемого данной программой. При этом программа не должна вносить значимых погрешностей в суммарную погрешность результата. Другими словами, погрешности собственно ПС (выполняемого компьютерного кода) должны быть несущественны по сравнению с трансформированными погрешностями входных данных и методическими погрешностями алгоритма (расчетной методики).

На каждом энергоблоке в составе СКТ для контроля одной и той же физической величины (например, звуковое давление в помещении АЭС) могут использоваться различные измерительные каналы, которые, к тому же, могут быть установлены в различных местах контролируемых помещений АЭС и иметь различную погрешность/чувствительность. Поэтому, в случае возникновения течи на различных энергоблоках, будет наблюдаться различная динамика контролируемых физических величин, даже если расход течи будет одинаковым. В связи с этими обстоятельствами, ПС СКТ аттестуется для каждого энергоблока по отдельности, что позволяет учитывать конкретную конфигурацию измерительных каналов и размещение датчиков в контролируемых помещениях энергоблока.

Действующий порядок верификации программных средств предусматривает следующие способы верификации ПС:

- сравнение результатов ПС СКТ с результатами расчетно-аналитических тестов, полученных с помощью эталонных ПС (под результатами ПС СКТ подразумеваются оценки параметров течи, полученные с помощью ПС СКТ по результатам измерения контролируемых физических величин);
- сравнение результатов ПС СКТ с экспериментальными данными.

Для обоснования ПС СКТ использованы оба способа. В качестве эталонного ПС выбран современный контейнерный код COCOSYS V.2.4, разработанный немецким

Обществом по безопасности реакторных установок GRS. Код COCOSYS создан как средство моделирования теплогидравлических процессов и процессов переноса радиоактивных веществ, которые могут возникать при проектных и тяжелых авариях на атомных станциях с легководными реакторами. Выбор кода COCOSYS в качестве эталонного ПС обусловлен тем обстоятельством, что этот код верифицирован и валидирован на результатах многочисленных экспериментов, проведенных как в европейских странах, так и в странах бывшего СССР в период с конца 1970-х годов по настоящее время (код активно используется в актуальных европейских исследовательских программах). В результате, в рекомендациях МАГАТЭ [3] отмечается, что код COCOSYS может использоваться для анализа экспериментов, связанных с тяжелыми авариями, а также в качестве эталонного контейментного кода при кроссверификации с другими кодами.

Несмотря на объем верификации кода COCOSYS, очевидно, что для обоснования результирующей погрешности ПС СКТ использование только расчетно-аналитических тестов с помощью эталонного ПС недостаточно, т.к. реальные процессы на АЭС имеют особенности, обусловленные, например, характерными условиями эксплуатации оборудования. Как следствие, при моделировании малых течей в контролируемых помещениях АЭС с помощью контейментного кода становится невозможным корректно смоделировать направления и интенсивность движения потоков воздуха и перенос влаги и активности в воздухе, которые полностью соответствовали бы процессам переноса в помещениях АЭС, а также реальную затесненность оборудованием помещений контроля.

Поэтому наряду с использованием для обоснования ПС СКТ результатов моделирования процесса истечения с использованием математической модели помещений энергоблока для целей обоснования работоспособности СКТ использовали данные, полученные при проведении испытаний с контролируемой течью теплоносителя из оборудования КМПЦ. В испытаниях использовали стенд-имитатор течи, размещенный непосредственно в помещении АЭС. Работы проводили в период 1995–2000 гг. на энергоблоках № 1, 2 Ленинградской АЭС с целью разрешения проблем, возникших при разработке методик контроля течи с использованием измерений параметров акустического шума, влажности и активности воздуха, окружающего контролируемое оборудование. С помощью стенда имитировали образование течи КМПЦ при работе реактора на номинальной мощности.

Верификация ПС СКТ на конкретном энергоблоке требует проведения натурных экспериментов с течью теплоносителя на этом блоке. Однако проведение натурных экспериментов на рабочем энергоблоке в настоящий момент не представляется возможным, поэтому в качестве дополнительного обосновывающего материала использовали данные по фактическим течам оборудования, которые были зафиксированы за более чем 120 реакторо-лет эксплуатации действующими СКТ на Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС.

1. Методика оценки и обоснования погрешности

В общем виде модель суммарной относительной погрешности для каждой из систем СКТ можно представить следующим образом

$$\Delta_{\text{АСОТТ}} = \sqrt{\Delta_{\text{ВХ}}^2 + \Delta_{\text{алг}}^2 + \Delta_{\text{ИК}}^2 + \Delta_{\text{мет}}^2},$$

где $\Delta_{\text{ВХ}}$ – относительная погрешность массового расхода течи от вариации входных данных;

$\Delta_{\text{алг}}$ – относительная погрешность приближения процедуры алгоритма

к выбранной модели «течь – контролируемый параметр»;

$\Delta_{ик}$ – относительная погрешность средств измерения физических величин;

$\Delta_{мет}$ – относительная погрешность приближения модели «течь – контролируемый параметр» к реальным процессам на объекте контроля, т.е. методическая погрешность, или погрешность физической модели.

При планировании проведения проверок и выбора числа и характера расчетных тестов с помощью эталонных ПС было необходимо найти компромисс между ограничением объемов работ и представительностью полученных результатов, при определении количества необходимых тестов были приняты следующие критерии:

1) Поскольку в соответствии с [1] СКТ предназначена для расчетов параметров расхода течи в диапазоне от 114 до 1140 кг/ч, то при исследовании показателей точности подсистем СКТ, в качестве постулируемых значений при проведении проверок были выбраны следующие значения массового расхода течи:

- 114 кг/ч – нижняя граница диапазона измерения массового расхода течи;
- 456 кг/ч – первая треть диапазона измерения массового расхода течи;
- 513 кг/ч – середина диапазона массового расхода течи;
- 798 кг/ч – две трети диапазона измерения массового расхода течи;
- 1140 кг/ч – верхняя граница диапазона измерения массового расхода течи.

2) Помещения контроля имеют значительные линейные размеры. При постулировании местоположения течей были выбраны наиболее характерные места. Места возникновения течей выбирались из условия получения наиболее различных результатов расчета массового расхода течи, связанных с особенностями физических процессов в помещении контроля. Учитывалась удаленность места возникновения течи от вентиляционных входов/выходов, возможные скорости переноса фронта влажности, температуры, наличие застойных зон. Также учитывались экранирующее влияние оборудования и силовых конструкций на распространение звуковых волн и другие факторы. По совокупности влияющих факторов были выбраны наиболее характерные точки возникновения течи.

Таким образом, с учетом условий критериев 1-2 должен быть сформирован объем тестовых проверок, необходимый для получения достаточного массива данных по погрешности массового расхода течи в зависимости от постулируемого расхода, помещения и местоположения течи. Заданное количество тестов обеспечивает получение точечных оценок массового расхода течи при различных постулируемых значениях расхода и местоположения в контролируемом помещении. Количество тестов для заданного расхода и местоположения позволяет сделать статистическую обработку полученных результатов и оперировать со средним значением погрешности для каждого характерного набора тестов.

В качестве независимой оценки параметров течи, с которой происходит сравнение оценок параметров течи, выполненных с помощью СКТ, используются следующее:

1) В случае, если тип проверки – расчетно-аналитические тесты, то в качестве независимой оценки расхода течи принималась оценка расхода течи, полученная с помощью ПС COCOSYS.

2) В случае, если тип проверки – функциональные испытания, то в качестве независимой оценки расхода течи принимается задаваемое в период функциональных испытаний фиксированное значение расхода течи.

3) В случае, если тип проверки – фактическая течь, то в качестве независимой оценки расхода течи принимается оценка массового расхода течи, полученная специалистами АЭС визуальным способом при выполнении осмотра оборудования

КМПЦ либо при помощи измерения массы вытекшей жидкости с помощью мерной емкости и секундомера.

При выполнении расчетов с помощью расчетно-аналитических тестов с помощью эталонного ПС выполняются следующие операции (расчетная схема представлена на рисунке 1):

1) Задаются начальные параметры объекта контроля (объем помещения, расход вентиляции, влажность, температура воздуха и т.п.) и постулируется значение расхода течи.

2) Производится расчет параметров среды (влажность, температура, активность) для постулируемой течи с помощью эталонного ПС.

3) Выполняется расчетная задача с помощью ПС СКТ. Результатом выполнения является расчетная оценка параметров течи, которая сравнивается с постулируемой течью, используемой в качестве граничных условий при расчете с использованием эталонного ПС.

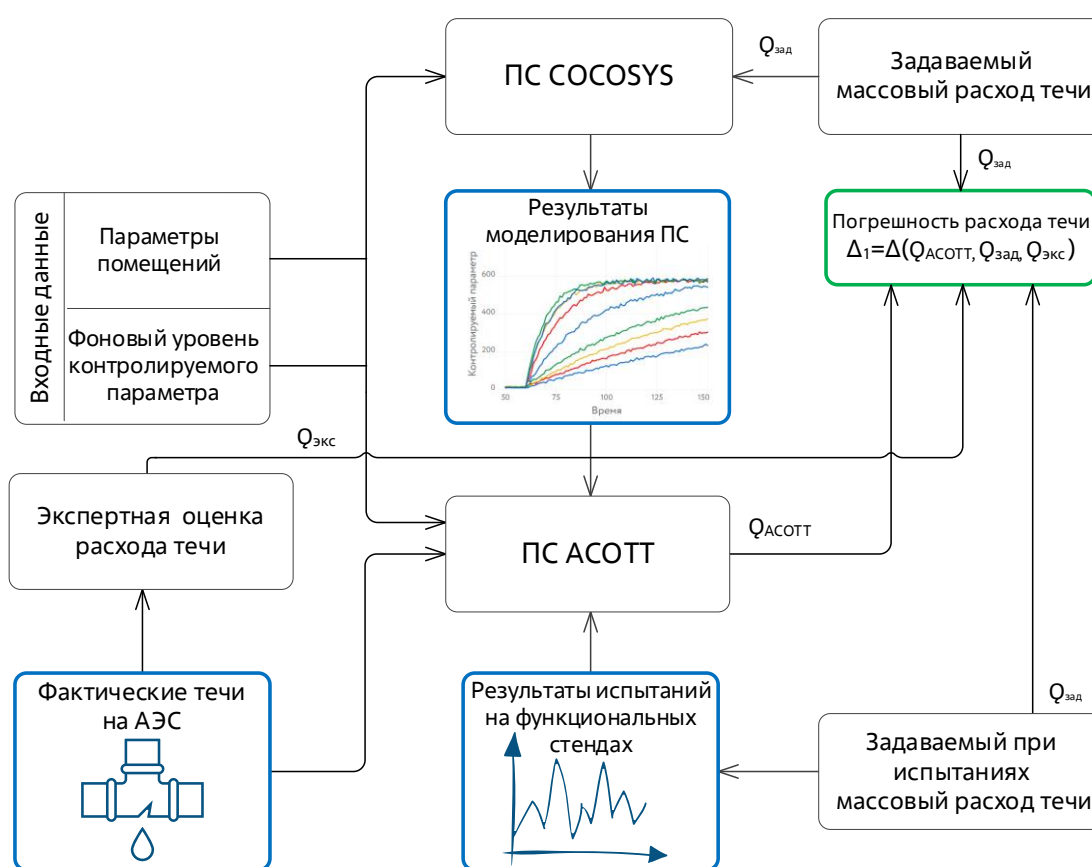


Рис. 1. Схема верификации СКТ

Помимо расчетно-аналитических тестов с помощью эталонного ПС были проанализированы эксплуатационные данные системы СКТ на различных АЭС с РУ РБМК-1000, полученные при фактических событиях с течью оборудования КМПЦ на энергоблоках АЭС с РУ РБМК-1000 (Ленинградская, Курская и Смоленская АЭС). Оценки, полученные с помощью СКТ, сравнивались с экспертными оценками, полученными специалистами АЭС визуальным способом при выполнении осмотра оборудования КМПЦ либо при помощи измерения массы вытекшей жидкости с помощью мерной емкости и секундомера.

Кроме этого, были проанализированы данные, полученные в ходе экспериментальных работ при многократных «проливках» теплоносителя на натурном стенде имитаторе с врезкой в трубопровод продувки тупиковых зон на энергоблоке № 1

Ленинградской АЭС. С помощью стенда имитировалось образование течи КМПЦ с расходами 90, 120, 240 кг/ч посредством проливки теплоносителя через дроссель с соответствующим диаметром отверстия. Расход теплоносителя номинальных параметров и значением 240 кг/ч производится через резьбовое отверстие с метрической резьбой М1.6, значением 90 кг/ч через гладкое отверстие диаметром 0.6 мм при работе реактора на номинальной мощности.

Стенд был присоединен к трубопроводу системы продувки тупиковых зон 2РГК21 после запорного вентиля и содержал коммуникации с установленными на них сильфонными клапанами. Управление клапанами в том или ином порядке позволяло организовать определенный расход теплоносителя через соответствующий дроссель. Управление клапанами – ручное дистанционное с использованием указателей и приводов в обслуживаемом помещении № 308/2. Параметры теплоносителя: давление – 85 кгс/см², температура – 265 °С. Наклонные участки трубопроводов обеспечивали слив теплоносителя после окончания испытаний и закрытия общего сильфонного клапана. Эскиз стенда приведен на рисунке 2.

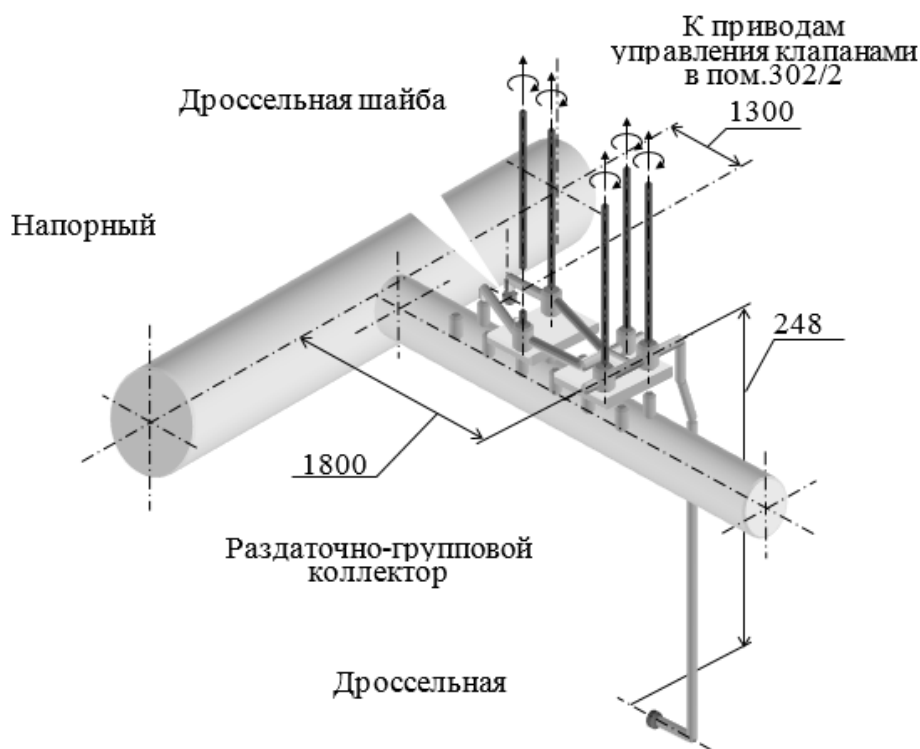


Рис. 2. Размещение стенда-имитатора на оборудовании и сопряжение с органами управления в помещении РГК

Рассмотрим в качестве примера процесс верификации ПС СКТ для энергоблока №3 Смоленской АЭС.

В общей сложности было проанализировано 174 расчетных теста, из них:

- расчетно-аналитических тестов с помощью ПС COCOSYS – 127 шт.;
- экспериментальных данных, полученных при проведении натурных экспериментов с организацией контролируемой течи теплоносителя – 12 шт.;
- данных СКТ, полученных при обнаружении фактических течей трубопроводов и оборудования на АЭС с РУ РБМК 1000 – 35 шт.

На рисунке 3 приведен видеокادر оператора СКТ, на котором изображен график изменения температуры воздушной среды при возникновении течи массовым расходом 570 кг/ч в помещении шахты опускающих трубопроводов энергоблока № 3 Смоленской

АЭС, полученный при моделировании изменения температурно-влажностного режима с помощью эталонного ПС. Координата местоположения течи в привязке к строительным конструкциям энергоблока: ось 30+3000, ряд Е-3000, высотная отметка +9.000 м.

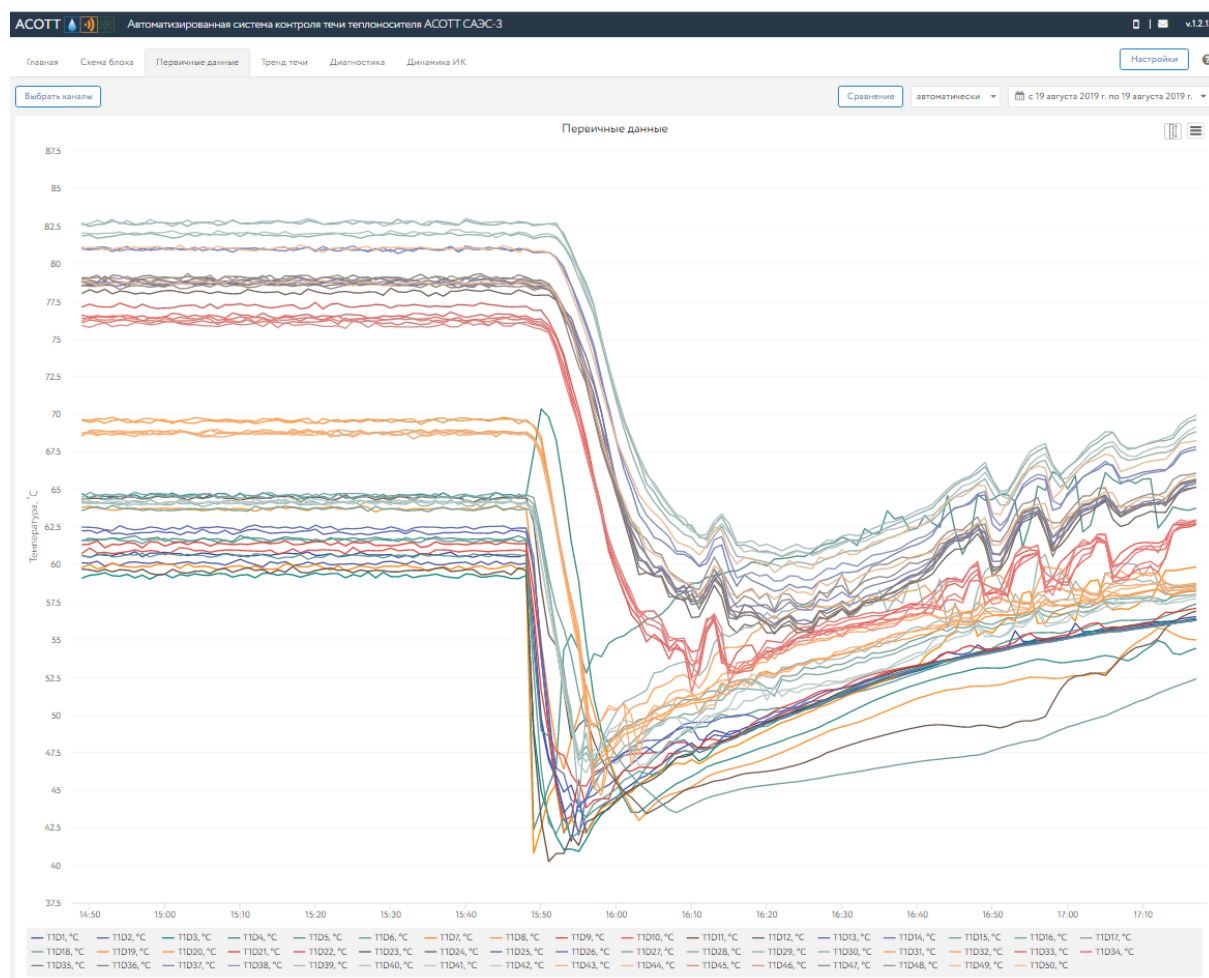


Рис. 3. Динамика температуры воздушной среды при возникновении течи с массовым расходом 570 кг/ч

На рисунке 4 представлен видеокادر оператора ПС АСОТТ «Массовый расход течи», на котором изображен график изменения оценки массового расхода течи, полученный с помощью ПС АСОТТ.

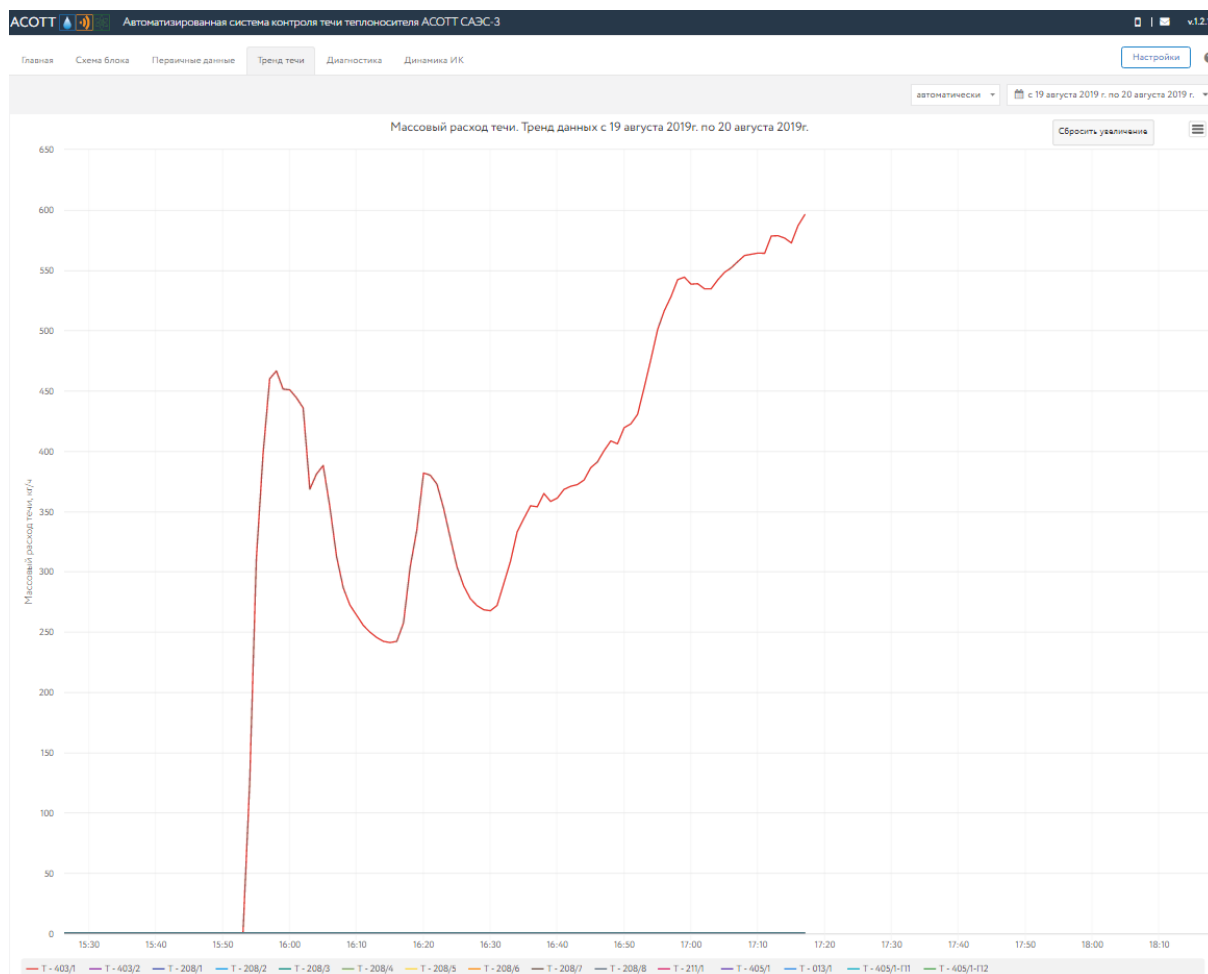


Рис. 4. Временная зависимость массового расхода течи, полученная с помощью ПС АСОТТ

Относительная погрешность оценки массового расхода течи для каждого теста определялась с помощью консервативного подхода, т.е. относительная погрешность массового расхода течи определялась как максимальное по модулю отклонение оценки массового расхода течи, полученной с помощью СКТ, от независимой оценки массового расхода течи через 60 мин после возникновения течи.

$$\bar{Q}_{\text{СКТ}} = \operatorname{argmax}_{t \geq t_0 + 60\Delta t} \left| \frac{\bar{Q}_{\text{СКТ}}(t) - Q}{Q} \right|, \delta = \frac{\bar{Q}_{\text{СКТ}} - Q}{Q} \times 100\%,$$

где Q , кг/ч – независимая оценка массового расхода течи; $\bar{Q}_{\text{АСОТТ}}(t)$ – оценка массового расхода течи, вычисленная с помощью ПС СКТ в момент времени t ; δ , % – относительная погрешность оценки массового расхода течи; $\bar{Q}_{\text{АСОТТ}}$, кг/ч – оценка массового расхода течи, вычисленная с помощью ПС СКТ; t_0 – момент обнаружения течи.

Заключение

По результатам успешного взаимодействия с экспертами ФБУ «НТЦ ЯРБ» (выдано 4 аттестационных паспорта на ПС СКТ) выяснились следующие особенности, которые необходимо учитывать в дальнейшем при аттестации ПС СКТ:

- на каждом энергоблоке в составе СКТ для контроля одной и той же физической величины могут использоваться различные измерительные каналы, которые

могут быть установлены в различных местах контролируемых помещений АЭС и иметь различные точностные характеристики. Таким образом, при возникновении течи будет наблюдаться различная динамика контролируемых физических величин при одинаковом расходе течи;

– недостаточно использовать для обоснования только расчетно-аналитические тесты и результаты численного моделирования, т.к. реальные процессы на АЭС имеют особенности, обусловленные характерными условиями эксплуатации оборудования, которые невозможно полностью учесть при моделировании: фактическая затесненность помещений контроля, направление и интенсивность движения потоков воздуха и пр.

В связи с этими обстоятельствами при аттестации ПС СКТ приняты следующие решения:

а) СКТ аттестуется для каждого энергоблока по отдельности, что позволяет учитывать конкретную конфигурацию измерительных каналов и размещение датчиков;

б) для обоснования ПС СКТ необходимо использовать три независимых источника данных:

– результаты CFD моделирования температурно-влажностного режима в помещениях расположения датчиков СКТ при возникновении течей;

– результаты, полученные при проведении функциональных испытаний с организацией контролируемой течи теплоносителя (были проведены в конце 1990-х годов на Ленинградской АЭС);

– данные по фактическим течам оборудования, которые были зафиксированы за более чем 120 реакторо-лет эксплуатации действующими СКТ.

Подготовленный с учетом принятых решений верификационный отчет позволяет выполнить аттестацию ПС СКТ в организации научно-технической поддержки уполномоченного органа государственного регулирования безопасности и подтвердить заявленные точностные характеристики СКТ.

Список литературы

1. ГОСТ Р 58328-2018. Трубопроводы атомных станций. Концепция «течь перед разрушением», 2018.
2. *Слаев В.А., Чуновкина А.Г.* «Аттестация программного обеспечения, используемого в метрологии: справочная книга», СПб: – Проффессионал, 2009.
3. Серия норм МАГАТЭ по безопасности №SSG-4. «Разработка и применение вероятностной оценки безопасности уровня 2 для атомных электростанций. Специальное руководство по безопасности», Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2014.