



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.004

© 2021. Все права защищены.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНОГО СОБЫТИЯ НА АЭС С ВВЭР-1000 В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Поликарпова А. М.*,

Пипченко Г. Р.* (pipchenko@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.

Аннотация

Предлагается подход для разработки методики автоматизированного определения состояния аварийного энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 на основе анализа численных значений ограниченного перечня параметров технологического оборудования.

Преимуществом автоматизированного определения состояния аварийного энергоблока является то, что если передать полученные результаты в программу, выполняющую прогнозный расчет, то можно получить прогноз развития аварии еще до прибытия первых экспертов. Это значительно облегчит их работу и позволит быстрее и точнее оценить текущее состояние аварийного энергоблока и результаты предварительного прогноза.

Представлены возможные способы решения данной задачи. Описаны их достоинства и недостатки. На основе анализа этих способов предложена методика, основанная на использовании конечных автоматов.

Методика основывается на разделении задачи на отдельные независимые подзадачи. Каждая подзадача представляет собой оценку состояния конкретной единицы оборудования, например: насоса, дизель-генератора, паросбросного устройства. Логика оценки состояния оборудования разрабатывается на основе применения конечных автоматов с учетом экспертного опыта.

В качестве примера представлена методика разработки диаграммы переходов автомата, предназначенного для определения диаметра малой течи из первого контура. Идентификация малой течи основывается на одновременном наличии двух явлений – снижении давления в первом контуре и повышении давления и температуры в защитной оболочке. Предотвращение ложной идентификации течи осуществляется за счет зоны нечувствительности по давлению и температуре в защитной оболочке. Оценка диаметра течи производится путем интерполяции таблицы скорости снижения давления в первом контуре. Эта таблица получена расчетным путем. Разработанный автомат позволяет определять диаметр малой течи в диапазоне 20–90 мм с погрешностью до 15 %.

► **Ключевые слова:** ВВЭР-1000, течь, методика, нейронная сеть, конечный автомат, аварийное реагирование.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

FINITE STATE MACHINE APPLICATION TO DETERMINE INITIAL EVENT AT NPP WITH VVER-1000 DURING EMERGENCY RESPONSE

Polikarpova A. M.^{*},
Pipchenko G. R.^{*}

Article is received on February 15, 2021

Abstract

An approach for the development of the methodology for automated determination of the state of an emergency NPP unit with VVER-1000 based on the analysis of numerical values of a limited list of technological equipment parameters is proposed.

The advantage of automated determination is that it is possible to obtain accident developments forecast before arrival of experts. This will significantly facilitate experts' work and allow to assess the current state of the emergency power unit and to obtain preliminary forecast results.

Possible ways to solve this problem as well as their advantages and disadvantages are presented. Based on the analysis of these methods, a methodology on the basis of the finite state machines is proposed.

The methodology is based on dividing the task into separate independent subtasks. Each subtask is an assessment of particular equipment state (pump, diesel generator, steam dump valve, etc.). The logic of equipment state assessing is developed on the basis of finite state machines application, considering expert experience.

The methodology of a finite state machine diagram developing for determining the diameter of a small leakage from the primary circuit is presented as an example. The primary circuit leakage identification is based on the simultaneous presence of two phenomena – primary circuit pressure decreasing and pressure and temperature increasing in the containment. Prevention of false leakage identification is carried out by the pressure and temperature insensitivity range in the containment. The leakage diameter is estimated by interpolating the primary pressure reduction rate table, obtained by calculation. The developed finite state machine allows to determine the diameter of a small leakage in the range of 20–90 mm with an error of up to 15 %.

► **Keywords:** VVER-1000, leakage, methodology, neural network, finite-state machine, emergency response.

^{*} Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

Основной целью данной статьи является введение в задачу определения исходного события запроектных аварий (ЗПА) на атомных электрических станциях (АЭС) с реакторной установкой ВВЭР-1000 в условиях аварийного реагирования и предложение принципиального пути ее решения, что может помочь специалистам в решении этой и подобных задач.

ЗПА на энергоблоках АЭС могут являться причиной радиоактивного загрязнения окружающей территории. Это представляет угрозу для жизни и здоровья населения и персонала АЭС. Страны, обладающие ядерной энергетикой, серьезно относятся к АЭС как к возможному источнику радиоактивного загрязнения. Принятый во всем мире подход при аварийном реагировании заключается в создании специальных кризисных центров [1–3]. В их задачи входят оценка и анализ состояния аварийного энергоблока АЭС, прогноз развития аварии, оценка последствий выброса радиоактивных веществ, предоставление рекомендаций по проведению мер защиты для персонала и населения.

Любые программные средства, предназначенные для выполнения прогнозных расчетов, требуют ввода набора исходных данных и граничных условий, то есть для того, чтобы выполнить прогноз развития аварии нужно понять, что произошло. Иными словами, сначала нужно определить исходное событие (ИС). Для краткости здесь и далее под термином ИС будет подразумеваться совокупность всех зависимых и независимых отказов, приводящих к ЗПА.

На данный момент задача автоматического определения ИС на АЭС в условиях аварийного реагирования полностью не решена. В настоящее время определением ИС и прогнозированием аварии занимаются эксперты по реакторным установкам, используя различные вспомогательные программные средства [4–5].

Проблемой, не позволяющей разработать единый алгоритм автоматизированного определения ИС, является наличие сложных взаимодействующих между собой нейтронно-физических, тепловых, гидравлических, механических, электрических и других процессов на энергоблоках АЭС, а также большое количество возможных сочетаний отказов оборудования.

Основной задачей аварийного реагирования является ослабление последствий аварии и ее ликвидация. Чем быстрее будет определено ИС, тем быстрее и точнее будет выполнен прогноз, что,

в свою очередь, обеспечит больший запас времени на принятие и реализацию как защитных мер: йодная профилактика/укрытие/эвакуация [6], так и мер по управлению ЗПА. Однако для сбора экспертов необходимо время, которое может достигать трех часов (рис. 1).

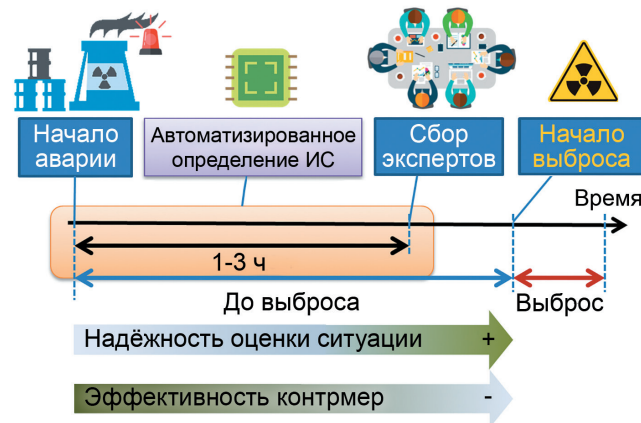


Рис. 1. Аварийное реагирование [Fig. 1. Emergency response]

В случае возможности автоматизированного определения ИС прибывшие эксперты смогут сразу ознакомиться как с оперативными донесениями с аварийного объекта, так и с результатами автоматизированного определения ИС. Кроме того, имея возможность передать ИС в качестве входного параметра для программы, выполняющей прогнозные расчеты, можно получить и прогноз развития аварии до прибытия первых экспертов, что значительно облегчит их дальнейшую работу.

В качестве возможных методов решения сформулированной задачи можно выделить следующие:

- подготовка библиотеки аварийных режимов и ее интерполяция непосредственно во время аварийного реагирования;
- обучение нейронных сетей на предварительно сформированной обучающей выборке;
- использование конечных автоматов при разработке алгоритмов определения ИС.

Представленный выше перечень не является исчерпывающим. Подробный анализ всех возможных методов является темой отдельной статьи.

1. Многомерная интерполяция библиотеки аварийных режимов

Данный метод подразумевает выполнение значительного количества вариантных расчетов аварийных режимов для подготовки массива данных. Во время аварийного реагирования используется

уже заранее подготовленная библиотека. Определение ИС осуществляется посредством многомерной интерполяции среди множества режимов, посчитанных заранее.

В качестве варьируемых параметров должны быть выбраны отказы технологического оборудования: насосов, арматуры, источников электропитания (распределительные устройства, дизель-генераторы, аккумуляторы), течи как первого, так и второго контуров, отказы систем управления, а также время возникновения соответствующих отказов.

На основе результатов этих расчетов формируется библиотека зависимостей основных технологических параметров от принятых отказов оборудования. В ходе аварийной ситуации поступающая с объекта информация сравнивается с этой библиотекой и интерполируется для восстановления информации об отказах.

Если для некоторых задач можно выделить сравнительно малое количество варьируемых переменных [7], то для решения задачи определения ИС в общем виде потребуется расчет значительного количества аварийных режимов. Так, например, даже при подготовке библиотеки режимов, содержащей только отказы – БРУ-А (4 шт.), течь из первого контура (4 петли) различного диаметра (Ду10–Ду100 с шагом 10 мм), – общее количество вариантов режимов составит порядка $17 \cdot 10^6$, и это еще без варьирования времени возникновения соответствующего отказа.

Подготовка библиотеки всех возможных режимов является неподъемной задачей. Также стоит отметить, что точность определения ИС в каждом конкретном случае будет зависеть от наличия в библиотеке похожего режима, и даже выполнение миллионов расчетов не дает гарантии успешной идентификации всех отказов во время аварийного реагирования.

2. Нейронные сети

В последнее время разработчики нейронных сетей достигли значительного успеха для решения множества задач из разных областей человеческой деятельности, например: очистка показаний приборов от шумов [8], установление медицинского диагноза [9], перевод с иностранных языков [10], распознавание изображений [11], искусственный интеллект для компьютерных игр [12–13]. И хотя область их применения очень обширна, в настоящее время панацеей они не являются.

Прежде чем получить удовлетворительные результаты от нейронной сети, необходимо проделать большой объем предварительной работы: подобрать архитектуру сети, подготовить данные для обучения, выбрать функцию активации и т. д.

Как правило, для обучения нейронной сети необходимы большие объемы данных. В зависимости от сложности задачи это могут быть как сотни, так и миллионы примеров. Поскольку аварии на АЭС происходят не часто, то использовать реальные данные для обучения не представляется возможным. Поэтому подготовка обучающей выборки будет представлять собой расчет большого количества аварийных сценариев. Разумеется, если в данной выборке будет отсутствовать режим, подобный тому, что реализуется на аварийном объекте, то вероятность корректного определения ИС нейронной сетью снижается.

Также нужно отметить, что в настоящее время нейронные сети являются своеобразным «черным ящиком». Нейронные сети не могут обеспечить прозрачность логики своей работы. И хотя некоторые группы исследователей достигли определенных результатов [14–15], говорить о полном понимании внутреннего функционирования и мотивации принятия решения нейронной сетью в каждом конкретном случае пока рано.

3. Конечные автоматы

Конечные автоматы [16] широко используются в задачах синтеза цифровых устройств [17], разработке компиляторов [18]. В теории управления конечный автомат – это модель дискретного устройства, имеющая входы и выходы, которая может находиться в каждый момент времени только в одном состоянии. Иными словами, конечный автомат представляет собой совокупность множества состояний и функций переходов между ними по событиям. Обычно конечный автомат изображается в виде диаграммы переходов.

Как было отмечено выше, определением ИС во время аварийного реагирования занимаются эксперты по реакторным установкам. Для этого они используют все доступные источники информации. Наиболее важными из них являются показания технологических параметров, например: давление, температура, уровень, мощность, расход, а также состояние оборудования, важного для безопасности [19].

Предлагаемый подход заключается в разделении задачи определения ИС на отдельные независимые подзадачи. Подзадачей является оценка состояния (включен, выключен, отказ) конкретной единицы оборудования, например: насос, дизель-генератор, секция электроснабжения, бак, клапан, а также функций безопасности, и определение места, времени и условного диаметра течи. Решение каждой подзадачи делегируется специально разработанному конечному автомату.

Реализацию данного подхода предлагается осуществить в виде программного обеспечения. Пример возможной структуры программы автоматизированного определения ИС приведен на рис. 2.

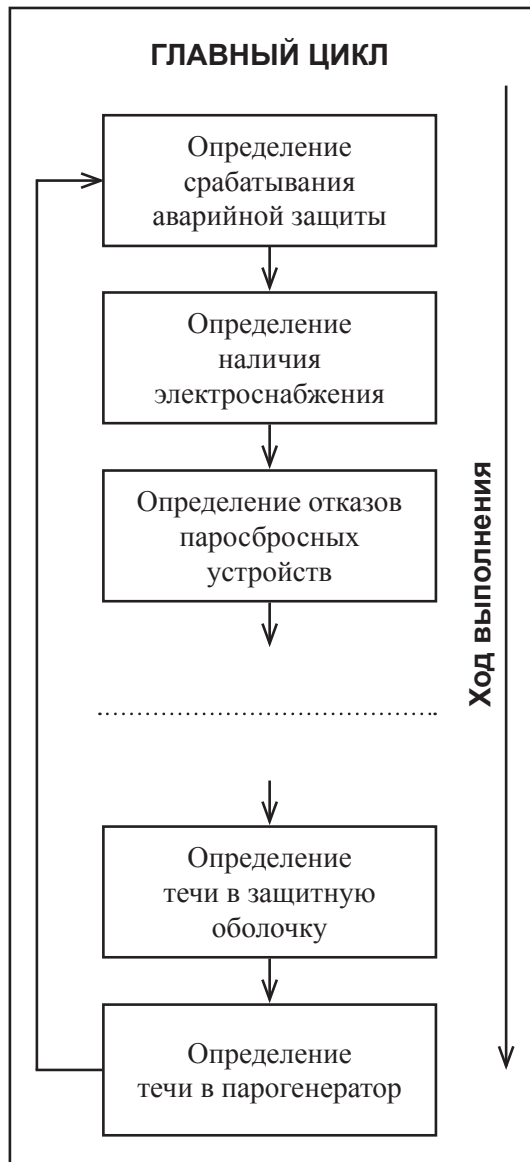


Рис. 2. Структура программы автоматизированного определения исходного события
 [Fig. 2. Possible structure of initial event automatic determine program]

Программа представляет собой циклическое последовательное выполнение логики работы каждого автомата. Причем порядок работы автоматов не имеет значения. Этот метод подробно описан в [20–21].

Ниже представлены примеры разработки диаграммы переходов (логики работы) некоторых автоматов.

Так, например, диаграмма переходов автомата для идентификации аварии типа “АТВС” (Anticipated Transient Without SCRAM) – отказ срабатывания аварийной защиты (АЗ) – в случае если информация о положении органов регулирования системы управления и защиты недоступна, может выглядеть так, как показано на рис. 3.

Начальное состояние автомата – «НОРМАЛЬНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ». При достижении условий формирования сигнала АЗ мощность снижается не мгновенно из-за задержки на формирование сигнала и времени на достижение органами регулирования нижнего положения. Для учета этого требуется введение в диаграмму переходов состояния «ОЖИДАНИЕ». По окончании заданного времени выполняется проверка снижения мощности и, в зависимости от результатов этой проверки, переход в одно из двух состояний: «АВАРИЙНАЯ ЗАЩИТА» или “АТВС”.

Авария с полной потерей всех источников переменного тока (Blackout) определяется по отсутствию напряжения на секциях электроснабжения собственных нужд и на шинах системы аварийного электроснабжения. Отказы отдельного оборудования можно определить по его состоянию, например положения быстродействующего запорно-отсечного клапана, быстродействующей редуцирующей установки со сбросом пара в атмосферу, локализирующей арматуры защитной оболочки (ЗО), непосредственно доступны для анализа.

Гораздо большей проблемой является определение диаметра течи из первого контура, особенно если их несколько. Непосредственно измерить их невозможно. Как правило, эксперты кризисных центров оценивают диаметр течи, основываясь на балансе массы теплоносителя [22] и скорости снижения давления в контуре. Точность определения течи оказывает значительное влияние на точность определения запаса времени до перехода в тяжелую стадию аварии.

Сразу отметим, что в рамках данной статьи описан подход, принятый при разработке диаграммы переходов конечного автомата, определяющего

время возникновения течи из первого контура в помещения защитной оболочки (ЗО) и диаметр течи для диапазона Ду20–Ду90. Также нужно подчеркнуть, что область применения этого автомата пока ограничивается номинальной исходной мощностью реактора.

Определение диаметра течи основывается на анализе графика давления в первом контуре. В качестве источника данных использовалась модель для экспресс-оценки состояния одного из энергоблоков АЭС с РУ ВВЭР-1000, используемая экспертами Информационно-аналитического центра Ростехнадзора [23–24].

Были выполнены вариантные расчеты для анализа влияния работы системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) на динамику снижения давления в первом контуре для разных диаметров течи. Для каждого диаметра течи рассматривались варианты штатной работы САОЗ и отказ активной части САОЗ. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

Графики на рис. 4 позволяют сделать следующие выводы:

- влияние САОЗ на скорость снижения давления незначительно – это обусловлено тем, что до момента срабатывания АЗ величина давления в контуре составляет порядка 14–16 МПа, а рабочая точка насосов САОЗ, даже высокого давления, находится ниже;

- до момента срабатывания АЗ имеется линейный участок, угол наклона которого явно зависит от диаметра течи.

Основываясь на полученных результатах, можно составить график зависимости скорости снижения давления от условного диаметра течи (рис. 5). Промежуточные значения диаметров определяются путем линейной интерполяции.

Течь из первого контура в помещения ЗО можно определить по наличию двух явлений – снижения давления теплоносителя в первом контуре и повышения давления/температуры в ЗО. Схематично это проиллюстрировано на рис. 6.

При работе энергоблока эксплуатационные параметры могут меняться в некотором диапазоне. Для того чтобы исключить ложную идентификацию, необходимо введение некоторой зоны нечувствительности.

Таким образом, диаграмма переходов автомата определения течи из первого контура в помещения ЗО будет иметь вид, представленный на рис. 7.

Начальное состояние автомата – «ТЕЧЬ ОТСУТСТВУЕТ». В этом состоянии отслеживаются значения давления и температуры в ЗО. Превышение ими некоего допустимого значения («Нечувствительность» на рис. 6) может быть как следствием течи, так и иметь иные причины. Поэтому превышение этого значения не является достаточным условием для идентификации течи.

Для предотвращения ложного определения течи автомат переходит в состояние «ПОДОЗРЕНИЕ НА ТЕЧЬ», выполняя дополнительную проверку. Из этого состояния есть два перехода: если давление или температура в ЗО вернулись в диапазон допустимых значений, автомат возвращается в исходное состояние «ТЕЧЬ ОТСУТСТВУЕТ»; если обнаружен дальнейший рост давления и температуры в ЗО, выполняется проверка снижения давления в первом контуре. Если оба этих условия совпадают – это признак течи, происходит переход в состояние «ОЖИДАНИЕ ДАННЫХ». В этом состоянии автомат анализирует поступающие значения давления теплоносителя в первом контуре для определения момента окончания линейного участка снижения давления. Когда эта точка определена, выполняется вычисление скорости снижения давления с одновременным переходом в состояние «СКОРОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНА». В этом состоянии автомат вычисляет диаметр течи путем линейной интерполяции таблицы известных значений скорости снижения давления и переходит в конечное состояние «КОНЕЦ РАБОТЫ».

Величина отклонения диаметра течи, определенного автоматом, от заданного в модели находится в пределах 3 %. Большие величины отклонений наблюдаются для значений диаметра течи между узлами интерполяции. Гистограмма отклонений диаметра течи показана на рис. 8.

В случае возникновения течи после срабатывания АЗ точность автомата снижается. Гистограмма отклонений для режимов с образованием течи после срабатывания АЗ показана на рис. 9.

Отклонение от заданного в модели диаметра составляет уже почти 15 %. Это связано с точностью определения линейного участка, несколько меньшей скоростью снижения давления и необходимостью фильтрации шумов. На первый взгляд это довольно большое отклонение, однако в абсолютном значении максимальная ошибка составляет всего около 10 мм для течи Ду90, что в условиях аварийного реагирования является вполне достаточным.

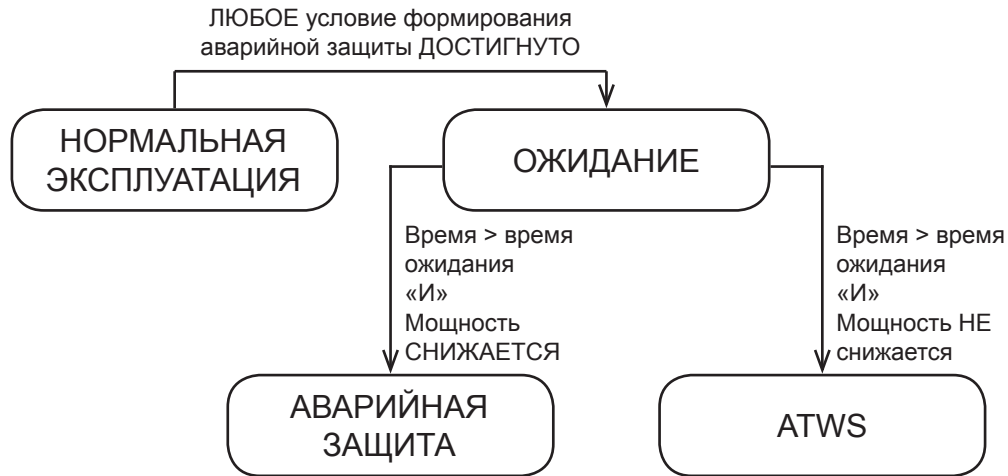


Рис. 3. Диаграмма переходов автомата идентификации “ATWS”
[Fig. 3. State diagram of the “ATWS” identification machine]

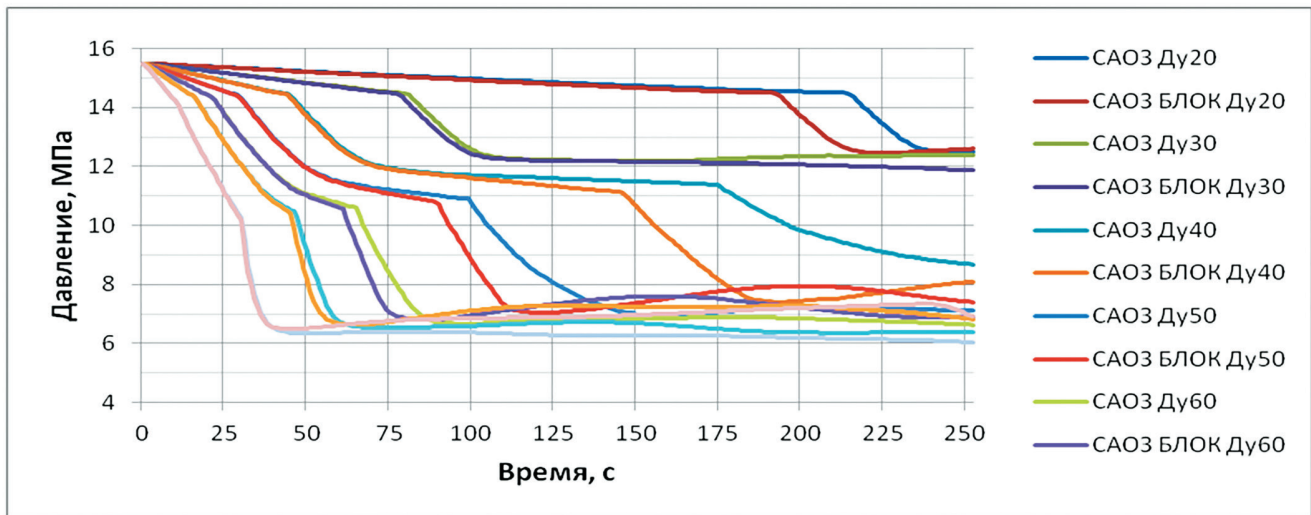


Рис. 4. Давление в первом контуре
[Fig. 4. Primary circuit pressure]

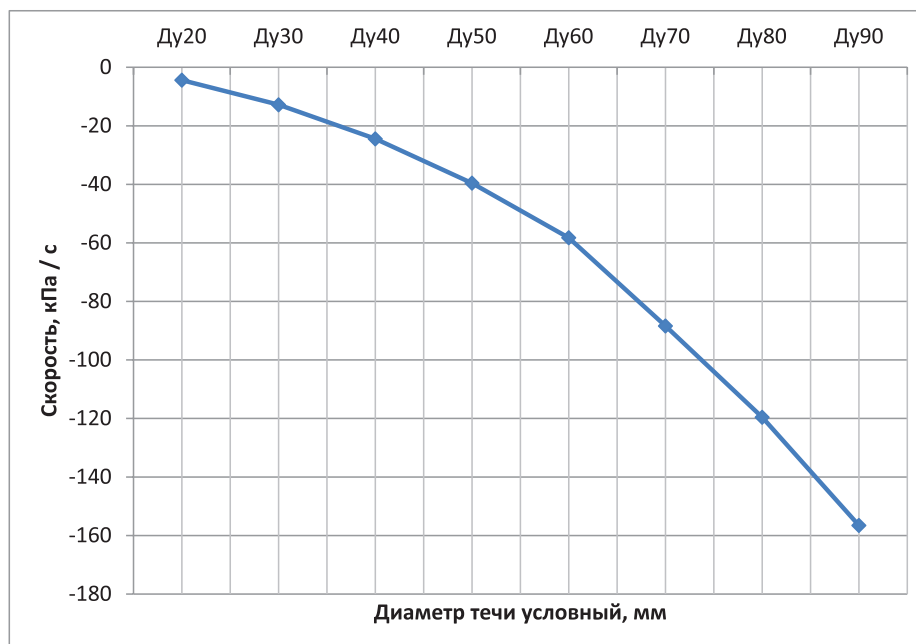


Рис. 5. Зависимость скорости снижения давления от условного диаметра течи
[Fig. 5. Dependence of the pressure reduction rate on the conditional leakage diameter]

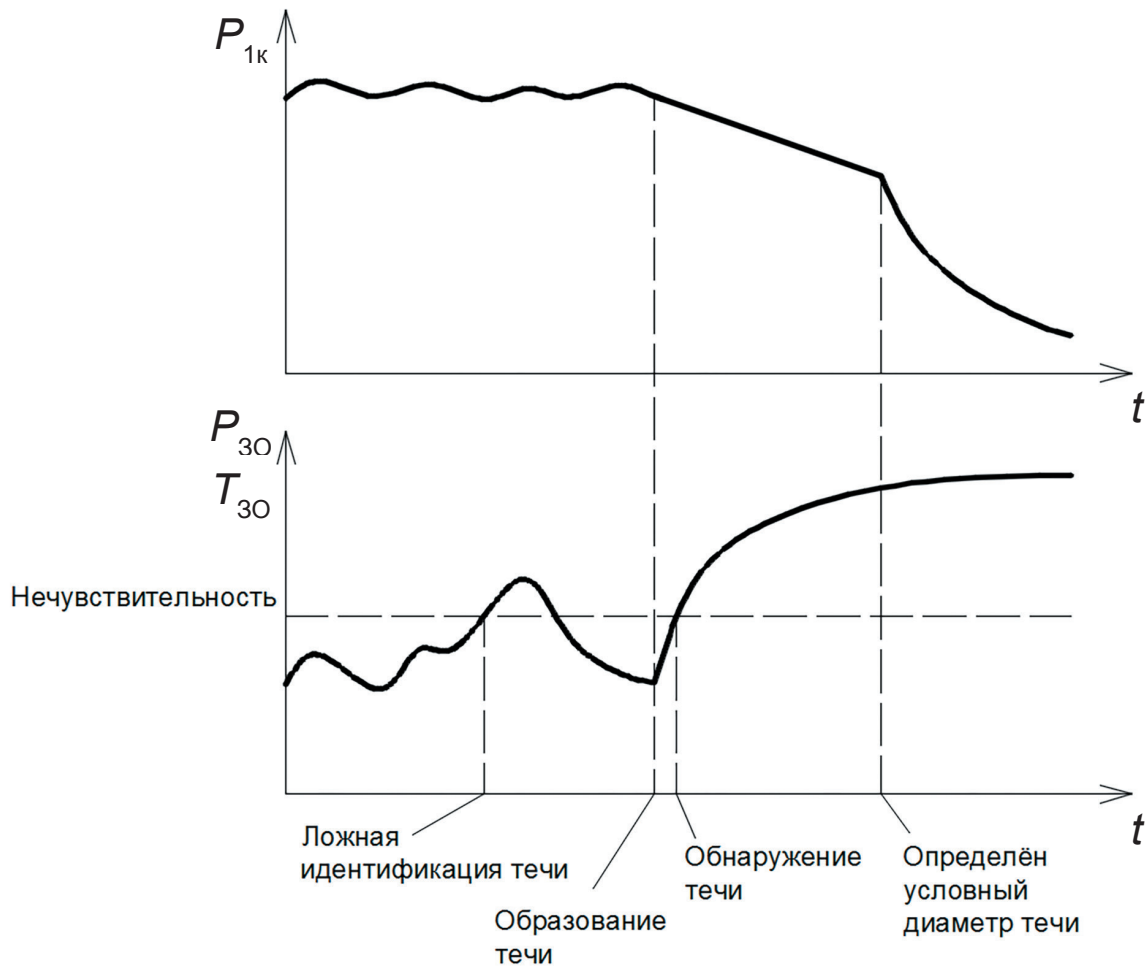


Рис. 6. Влияние течи на давление в первом контуре и параметры в защитной оболочке:

$P_{1к}$ – давление в первом контуре, P_{30} – давление в защитной оболочке,
 T_{30} – температура парогазовой среды в защитной оболочке

[Fig. 6. The effect of a leakage on the primary circuit pressure and the parameters in the containment:

$P_{1к}$ – primary circuit pressure, P_{30} – containment pressure, T_{30} – containment atmosphere temperature]

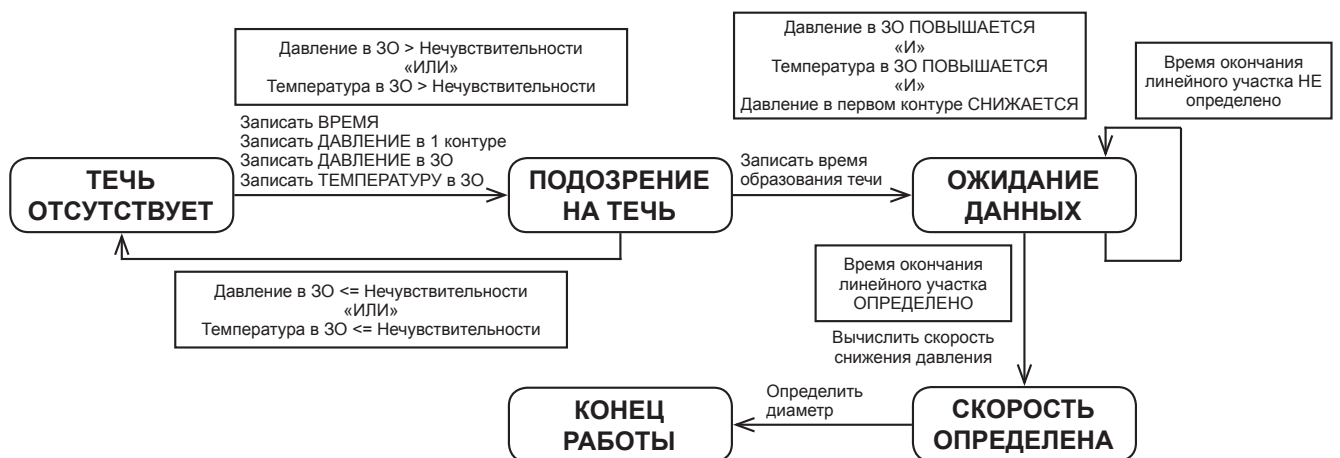


Рис. 7. Диаграмма переходов автомата определения течи

[Fig. 7. State diagram of the leakage detection state machine]



Рис. 8. Гистограмма отклонений диаметра течи
 [Fig. 8. Histogram of deviations of the leakage diameter]

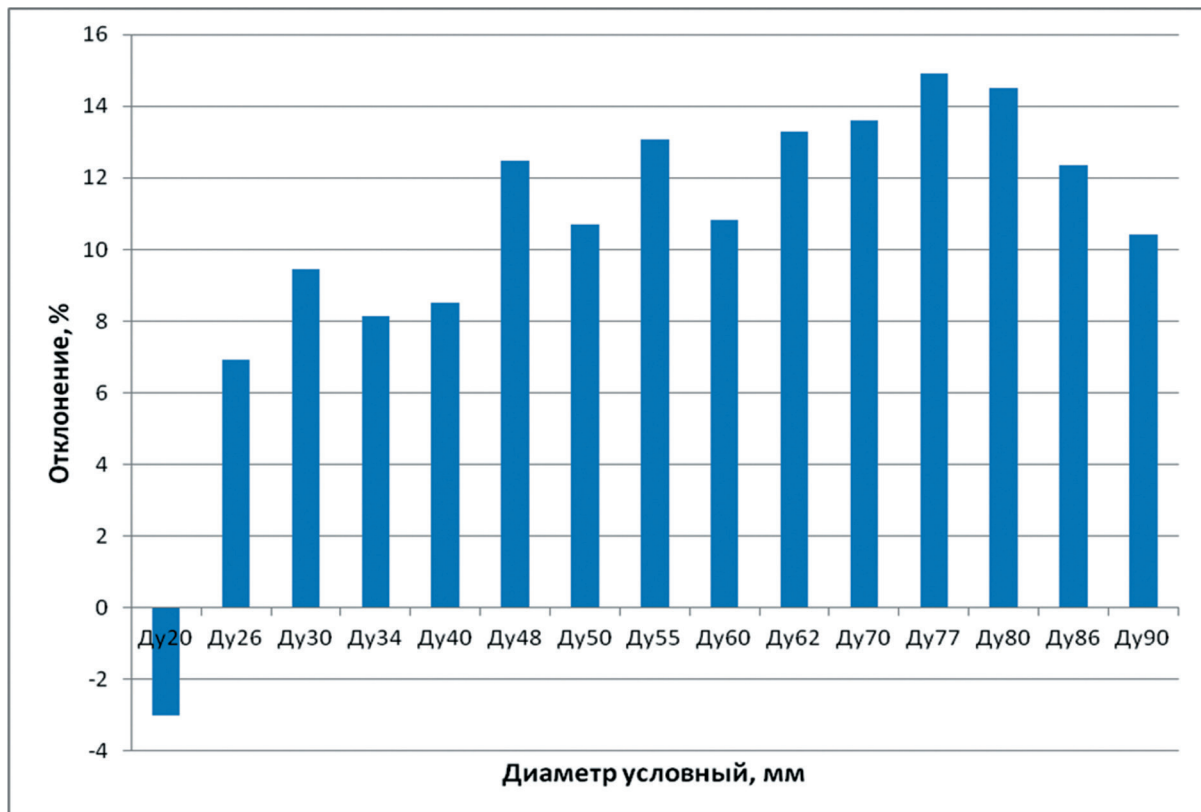


Рис. 9. Гистограмма отклонений для режимов с образованием течи после срабатывания аварийной защиты
 [Fig. 9. The histogram of deviations for the modes with the formation of a leakage after the SCRAM (Safety Control Rod Axe Man)]

Заключение

Представленный метод имеет как сильные, так и слабые стороны.

Достоинства:

- простота реализации – декомпозиция задачи на относительно простые подзадачи;
- высокая скорость работы – несмотря на то, что логика работы каждого автомата может быть сколь угодно сложной, при каждом проходе цикла выполняется только ее ограниченная часть;
- прозрачность алгоритма – выполнение алгоритма работы каждого автомата легко контролируется.

Недостатки:

- введение коэффициентов лишает алгоритм универсальности – возможна некорректная работа при других начальных условиях, например, течь при работе реактора на пониженном уровне мощности;
- возможна ошибка определения условного диаметра течи при образовании нескольких течей из других петель в помещении ЗО, во второй контур или при изменении размера течи во времени;

- необходимость частого получения данных – представленный в статье алгоритм определения течи получает данные один раз в секунду.

Однако, несмотря на перечисленные недостатки, вполне возможно использовать и комбинированный подход. Например, совместить жесткую логику автоматов с нейронными сетями [25] и (или) использовать конечные автоматы вместе с прямым расчетом по моделям для экспресс-оценки [23]. Общая идея комбинированного подхода заключается в постановке отдельных задач и формировании входных данных для нейронных сетей/моделей для экспресс-оценки конечными автоматами, например определения диаметра течи при известном сочетании отказов оборудования и времени возникновения течи. Комбинированный подход позволит обеспечить универсальность алгоритма оценки состояния аварийного энергоблока.

Также стоит отметить, что описанный алгоритм определения диаметра «малой» течи из первого контура не подходит для «большой» течи из-за совершенно иной феноменологии таких режимов. Для них необходимо разработать собственный алгоритм.

Литература

1. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleare. URL: <https://www.irsn.fr/EN/Pages/home.aspx> (дата обращения: 25.04.2021).
2. Strål säkerhets myndigheten. URL: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/about-the-authority/> (дата обращения: 25.04.2021).
3. Hungarian Atomic Energy Authority. URL: <https://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/web?OpenAgent> (дата обращения: 25.04.2021).
4. Knochenhauer M. Using Bayesian Belief Network (BBN) Modelling for Rapid Source Term Prediction – RASTEP Phase 1 / Vidar Hedtjärn, Per Alfheim. – Roskilde // Internal Report, Scandpower AB: 2012, p. 60.
5. Yuan Yuan L., Huiguo Y., Shaojun Z., Shuai M., Hongbo J. Core Damage Quick Assessment for NPP in China / Proceedings of International Youth Nuclear Congress 2016 (July 24–30, 2016). – Hangzhou, China, 2016.
6. Нормы радиационной безопасности. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НРБ-99/2009: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07 июля 2009 г. № 47.
7. Арбаев Г. Э., Кавун О. Ю., Курбонмамадов А. Ш., Хренников Н. Н. Методика экспресс-расчета распределения продуктов деления в условиях тяжелых аварий для Информационно-аналитического центра Ростехнадзора // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 4 (94). С. 3–11.
8. Lehtinen J., Munkberg J., Hasselgren J., Laine S., Karras T., Aittala M., Aila T. Noise2Noise: Learning Image Restoration without Clean Data / Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (October 2018). – Stockholm, Sweden, 2018.
9. Li Z., Wang C., Han M., Xue Y., Wei W., Li L-J., Li F-F. Thoracic Disease Identification and Localization with Limited Supervision / Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (June 18–22, 2018). – Salt Lake City, USA, 2018, pp. 8290–8299.
10. Wu Y., Schuster M., Chen Z., Le Q. V., Norouzi M., Macherey W., etc. Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap Between Human and Machine Translation. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1609.08144.pdf> (дата обращения: 25.04.2021).

11. Маркова С. В., Жигалов К. Ю. Применение нейронной сети для создания системы распознавания изображений // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 8–1. С. 60–64.
12. Silver D., Huang A., Maddison C. J., Guez A., Sifre L. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search // *Nature*. 2016. Vol. 529. Issue 7587. P. 484–489.
13. AlphaStar team. URL: <https://deepmind.com/blog/article/alphastar-mastering-real-time-strategy-game-starcraft-ii> (дата обращения: 25.04.2021).
14. Zeiler M. D., Fergus R. Visualizing and Understanding Convolutional Networks / *Proceedings of European Conference on Computer Vision (September 5–12, 2014)*. – Zurich, Switzerland, 2014, part I, LNCS 8689, pp. 818–833.
15. Yosinski J., Clune J., Nguyen A., Fuchs T., Lipson H. Understanding Neural Networks Thorough Deep Visualization / *Proceedings of 31st International Conference on Machine Learning, Deep Learning Workshop 2015 (June 2015)*. – Lille, France, 2015.
16. Кудрявцев В. Б., Алёшин С. В., Подколзин А. С. Введение в теорию автоматов. М.: Наука, 1985. 320 с.
17. Дэвид М. Харрис, Сара Л. Харрис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. Morgan Kaufmann Publishers, 2013. 1621 с.
18. Карпов В. Э. Теория компиляторов. Учебное пособие. 2-е изд., испр. и дополн. М., 2018. 92 с.
19. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.
20. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. СПб.: Питер, 2008. 167 с.
21. Татарчевский В. А. Применение SWITCH-технологии при разработке прикладного программного обеспечения для микроконтроллеров. Часть 1 // *Компоненты и технологии*. 2006. № 11.
22. Herviou K., Karjunen T., Miettinen J., Schmuck P. Development of a computer package for source term estimation in the event of accident in a light water reactor // *Scientific and technical report-2002*, 2002.
23. Пипченко Г. Р., Поликарпова А. М. Применение моделей для экспресс-оценки состояния критических функций безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР в целях оказания научно-технической поддержки Информационно-аналитическому центру Ростехнадзора / *Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»*. 2016. № 1 (3). С. 6.
24. Кавун О. Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов*. 1999. Вып. 2. С. 17–39.
25. Чьонг Ван Кхань Ньят. Метод идентификации типа и прогнозирование последствий аварии на АЭС: дис. на соискание степени канд. техн. наук: 05.14.03 / Чьонг Ван Кхань Ньят. – М., 2017. 200 с.

References

1. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleare. URL: <https://www.irsn.fr/EN/Pages/home.aspx> (reference date: 25.04.2021).
2. Strål säkerhets myndigheten. URL: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/about-the-authority/> (reference date: 25.04.2021).
3. Hungarian Atomic Energy Authority. URL: <https://www.oah.hu/web/v3/HAEAportal.nsf/web?OpenAgent> (reference date: 25.04.2021).
4. Knochenhauer M. Using Bayesian Belief Network (BBN) Modelling for Rapid Source Term Prediction – RASTEP Phase 1 / Vidar Hedtjärn, Per Alfheim. – Roskilde. Internal Report, Scandpower AB: 2012, p. 60.
5. Yuanyuan L., Huiguo Y., Shaojun Z., Shuai M., Hongbo J. (2016). Core Damage Quick Assesment for NPP in China. *Proceedings of International Youth Nuclear Congress 2016 (July 24–30, 2016)*. Hangzhou, China.
6. Normy radiatsionnoy bezopasnosti “Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy” [Radiation safety standards “General Provisions for Nuclear Power Plant Safety Assurance” (NRB-99/2009)]. 2009.
7. Arbaev G. E., Kavun O. U., Kurbonmamadov A. Sh., Khrennikov N. N. Metodika ekspress-rascheta raspredeleniya produktov deleniya v usloviyakh tyazhelykh avariyy dlya Informatsionno-analiticheskogo tsentra Rostekhnadzora [The methodology for fast estimation of fission products distribution in case of severe accidents

for Informational and Analytical center of Rostekhnadzor]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety. 2019, no. 4 (94), pp. 3–11 [in Russian].

8. Lehtinen J., Munkberg J., Hasselgren J., Laine S., Karras T., Aittala M., Aila T. (2018). Noise2Noise: Learning Image Restoration without Clean Data. *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning* (October 2018). Stockholm, Sweden.

9. Li Z., Wang C., Han M., Xue Y., Wei W., Li L.-J., Li F.-F. (2018). Thoracic Disease Identification and Localization with Limited Supervision. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (June 18–22, 2018). Salt Lake City, USA, pp. 8290–8299.

10. Wu Y., Schuster M., Chen Z., Le Q. V., Norouzi M., Macherey W., etc. *Google's Neural Machine Translation System: Bridging the Gap Between Human and Machine Translation*. 2016. URL: <https://arxiv.org/pdf/1609.08144.pdf> (reference date: 25.04.2021).

11. Markova S. V., Ghigalov K. U. *Primeneniye neyronnoy seti dlya sozdaniya sistemy raspoznavaniya izobrazheniy* [Using a neural network to create an image recognition system]. *Fundamental'nyye issledovaniya – Basic research*. 2017, no. 8–1, pp. 60–64 [in Russian].

12. Silver D., Huang A., Maddison C. J., Guez A., Sifre L. *Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search*. *Nature*. 2016, vol. 529, issue 7587, pp. 484–489.

13. AlphaStar team. URL: <https://deepmind.com/blog/article/alphastar-mastering-real-time-strategy-game-starcraft-ii> (reference date: 25.04.2021).

14. Zeiler M. D., Fergus R. *Visualizing and Understanding Convolutional Networks*. *Proceedings of European Conference on Computer Vision* (September 5–12, 2014). Zurich, Switzerland, 2014, part I, LNCS 8689, pp. 818–833.

15. Yosinski J., Clune J., Nguyen A., Fuchs T., Lipson H. *Understanding Neural Networks Thorough Deep Visualization*. *Proceedings of 31st International Conference on Machine Learning, Deep Learning Workshop 2015* (June 2015). Lille, France, 2015.

16. Kudryavcev V. B., Aleshin S. V., Podkolzin A. S. (1985). *Vvedeniye v teoriyu avtomatov* [Introduction to Automata Theory]. Moscow: Nauka. 320 p. [in Russian].

17. David M. H., Sarah L. H. (2013). *Digital Design and Computer Architecture*. Morgan Kaufmann Publishers. 1621 p.

18. Karpov V. E. (2018). *Teoriya kompilyatorov* [Compiler Theory]. Textbook. 2-nd ed. Moscow. 92 p. [in Russian].

19. *Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy" (NP-001-15)* [Federal rules and regulations in the field of the use of atomic energy "General Provisions for Nuclear Power Plant Safety Assurance" (NP-001-15)]. 2015.

20. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. (2008). *Avtomatnoye programmirovaniye* [Automatic programming]. Saint Petersburg: Piter. 167 p. [in Russian].

21. Tatarchevskiy V. A. *Primeneniye SWITCH-tehnologii pri razrabotke prikladnogo programmogo obespecheniya dlya mikrokontrollerov. Chast' 1* [Application of SWITCH technology in the development of application software for microcontrollers. Part 1]. *Komponenty i tehnologii – Components and technologies*, 2006, no. 11 [in Russian].

22. Herviou K., Karjunen T., Miettinen J., Schmuck P. *Development of a computer package for source term estimation in the event of accident in a light water reactor*. *Scientific and technical report-2002*, 2002.

23. Pipchenko G. R., Polikarpova A. M. *Primeneniye modeley dlya ekspress-otsenki sostoyaniya kriticheskikh funktsiy bezopasnosti AES s reaktorami tipa VVER v tselyakh okazaniya nauchno-tehnicheskoy podderzhki Informatsionno-analiticheskomu tsentru Rostekhnadzora* [Models for the rapid assessment of critical safety functions' status on NPP with WWER for scientific and technical support to information and analytical center of Rostekhnadzor]. *Nauchno-tehnicheskii sbornik "Tehnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok"* – Scientific and technical collection "Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies". 2016, no. 1 (3), p. 6 [in Russian].

24. Kavun O. Yu. *Metodika modelirovaniya dinamiki energobloka AES, realizovannaya v programmnom komplekse RADUGA-EU* [Method for modeling the dynamics of the power unit of nuclear power plants, implemented in the RAINBOW-EU software]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika yadernykh reaktorov – Questions of Atomic Science and Technology. Ser.: Physics of Nuclear Reactors*, 1999, vol. 2, pp. 17–39 [in Russian].

25. Chyong Van Kkhan' N'yat. Metod identifikatsii tipa i prognozirovaniye posledstviy avarii na AES: dissertatsiya na soiskaniye stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Method for identifying the type and predicting the consequences of an accident at a nuclear power plant: Phd: 05.14.03]. Chyong Van Kkhan' N'yat. Moscow, 2017. 200 p.

Сведения об авторах

Пипченко Герман Романович, научный сотрудник отдела безопасности атомных станций, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Поликарпова Анастасия Михайловна, научный сотрудник отдела безопасности атомных станций, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Author credentials

Pipchenko German Romanovich, Scientific Researcher of Nuclear Power Plants Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: pipchenko@secnrs.ru.

Polikarpova Anastasiya Mikhaylovna, Scientific Researcher of Nuclear Power Plants Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140).

Для цитирования

Поликарпова А. М., Пипченко Г. Р. Применение конечных автоматов для решения задачи определения исходного события на АЭС с ВВЭР-1000 в условиях аварийного реагирования // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 2 (100). С. 40–52. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.004.

For citation

Polikarpova A. M., Pipchenko G. R. Finite state machine application to determine initial event at NPP with VVER-1000 during emergency response. Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 2 (100), pp. 40–52. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.004 [in Russian].

