



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДВАБ ДЛЯ ПОИСКА ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ НА АЭС С ВВЭР-1200

26.11.2025

Ушаков Дмитрий Юрьевич

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) – важный инструмент для оценки рисков на АЭС. Но **повышение сложности моделей ВАБ неэффективно** увеличивает точность применяемого метода.

Современные методы **ВАБ** могут дать вероятностную оценку известным событиям, **но могут пропустить сценарии, которые еще не были выявлены.**

Для повышения качества анализа безопасности АЭС актуальной задачей является выявление **всех возможных наиболее опасных сценариев.**

Для этого необходимо связать инструментарий динамического анализа (на основе расчетных кодов) и подходов **ВАБ.**

Основные элементы ДВАБ



Основные элементы предлагаемого метода :

- Необходимость использования **методов поиска глобального оптимума**, например **генетический алгоритм**;
- Моделирование динамических процессов проводится с помощью системных кодов типа **KORCAP, RELAP5 и т.п.**;
- **Сценарии** в рамках ДВАБ представлены **набором событий: отказами оборудования АЭС, действиями персонала.**
- Необходимо учитывать **неопределенности**:
 - **неточностями моделей и параметров**, кода, модели АЭС;
 - **чисто вероятностную природу**, например, вероятность отказа клапана, насоса и т.п.
- **Опыт применения РУ:** ВВЭР-1000, PWR, BWR, анализ пожаров ЯЭУ атомных ледоколов.

Генетический алгоритм в ДВАБ



ГА - это концепция **эволюционных вычислений**, базирующаяся на биологических процессах. ГА - эвристический **метод глобальной оптимизации**. Основные шаги ГА в ДВАБ:



В сложных системах **зависимости функции приспособленности** от варьируемых параметров **нелинейные, немонотонные**, могут быть разрывы → ГА позволяет контролировать такие ситуации. 4

Цель и задачи работы



Цель: на основе ранее накопленного опыта провести исследование **всех возможных вариантов** для сценариев: гильотинный разрыв ГЦТ, малая течь холодной нитки для АЭС с **РУ ВВЭР-1200** с помощью подхода ГА-ДВАБ.

Задачи:

1. Подготовка расчетной модели на RELAP5, выбор варьируемых параметров;
2. Определение параметров, схем реализации генетического алгоритма;
3. Проведение расчетов;
4. Анализ результатов.

Расчетная модель

В данной работе используется модель РУ ВВЭР-1200 для RELAP5.

В нее входят следующие элементы: реактор, 4 петли, второй контур, пассивная часть САОЗ, СПЗАЗ.

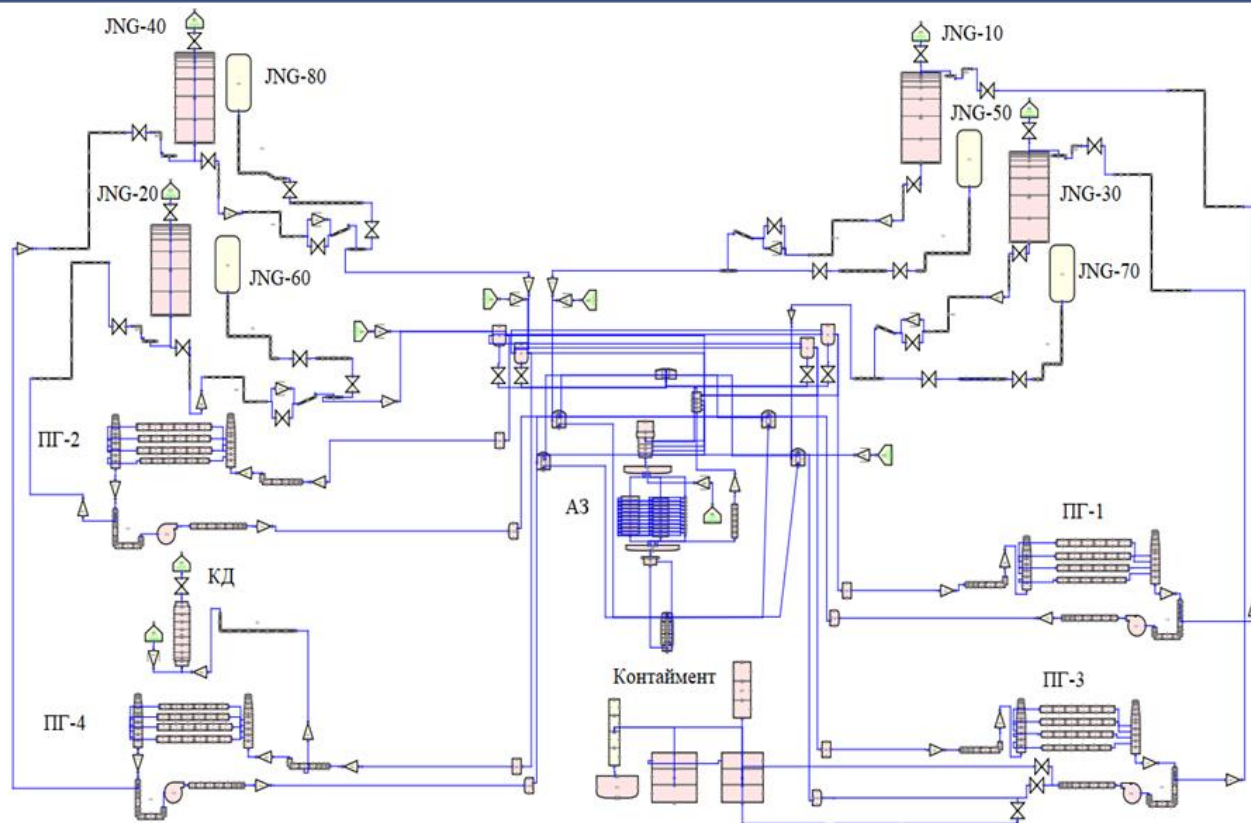


Рис. 1 Нодализация схема первого контура модели АЭС с РУ ВВЭР-1200

Для модели были введены следующие допущения - несрабатывание:

- 1) системы аварийного и планового расхолаживания(САПР);
- 2) системы аварийного расхолаживания парогенераторов(САР);

При рассмотрении задач безопасности очень важен выбор **критерия безопасности**, который, в последствии, станет целевой функцией для ГА.

- была выбрана **максимальная температура оболочки ТВЭЛов горячего канала**.

В сценарии **LBLOCA** во всех вариантах присутствует **первоначальное, кратковременное** повышение температуры оболочки ТВЭЛов.

⇒ГА был настроен на **поиск максимального** значения температуры оболочки ТВЭЛов горячего канала **после 50 секунды с начала аварии**.

В сценарии **LOCA** поиск максимального значения ведется **от начала аварии до 4000 секунд**

Результаты полученные с помощью ГА - ДВАБ



Для исследования параметрического пространства были выбраны следующие величины:

1. **Временные задержки** срабатывания СПЗАЗ, отдельные для каждой из 4-ех пар гидроемкостей;
2. **Неопределённости модели критического истечения** Henry-Fauske для разрывов ГЦТ;
3. **Неопределенности параметров теплоотдачи** для поверхностей ТВЭЛ активной зоны;
4. **Время включения** БРУ-К оператором.

Параметрическое пространство с учетом нодализации модели состояло из **29 компонент**.

Результаты ГА-ДВАБ:

Было проведено 2444 расчета;

Максимальная температура достигла:

- **больше 1500K** в 7 расчетах;
- **больше 1000K** в 250 расчетах.

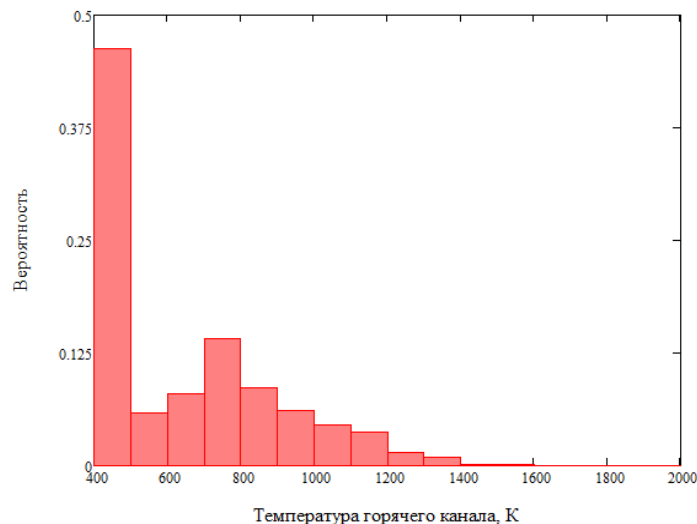


Рис. 2 Плотность вероятности по интервалам температур горячего канала 8

Наиболее опасные сценарии

Основные моменты:

- Схожая динамика на начальном этапе
- Первыми отделяются варианты **33, 24, 102** из-за проявляющегося порогового (cliff)-эффекта, и переходом в закритический режим теплообмена
- Варианты **1076.0, 1320.0, 324** вначале выходят из закритического режима, но около **200 секунд**, критическое паросодержание достигается в центральной части АЗ, что приводит к разогреву ТВЭЛ

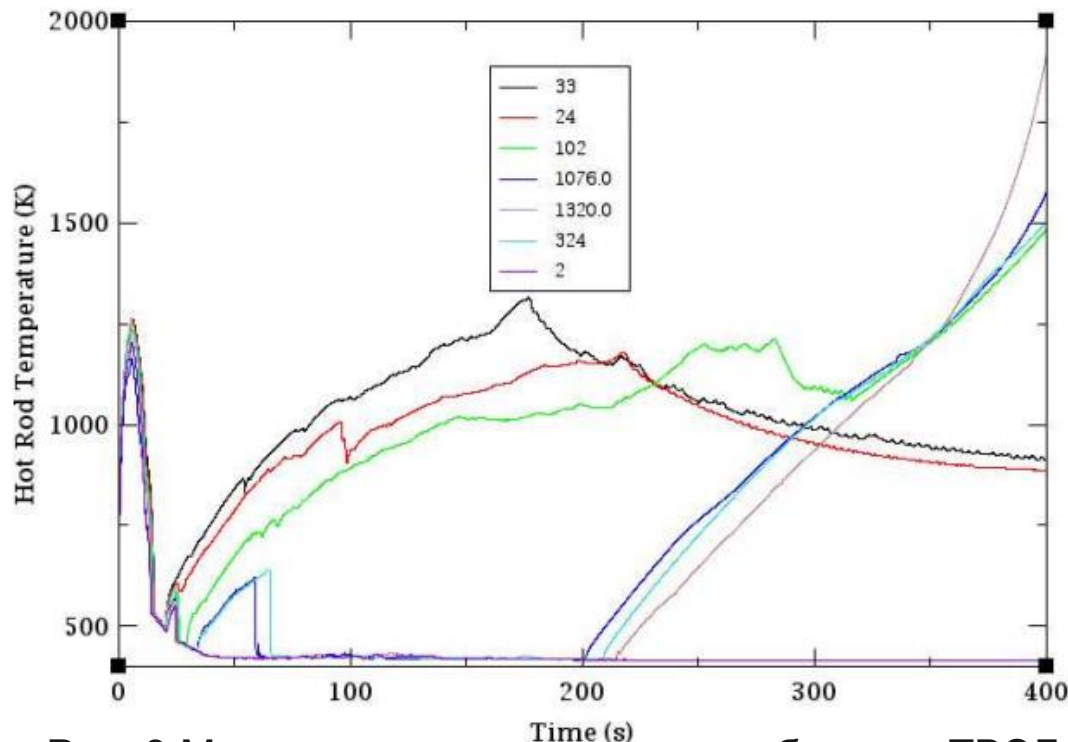


Рис. 3 Максимальная температура оболочки ТВЭЛ в найденных с помощью ДВАБ вариантах аварий

Наиболее опасные сценарии

Стоит отметить **особое поведение 102-й** варианта аварии.

Начальный этап схож с вариантами 33 и 24.

На конечном этапе динамика похожа на 1076.0, 1320.0, 324.

Это связано с **различными режимами** в различных частях горячего канала.

В верхней и нижней частях горячего канала **паросодержание меньше**, из-за залива гидроемкостями САОЗ, и конденсации.

В центральной части этого не происходит, что приводит к **большему паросодержанию**, переходу в кризисный режим и дальнейшему разогреву.

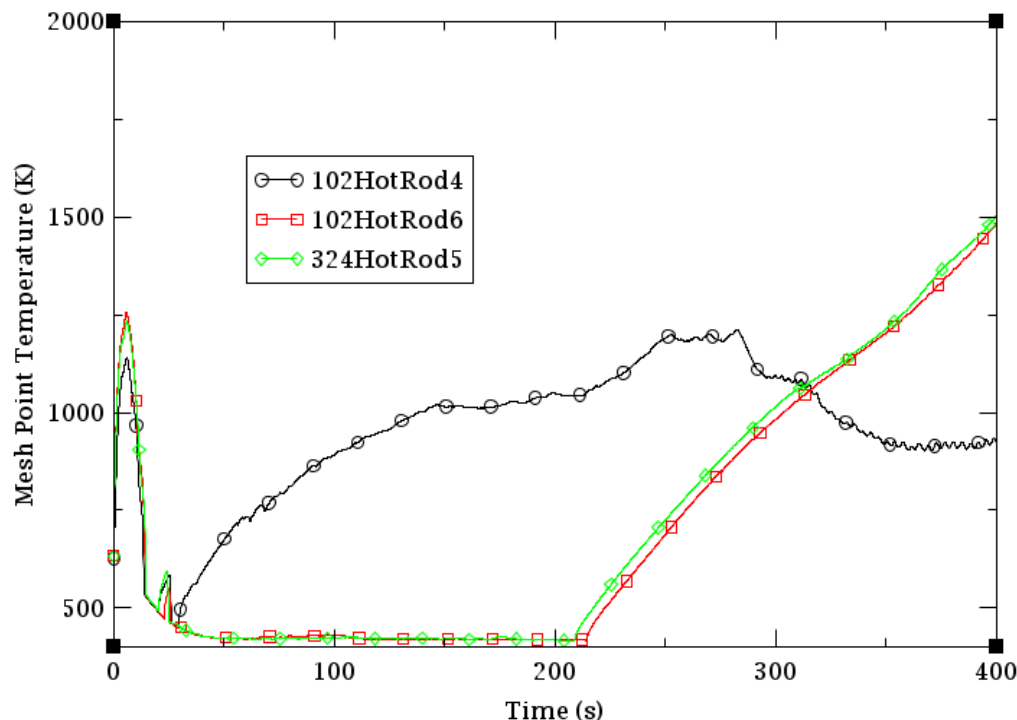


Рис. 4 Максимальная температура оболочки ТВЭЛа в 102-ом сценарии, в сравнении с 324-ым

Сценарий «малая течь»

Параметрическое пространство с учетом нодализации модели состояло из **32 компонент**.

Дополнительно варьировались:

- Диаметр течи;
- Задержка выхода СПОТ на полную мощность.

Результаты ГА-ДВАБ:

- Было проведено 2250 расчета;
- Максимальная температура достигла 1057 K.

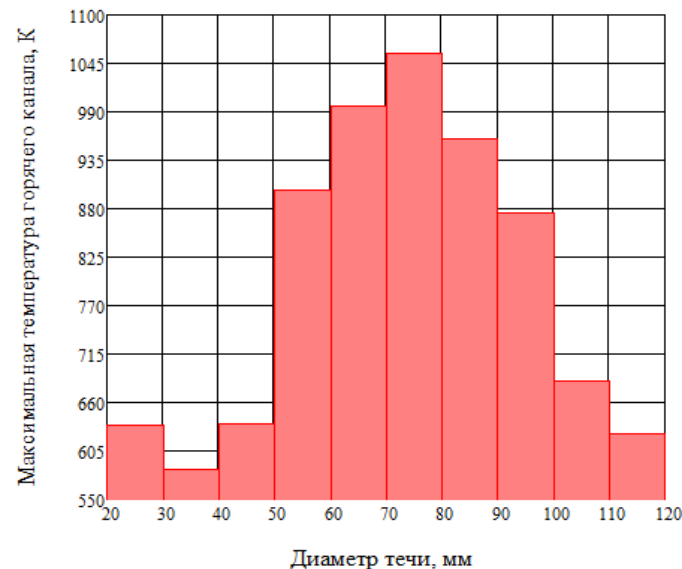


Рис. 5 Распределение максимальных температур на интервалах варьируемых диаметров

Сценарий «малая течь»

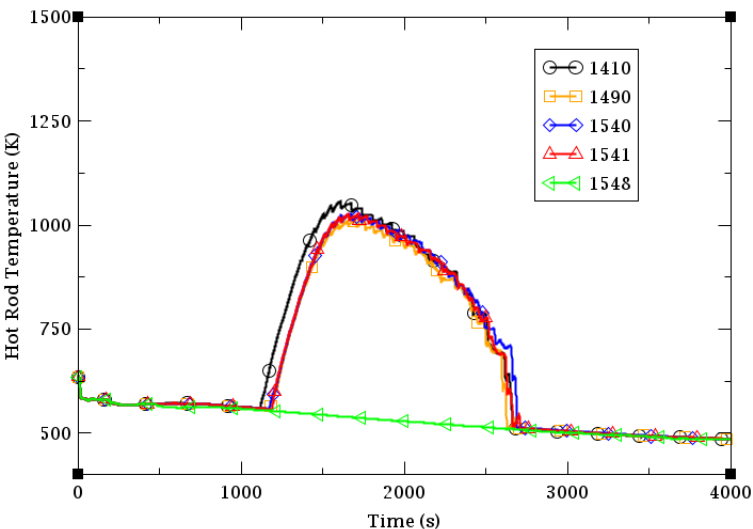


Рис. 6 Температуры горячего канала

Около 500 секунд резкое снижение давление в первом контуре в 1548 расчете(рис.7).

Это связано с уменьшением давления во втором контуре(рис.8)

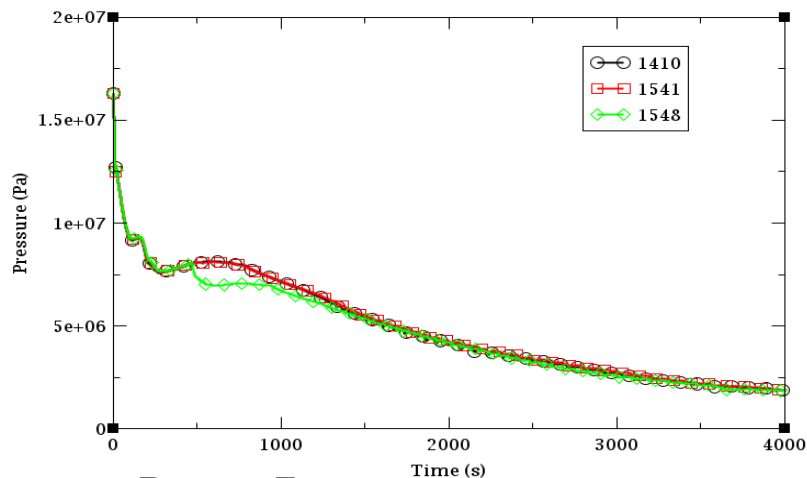


Рис. 7 Давление в первом контуре

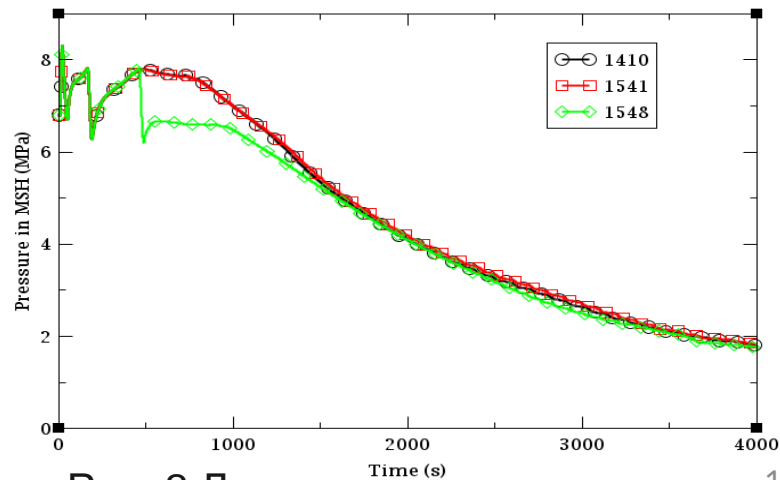


Рис. 8 Давление во втором контуре¹²

Сценарий «малая течь»

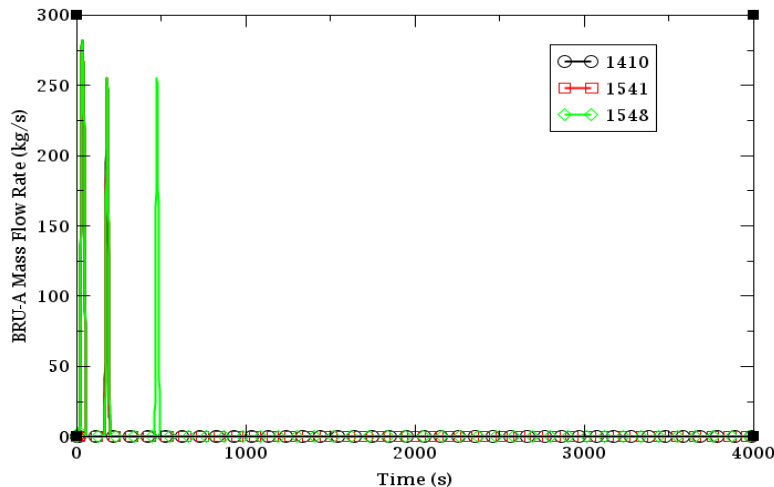


Рис. 9 Расход БРУ-А

Более поздний выход(к 560 секунде) СПОТ на мощность в расчете 1548(рис.10), в итоге, приводит к меньшей температуре горячего канала, чем более ранний(к 526 секунде), как в расчете 1410.

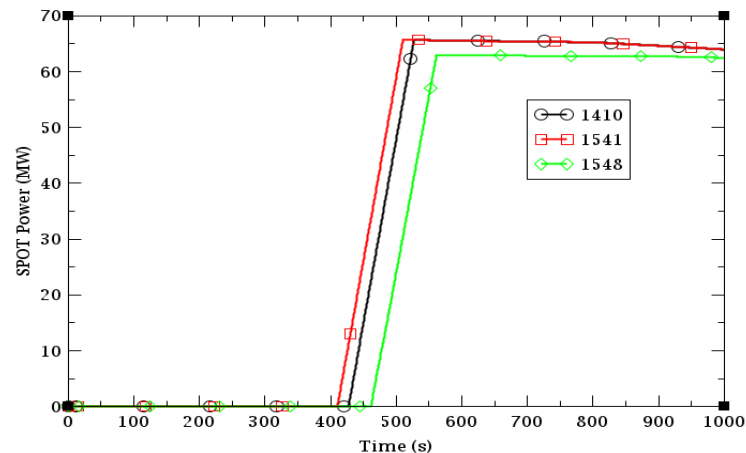


Рис. 10 Мощность СПОТ

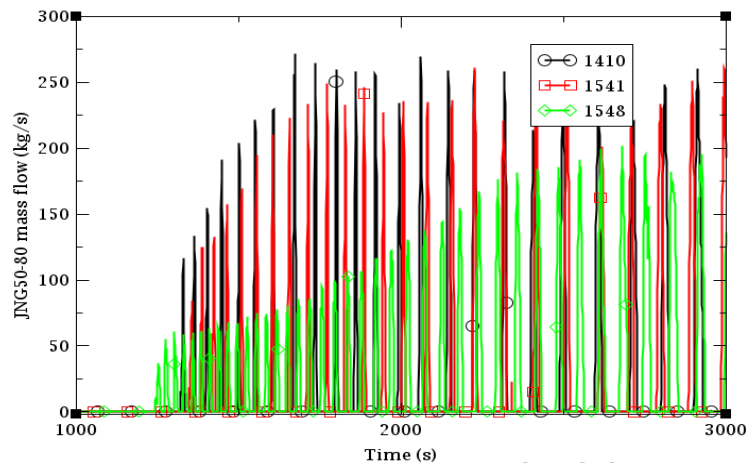
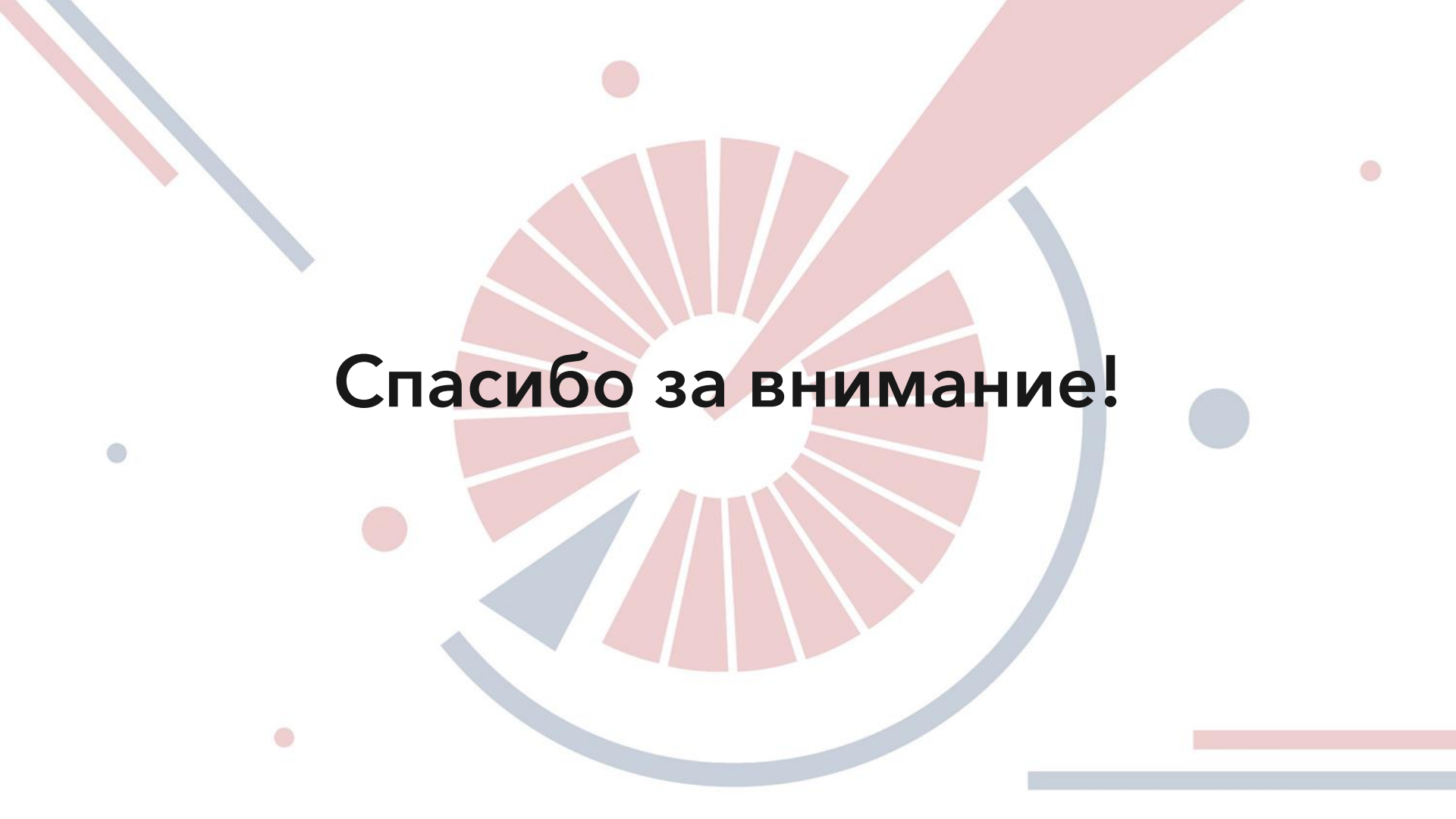


Рис. 11 Расход ПЧ CAOЗ

- Представлен метод **ДВАБ с использованием ГА**
 - В качестве **демонстрации методики, ГА-ДВАБ применен для аварий с гильотинным разрывом ГЦТ, и малой течью РУ ВВЭР-1200 для анализа всех возможных вариантов развития этого сценария.**
- 1) В рассматриваемых сценариях происходит **сложное взаимодействие** компонентов системы, времен срабатывания систем безопасности и различных физических процессов. По результатам расчетов выявлены **неочевидные априори** потенциально опасные варианты сценария развития аварии.
 - 2) В примененной в работе реализации метода ГА-ДВАБ используются **параллельные вычисления** для обеспечения возможности анализа **всех возможных вариантов** развития сценария.
 - 3) Показана возможность ГА-ДВАБ находить **все возможные варианты протекания аварии.**
- Примененная в работе реализация метода ГА-ДВАБ **является практичным инструментом, который не заменит ВАБ, но станет хорошим дополнением, для поиска неочевидных вариантов реализации сценариев аварий.**



Спасибо за внимание!