

# **Общая методология анализа последствий внешних экстремальных воздействий для безопасности АЭС**

**д.т.н. С.Л.Буторин, ГИ ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург, Россия;**

**к.т.н. А.Г.Краев, МЦЯБ Минатома РФ, Москва, Россия;**

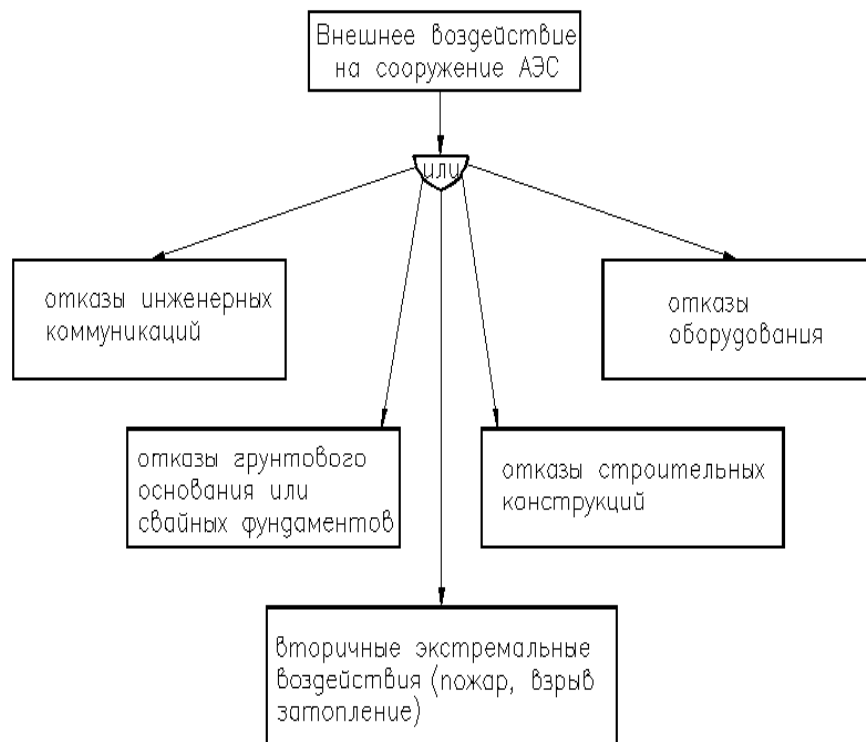
**д.т.н. С.Г.Шульман, СПбГТУ, Санкт-Петербург, Россия.**

## **Методологическая основа анализа последствий:**

**системный подход, основанный на сочетании традиционных методов механики с элементами теории риска, теории надежности строительных конструкций и теории надежности сложных систем.**

**Предлагаемая модель оценки последствий внешних воздействий для АЭС основывается на рассмотрении трех основных факторов:**

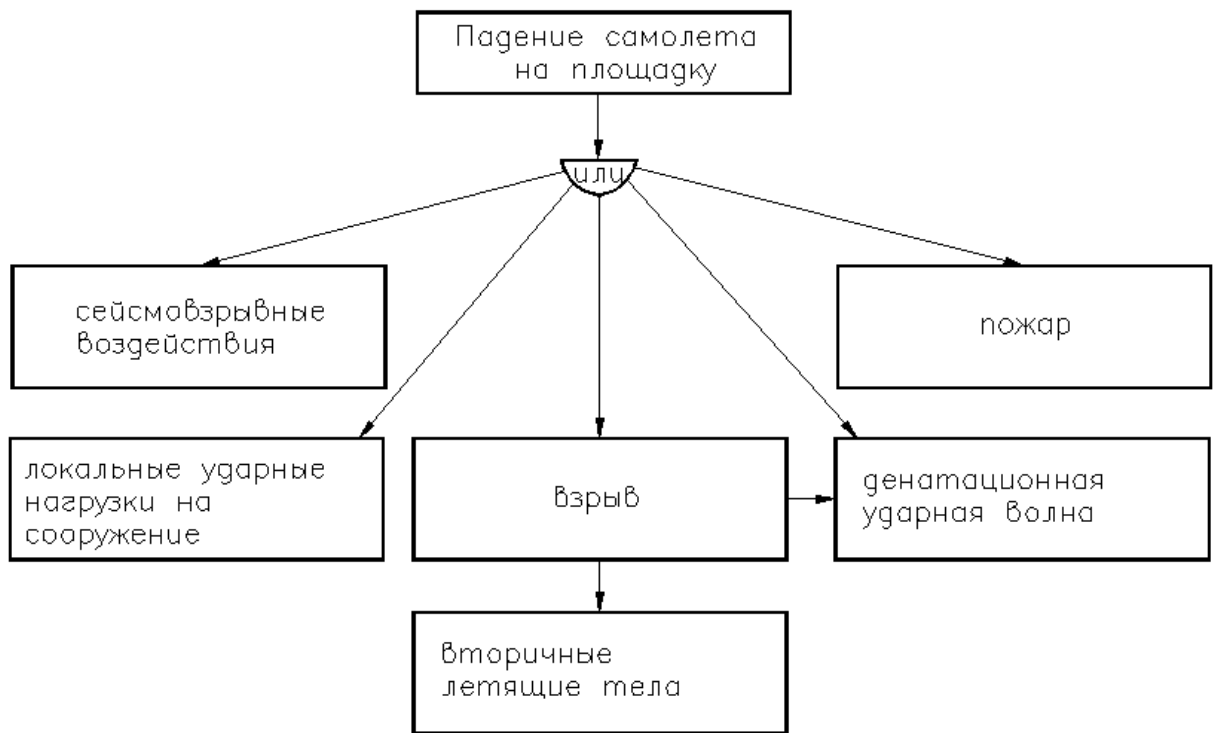
- интегральных (детерминистических или вероятностных) показателей надежности и безопасности станции;**
- анализа последствий экстремального воздействия на все здания, сооружений и расположенное в них оборудование, которые необходимы для выполнения станцией в целом требуемых функций;**
- комплексном рассмотрении всех возможных нагрузок и явлений, которые могут возникнуть при исходном внешнем воздействии, учете возможных возникновения вторичных экстремальных воздействий (пожары, взрывы, затопление и т.д.)**



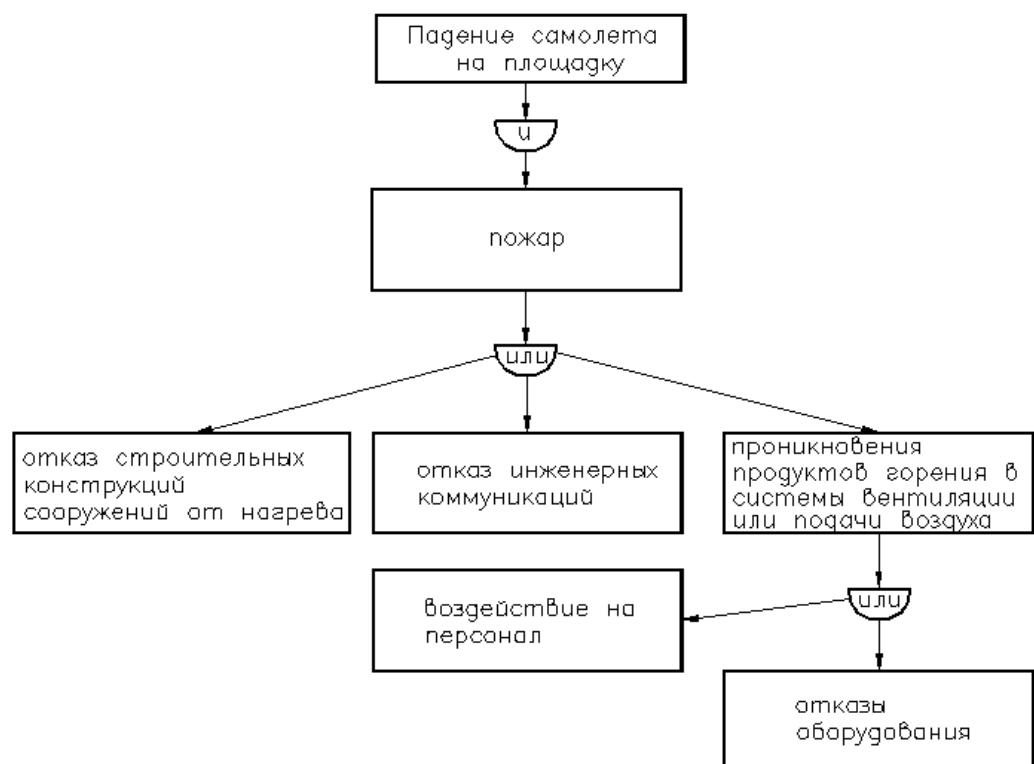
**Возможные события для сооружения в составе АЭС  
при внешнем экстремальном воздействии**

**Типы возможных отказов основных элементов сооружений АС  
при внешних воздействиях**

<p align="center"><b>Грунтовые основания</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• потеря несущей способности</li> <li>• крены</li> <li>• осадки</li> <li>• разжижение водонасыщенных несвязных грунтов</li> </ul>
<p align="center"><b>Свайные фундаменты</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• потеря прочности сечений свай</li> <li>• потеря несущей способности</li> <li>• потеря устойчивости грунта по условию ограничения бокового давления</li> </ul>
<p align="center"><b>Грунтовые сооружения (дамбы, плотины)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• разрушение</li> <li>• размыв</li> <li>• потеря устойчивости откосов и экранов</li> </ul>
<p align="center"><b>Туннели</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• нарушение выполнения условий прочности для обделки (по несущей способности)</li> <li>• потеря целостности по условиям местной прочности</li> </ul>
<p align="center"><b>Строительные конструкции зданий</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• потеря несущей способности</li> <li>• потеря целостности (герметичности) по условиям общей или местной прочности</li> </ul>
<p align="center"><b>Облицовки, гермопроходки, шлюзы</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• течь</li> <li>• разрушение</li> </ul>
<p align="center"><b>Технологические элементы</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• отказы, обусловленные колебаниями сооружения</li> <li>• отказы, обусловленные нарушением условий прочности для оснований и свайных фундаментов</li> <li>• отказы, обусловленные разрушением инженерных коммуникаций</li> <li>• отказы, обусловленные разрушением конструкций</li> <li>• отказы, обусловленные возможными сопутствующими явлениями (пожар, взрыв, затопление)</li> </ul>



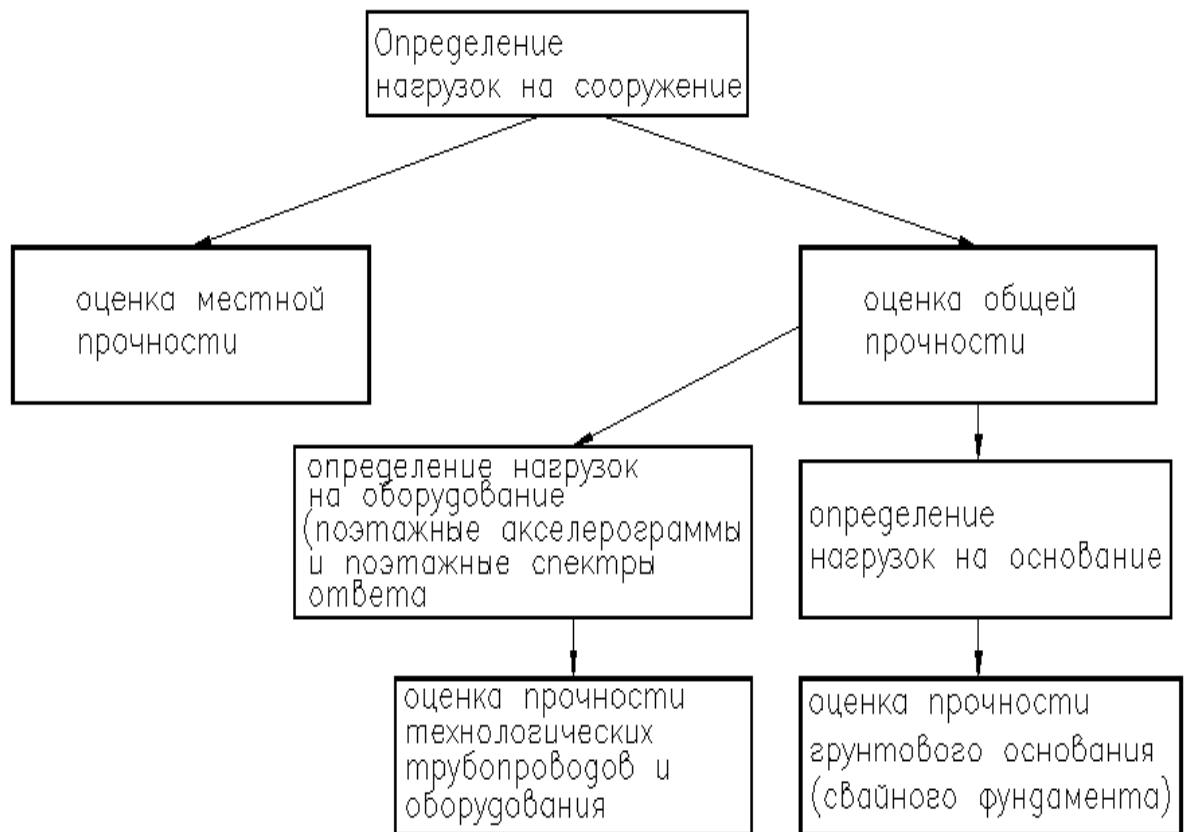
**Возможные нагрузки и воздействия при падении летательного аппарата на площадку АЭС.**



**Возможные отказы при пожаре, вызванного горением авиационного топлива**

## Оценка частоты исходных (внутренних) событий для АЭС с реактором корпусного типа

Состояние АС	Оценка частоты событий 1/год
<b>Нормальные условия эксплуатации</b>	
• эксплуатация на мощности	~0.71
• перегрузка топлива	0.17
<b>Обесточивание</b>	
• кратковременное	0.08
• длительное	$7 \cdot 10^{-3}$
<b>Отказы в системах, влияющих на реактивность (снижение ионизации борной кислоты)</b>	$10^{-2}$
<b>Подпитка контура холодной водой</b>	$10^{-2}$
<b>Аварийные режимы</b>	
• LOCA (всех типов)	$3 \cdot 10^{-3}$
• течь из первого контура за пределы гермообъема	$10^{-4}$
• нарушение отвода тепла от I контура (без разрывов)	$3 \cdot 10^{-3}$



**Общая схема оценки прочности основных элементов сооружения при падении самолета**

**Совместный проект № 7**  
**РМЦЯБ Минатома РФ и US INSC**

**"КОНСТРУКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ"**

**Цель проекта - совершенствование и верификация программно-методических средств для решения задач анализа сейсмостойкости, динамики и остаточного ресурса оборудования и строительных конструкций действующих и вновь разрабатываемых реакторных установок различного типа.**

**Проводимые работы предусматривают:**

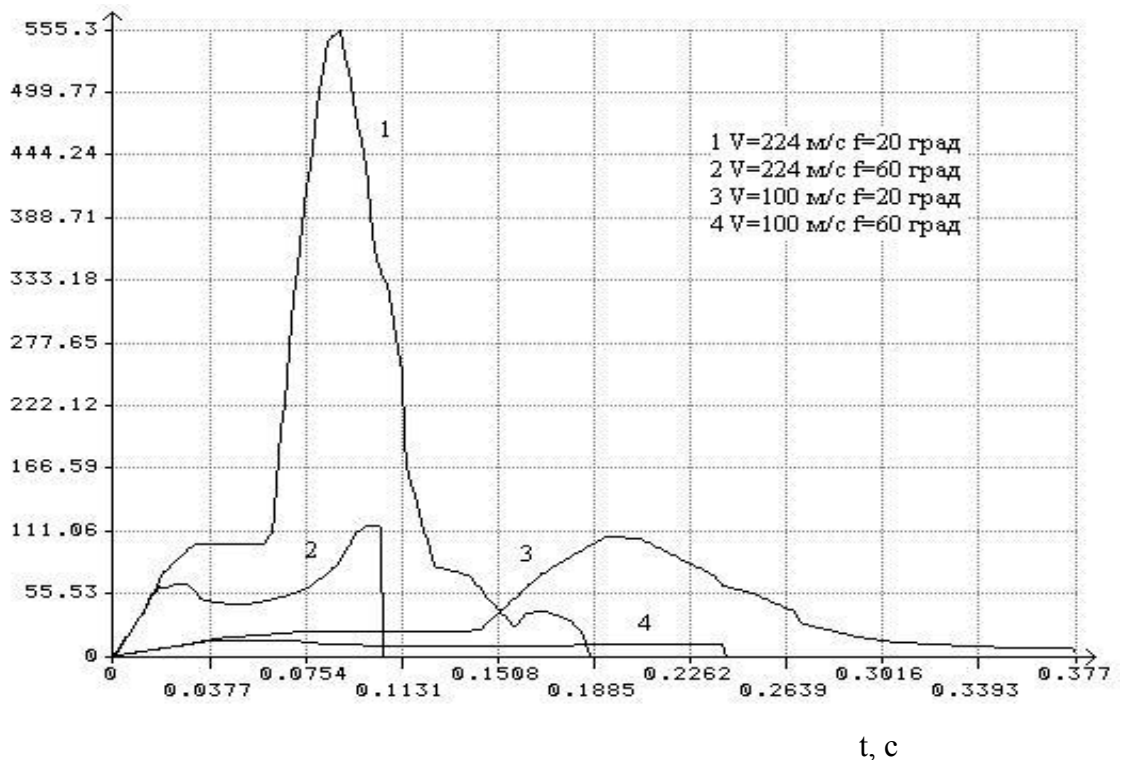
- **методологическое и методическое обеспечение целевого совершенствования существующих или разрабатываемых вычислительных кодов для моделирования трехмерных задач статики и динамики (действия силовых и температурных нагрузок при проектных и тяжелых авариях, сейсмические воздействия, падение самолета, ударную волну и т.д.);**
- **разработку поддерживающих инженерные расчеты баз данных;**
- **разработку и совершенствование методологии верификации и тестирования программного обеспечения;**
- **создание системы «bench-mark» примеров для выполнения исследований по подтверждению достоверности и совершенствование принятых подходов, методик и критериев;**
- **проведение прикладных исследований по анализу устойчивости ключевых компонент АЭС с канальными и корпусными типами реакторов к внешним экстремальным воздействиям.**

# Определение динамических нагрузок на строительные конструкции при ударном воздействии (код CONUS)

## Основные примененные подходы:

- представление летящего тела в виде жесткопластического стержня с распределенными по длине параметрами - жесткостью и массой;
- учет влияния податливости мишени путем схематизации конструкции системой с одной степенью свободы, имеющей эквивалентную массу и восстанавливающую силу, зависящую от перемещения конструкции (применение метода Бубнова-Галеркина);
- учет взаимодействия летящего тела с жесткой преградой при ударах как в конусе трения, так и вне его;

F, МН



Пример определения нагрузки на строительные конструкции при ударе гражданского самолета первой группы массой 130 тонн.

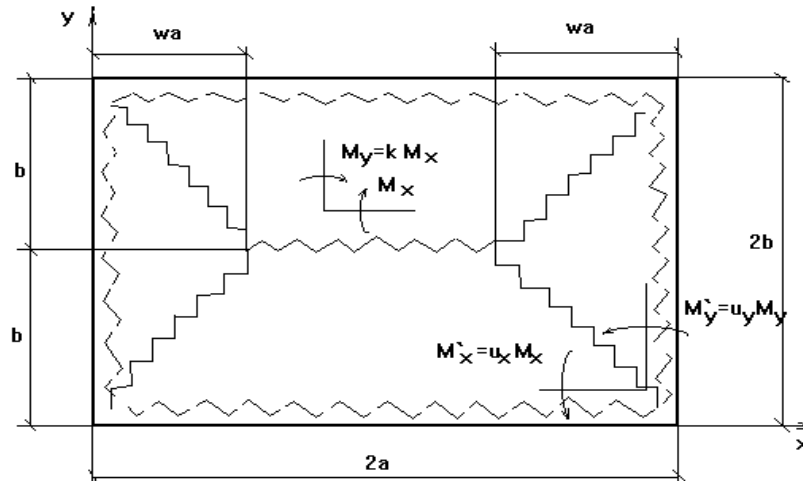
**Анализ местной прочности конструкций,  
основанный на применении эмпирических формул  
(код TOR)**

**Область применения эмпирических формул -**

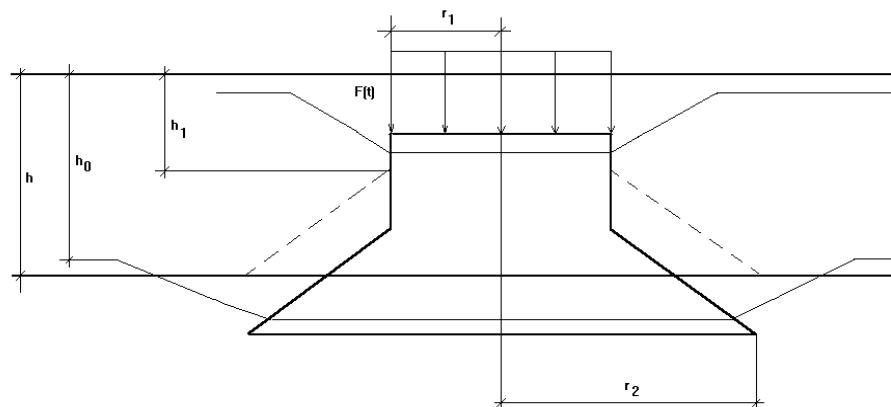
**для сравнительно небольших и жестких тел (снаряды, обломки самолетов, летящие тела, возникающие при внутренних авариях, предметы, увлекаемые взрывами, ураганом или торнадо и т. п.)**

- *Модифицированная формула Петри (Petry)*
- *Формула корпуса армейских инженеров*
- *Модифицированная формула NDRC*
- *Формула Амманна и Уитнея (Ammann and Whitney)*
- *Формула BRL*
- *Формула корпорации Бечтел (Bechtel Corporation)*
- *Формула Стоуна и Вебстера (Stone and Webster Corporation)*
- *Формула CEA-EDF-AEEW*
- *Формула Кара (Kar)*
- *Формула Дегена (Degen)*
- *Формула Чанга (Chang)*
- *Формула Халдара и Миллера (Halдар and Miller)*
- *Формула Хьюеса (Hughes)*
- *Формула Адели и Амина (Adeli and Amin)*
- *Формула Риеры (Riera)*

**Применение метода предельного равновесия  
для анализа разрушения конструкций  
при внешних динамических воздействиях  
(код KUB)**



**Схема разрушения заделанной по контуру пластины  
под действием распределенной нагрузки**



**Схема разрушения с образованием конуса выбивания,  
состоящего из конической и цилиндрической частей.  
с прямолинейной образующей**

**Анализ надежности строительных конструкций при ударе  
деформируемых летящих тел с использованием  
иммитационных моделей (код POLINOM)**

- **определение нагрузок на строительные конструкции с использованием кода CONUS;**
- **использование механизмов разрушения железобетона, построенных в рамках теории предельного равновесия на основании известных экспериментальных данных о разрушении железобетонных конструкций;**
- **варьируемые переменные: толщина конструкции, армирование хомутами, армирование верхней продольной арматурой, армирование нижней продольной арматурой, масса летательного аппарата, скорость движения летательного аппарата в момент удара, угол между направлением движения летательного аппарата и нормалью к поверхности сооружения.**
- **выполнение статистического анализа моделей (проверок регрессионного анализа):**
  - **проверка дисперсий на однородность;**
  - **проверка модели на адекватность;**
  - **проверка значимости коэффициентов регрессии.**