

## **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;**

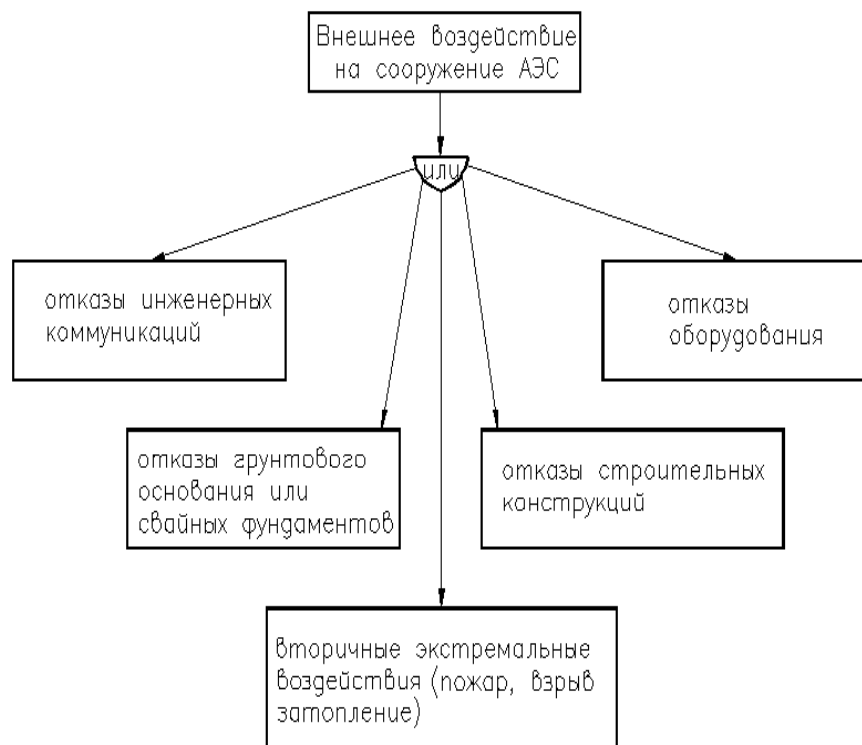
**д.т.н. С.Г.Шульман, СПбГТУ, Санкт-Петербург, Россия.**

В докладе излагается общая предлагаемая методология анализа безопасности атомных станций с учетом возникновения внешних экстремальных воздействий техногенного или природного характера.

Существенная неполнота и неопределенность исходной информации, значительная роль случайных факторов определяют необходимость разработки и применения специальных методов и подходов к оценке надежности и безопасности атомных электрических станций (АЭС) при внешних экстремальных динамических воздействиях. Само понятие обеспечения устойчивости АЭС к внешним воздействиям имеет более широкий смысл, по сравнению с обычными промышленными и гражданскими сооружениями. Для последних под этим обычно понимается отсутствие недопустимых повреждений строительных конструкций, а для АЭС, прежде всего, сохранение станцией функций обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Поэтому в качестве методологической основы анализов последствий внешних экстремальных воздействий для безопасности станций следует использовать 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 /1,2/;
- 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.).



**Рис.1 Возможные события для сооружения в составе АЭС при внешнем экстремальном воздействии**

Основной особенностью внешних экстремальных событий является то, что они могут воздействовать на целый ряд или все сооружения, расположенные на площадке, т.е. могут служить источником множественных отказов различных элементов (см. рис 1). Применяемый при проектировании дифференцированный подход к обеспечению защищенности компонентов АЭС от внешних воздействий (разделение на категории сейсмостойкости, безопасности, выбор сочетаний нагрузок и воздействий в соответствии с этим разделением и т.п.) не может служить гарантией того, что вследствие подобного воздействия не возникнет комбинированного исходного события-последствия, которое, в конечном итоге, может привести к нарушению условий безопасности эксплуатации - например, разрушению барьеров безопасности и выходу радиоактивных продуктов в биосферные каналы. Кроме того, в процессе исследований на конкретной площадке АЭС, в том числе, на этапах строительства или эксплуатации может выясниться, что реальная опасность внешних воздействий природного или техногенного характера выше, чем это предусматривалось при разработке проектной документации. Следует учитывать и тот факт, что ряд существующих и эксплуатируемых на настоящее время в АЭС проектировался без учета требований по обеспечению защищенности от внешних воздействий, ввиду отсутствия в нормативной документации на момент разработки их проектов соответствующих требований.

Характерной негативной особенностью выполненных на сегодняшний день оценок безопасности для реакторных установок различных типов (в том числе вероятностных /3/) является то, что возможное влияние внешних факторов на безопасность эксплуатации рассматривается в очень ограниченном объеме. Исторически сложилось, что при выполнении анализов безопасности рассматривается определенный набор внутренних исходных событий. Такие явления, как зависимые отказы или отказы по общим причинам при анализе последствий, связываются либо с неправильными действиями персонала, либо с общностью компоновочных и технологических решений (наличие слабого узла, расположение ряда элементов в помещении, в котором может возникнуть пожар и т.п.) В функциональные деревья отказов включаются, как правило, только активные элементы (насосы, задвижки, клапаны, реле и т.д.), априорно полагая, что вероятность отказа пассивных элементов значительно ниже, чем активных. Очевидно, что при таком подходе, исследующем основные технологические принципы и решения, положенные в основу обеспечения безопасности эксплуатации реакторной установки, целые классы элементов сооружений АЭС полностью исключаются из рассмотрения.

Анализ последствий для безопасности АЭС при внешних динамических воздействиях необходимо проводить, исходя из реальных инженерно - геологических особенностей площадки строительства, окружающей инфраструктуры (с учетом ее развития за срок службы станции), принимая во внимание технологические особенности рассматриваемого типа реакторной установки, принятые конструктивные решения сооружений, компоновки оборудования и т.п./4-7/. Тем не менее, для решения этой задачи в наиболее общей вероятностной постановке может быть предложена единая последовательность исследований, считая, что функции, например, безопасности определены /8/:

- построение деревьев событий для АЭС при внешних воздействиях;
- построение блок-схем надежности для станций в целом (или модели безопасности) на основе предъявления требования выполнения в полном или частичном объеме ряда функций с учетом возможных причинно-следственных связей между ними;
- определение на базе имеющейся информации характеристик воздействия, материалов сооружений, оснований, оборудования и т.п.;
- определение надежностей (или вероятностей отказов) всех элементов, входящих в блок-схему в целом;
- определение интегральных вероятностных показателей защищенности станции (как вероятностей выполнения ряда требуемых функций) с учетом срока службы сооружений, оборудования и т.д., интенсивностей и периодов повторяемости всех экстремальных воздействий, возможных на площадке строительства за этот срок.

Так как в выполнении требуемых функций участвует целый ряд систем, расположенных в различных сооружениях на грунтовых основаниях (или свайных фундаментах), связанных в свою очередь между собой инженерными коммуникациями (трубопроводы различного назначения, кабельные системы и т.п.), надежность каждого из сооружений в свою очередь определяется тремя основными факторами:

- выполнением условий прочности для грунтовых оснований (свайных фундаментов);
- выполнением условий прочности и герметичности (в требуемом объеме) строительных конструкций;
- выполнением условий сохранения работоспособности, устойчивости, герметичности и т.д. расположенного в сооружениях оборудования, обеспечивающего выполнение требуемых функций.

В качестве иллюстрации в таблице 1 приведены типы возможных отказов для перечисленных выше основных компонент зданий и сооружений.

Важным вопросом при рассмотрении последствий возникновения внешних событий и построении модели безопасности является выбор возможных сочетаний нагрузок и событий. Очевидно, что число возможных сочетаний событий чрезвычайно велико, хотя целый ряд из них маловероятен, т.е. практически не влияет на интегральные показатели безопасности отдельных систем, сооружений и станций. Для предварительного исключения маловероятных событий может быть применен рекомендованный МАГАТЭ принцип отбора по уровню вероятности. В качестве достаточно консервативных оценок УОВ, исходя как из международной практики, так и из известных оценок безопасности для вновь проектируемых АЭС с реакторными установками различного типа /1,6/, могут быть приняты величины  $10^{-8}$  1/год для оценки радиационной безопасности и  $10^{-6}$  1/год для оценки частоты плавления топлива. Для существующих АЭС "старой" конструкции эти показатели могут быть приняты, по всей видимости на порядок выше/9,10/. Те события (или их сочетания), вероятность возникновения которых оценивается меньшими величинами, могут быть исключены из рассмотрения на этапе разработки модели безопасности или модели последствий. Одним из путей предварительной оценки этих вероятностей может быть анализ имеющихся баз данных, изучения последствий событий - аналогов, экспертные оценки т.д..

**Таблица 1. Типы возможных отказов основных элементов сооружений АС  
при внешних воздействиях**

<b>Грунтовые основания</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• потеря несущей способности</li> <li>• крены</li> <li>• осадки</li> <li>• разжижение водонасыщенных несвязных грунтов</li> </ul>
<b>Свайные фундаменты</b>	<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>
<b>Грунтовые сооружения (дамбы, плотины)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• разрушение</li> <li>• размыв</li> <li>• потеря устойчивости откосов и экранов</li> </ul>
<b>Туннели</b>	<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>
<b>Строительные конструкции зданий</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• потеря несущей способности</li> <li>• потеря целостности (герметичности) по условиям общей или местной прочности</li> </ul>
<b>Облицовки, герметичные проходки, шлюзы</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• течь</li> <li>• разрушение</li> </ul>
<b>Технологические элементы</b>	<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>

Такой подход, основанный на применении концепции приемлемого риска обуславливает рассмотрение всего потока возможных на площадке строительства внешних событий, т.е. применении моделей воздействия, базирующихся на полной кривой риска. Полномасштабная модель последствий должна также включать в себя и все возможные (по вероятности) исходные состояния станции, во время которых может произойти то или иное внешнее событие определенной интенсивности и периода повторяемости. Это в свою очередь расширяет круг рассматриваемых во время “обычных” анализов безопасности задач, для которых рассмотрение таких состояний ограничивается либо нормальными условиями

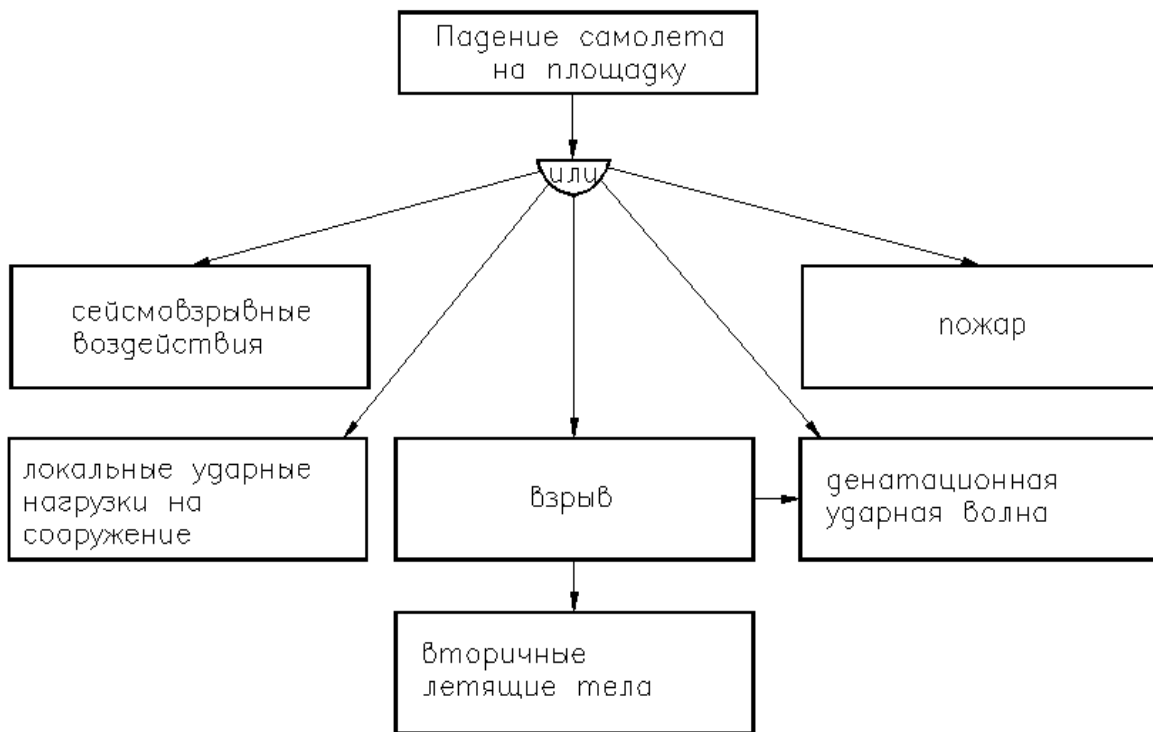
эксплуатации (с работой реактора, сопровождающейся выдачей электроэнергии потребителям) перед исходным внутренним событием, либо наложением на исходное событие обесточивания. В качестве примера в таблице 2 приведены оценки частоты исходных (внутренних) событий для АЭС с реактором корпусного типа. Эти данные показывают, что для большинства возможных исходных состояний АЭС данного типа и внутренних исходных состояний (за исключением достаточно редких по вероятности событий типа LOCA) для полномасштабной оценки влияния внешних событий на безопасность эксплуатации необходим учет внешних событий с периодами повторяемости не менее  $10^{-6}$  событий в год.

**Таблица 2. Оценка частоты исходных (внутренних) событий для АЭС с реактором корпусного типа**

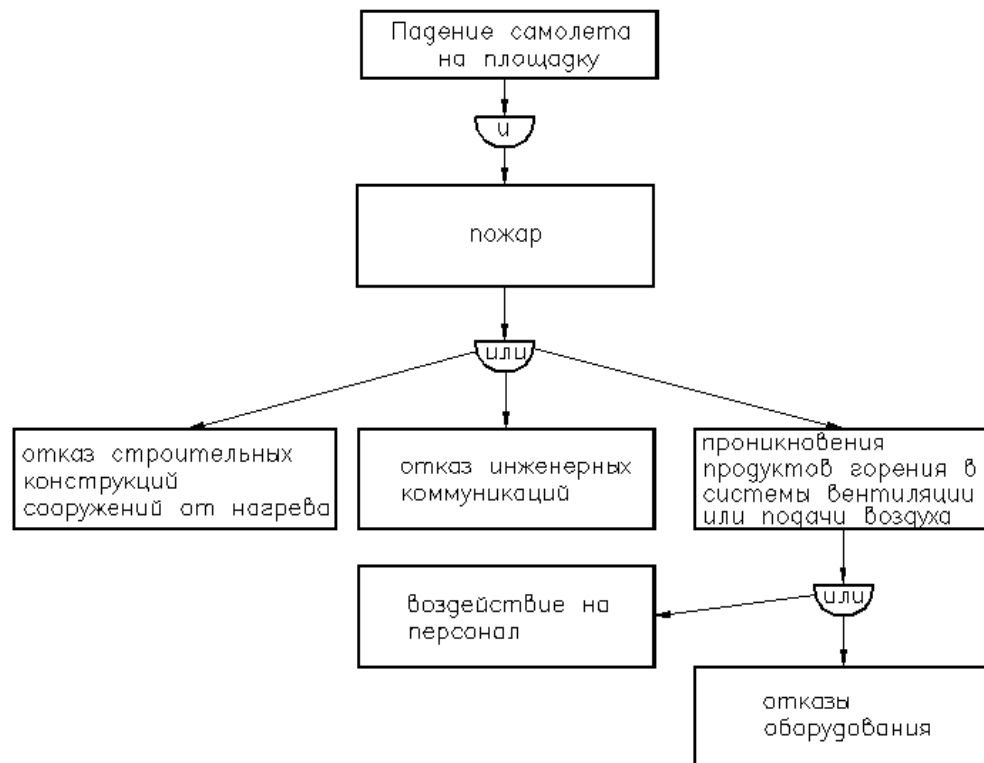
Состояние АС	Оценка частоты событий 1/год
<b>Нормальные условия эксплуатации</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• эксплуатация на мощности</li> </ul>	~0.71
<ul style="list-style-type: none"> <li>• перегрузка топлива</li> </ul>	0.17
<b>Обесточивание</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• кратковременное</li> </ul>	0.08
<ul style="list-style-type: none"> <li>• длительное</li> </ul>	$7 \cdot 10^{-3}$
<b>Отказы в системах, влияющих на реактивность (снижение ионизации борной кислоты)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• кратковременное</li> </ul>	$10^{-2}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• длительное</li> </ul>	$10^{-2}$
<b>Подпитка контура холодной водой</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• кратковременное</li> </ul>	$10^{-2}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• длительное</li> </ul>	$10^{-2}$
<b>Аварийные режимы</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• LOCA (всех типов)</li> </ul>	$3 \cdot 10^{-3}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• течь из первого контура за пределы гермообъема</li> </ul>	$10^{-4}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• нарушение отвода тепла от I контура (без разрывов)</li> </ul>	$3 \cdot 10^{-3}$

Конкретная конфигурация деревьев событий для АЭС при внешних воздействиях и соответствующие модели безопасности и вытекающие из них частные задачи конструкционного анализа во многом определяются типом самого воздействия. Следует отметить, что практическое применение изложенного выше общего подхода с точки зрения решений соответствующих прочностных задач, на основе которых могут быть сделаны обоснованные выводы о возможных последствиях внешних воздействий, требует создания дополнительных прикладных методик. Поясним это на примере рассмотрения возможных последствий падения на площадку АЭС летательного аппарата.

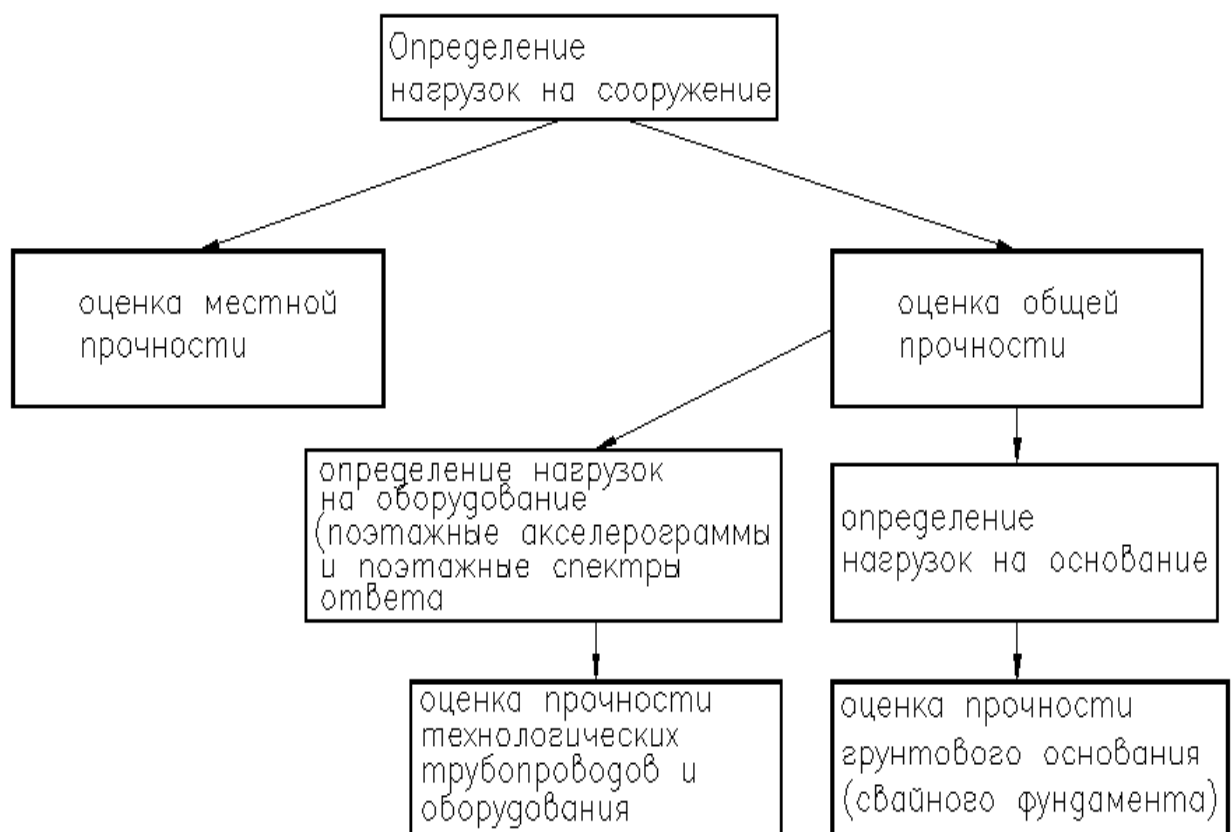
Падение летательного аппарата может сопровождаться целым комплексом нагрузок и воздействий (см. рис 2). Для каждого такого явления требуется отдельный анализ возникновения возможных отказов элементов, важных для безопасности, т.е. построение отдельной модели последствий. Пример такого укрупненного дерева событий при внешнем пожаре, вызванного горением авиационного топлива приведен на рис.3. Другой характерной особенностью этого воздействия, если рассмотреть общую схему оценки прочности основных элементов сооружения в составе АЭС (рис.4) является то, что центральные места в ней занимает определение ударно-динамических нагрузок на сооружение и оценка местной прочности. На методах этой оценке следует остановиться подробнее.



**Рис 2. Возможные нагрузки и воздействия при падении летательного аппарата на площадку АЭС.**



**Рис. 3 Возможные отказы при пожаре, вызванного горением авиационного топлива**



**Рис 4. Общая схема оценки прочности основных элементов сооружения при падении самолета**

Анализ литературы, посвященной проблемам расчета железобетонных конструкций на местную прочность при ударах летящих тел позволяют выделить три группы методов, широко применяющихся в современной практике расчета сооружений.

Во-первых, анализ напряженно-деформированного состояния сооружения с использованием различных моделей поведения материала при интенсивном динамическом нагружении (линейно-упругие, нелинейно-упругие, упруго-пластические и другие модели) и различных условий прочности при сложном напряженном состоянии (критерий Баландина, критерий Яшина и т. д.).

Во-вторых, использование различных эмпирических и полуэмпирических формул, являющихся обобщением обширного экспериментального материала по изучению пробивания железобетонных преград различными типами летящих тел.

В-третьих, применение теории предельного равновесия, основанное на результатах расчетов нагрузок на сооружение при ударах летящих тел и представлениях о характере разрушения железобетонных конструкций по результатам экспериментов.

Первый из указанных подходов реализован в ряде аналитических решений и большом числе расчетных программ, основанных на использовании методов конечных элементов. Однако, следует отметить, что несмотря на существенный прогресс в создании вычислительных комплексов, реализующих метод конечных элементов, недостаточная достоверность моделей неупругого поведения материала и разрушения в условиях сложного напряженного состояния при интенсивном динамическом нагружении приводит к существенным расхождениям в результатах расчетов при использовании различных моделей железобетона. Таким образом, имеет место определенное несоответствие сложности и подробности описания конструкции при использовании как универсальных конечно-элементных комплексов, так и специальных исследовательских программ, с точностью исходной информации о параметрах удара и достоверностью применяемых моделей.

Существенным достоинством методов применения эмпирических формул и использовании теории предельного равновесия является их непосредственная связь с результатами экспериментальных исследований деформирования и разрушения железобетонных сооружений при интенсивных динамических нагрузках, примерно соответствующих возможным ударным воздействиям на элементы строительных конструкций АЭС. Это позволяет учесть особенности поведения такого неоднородного и анизотропного материала как железобетон при интенсивном динамическом нагружении. Другое преимущество рассматри-

ваемых подходов связано со сравнительной простотой рассматриваемых моделей (динамический расчет нелинейной системы с одной степенью свободы или вычисления по формулам), что особенно существенно при проведении многократных расчетов в рамках вероятностного анализа безопасности с учетом большого числа случайных и неопределенных факторов.

Можно отметить определенные различия в сферах применения эмпирических формул и методов теории предельного равновесия. При использовании эмпирических и полуэмпирических зависимостей следует учитывать существенные ограничения диапазона экспериментальных данных, для которого они были получены. Достоверность полученных результатов может быть гарантирована только при соблюдении строгих ограничений в соотношениях толщины мишени к диаметру летящего тела, его массы, скорости соударения с преградой и т. п. Таким образом, несмотря на возможности экстраполяции ряда формул, основанных на теории внедрения твердого тела в бетон, за пределы диапазонов изменявшихся в процессе экспериментов параметров, представляется целесообразным применение эмпирических формул для сравнительно небольших и жестких тел (снаряды, обломки летательных аппаратов, мелкие предметы увлекаемые взрывом и т. п.). Для крупных легкодеформируемых летящих тел типа самолета или потерявшей управление ракеты следует использовать методы расчета, основанные на применении теории предельного равновесия. Тем не менее, в некоторых случаях возможно использование и тех и других подходов.

В связи с вышесказанным в заключении следует упомянуть ряд результатов работ по созданию методического и программного обеспечения для анализа последствий воздействий летящих тел на сооружения, полученных за последние 3 года российским и американским Международными центрами ядерной безопасности при выполнении совместного проекта №7 "Конструкционный анализ", которые могут быть использованы в ходе рассмотрения последствий падения летательных аппаратов различного типа или их обломков на площадку конкретной АЭС.

В рамках этих исследований рассматривались три задачи:

- определение динамических нагрузок на строительные конструкции при ударном воздействии от летательного аппарата;
- разработка методики для применения метода предельного равновесия для анализа разрушения конструкций при внешних ударно-динамических воздействиях;
- разработка методики анализа надежности строительных конструкций при ударе деформируемых летящих тел с использованием имитационных моделей.

При решении задачи об определении динамических нагрузок на строительные конструкции при ударном воздействии использовались следующие основные подходы /11-13/:

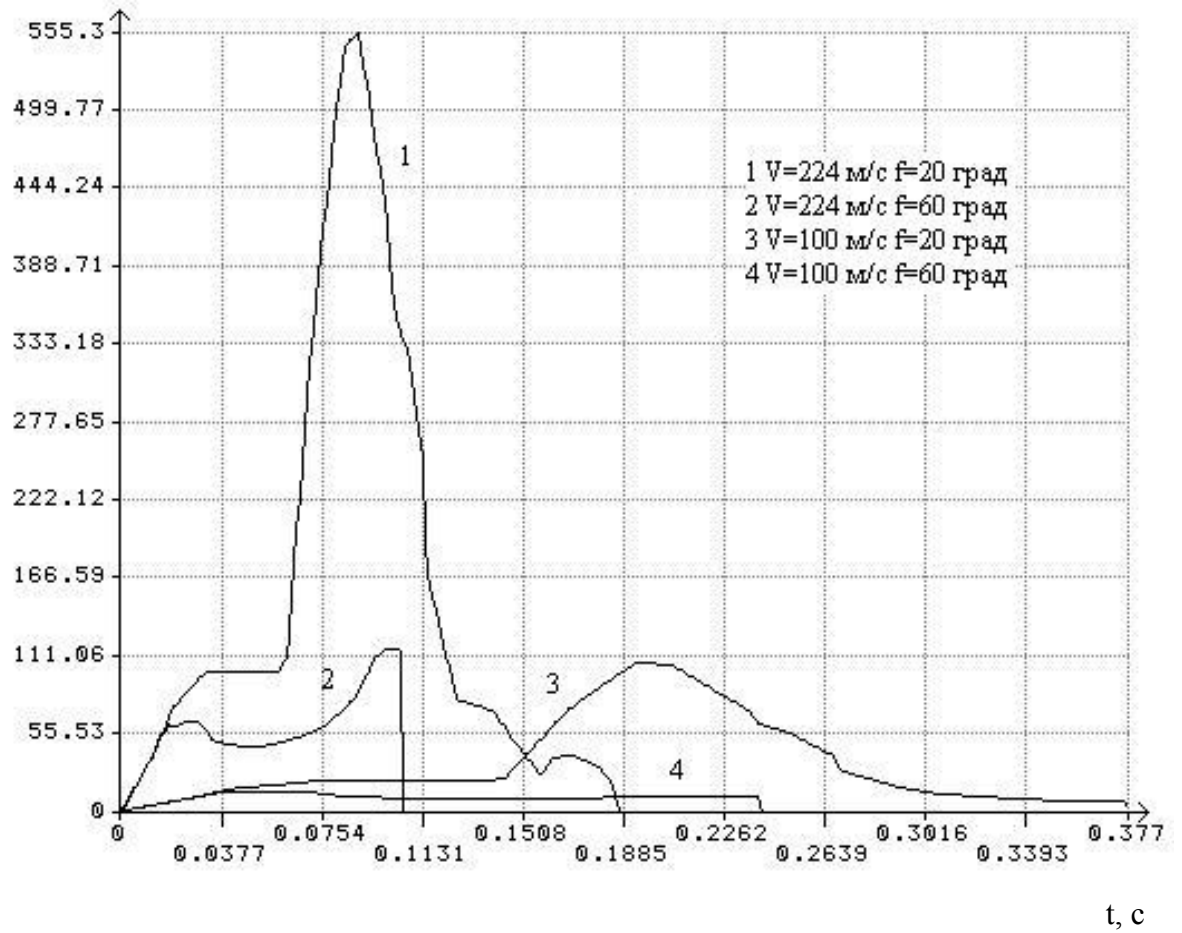
- представление летящего тела в виде жесткопластического стержня с распределенными по длине параметрами - жесткостью и массой;
- учет влияния податливости мишени путем схематизации конструкции системой с одной степенью свободы, имеющей эквивалентную массу и восстанавливающую силу, зависящую от перемещения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

При разработке методики для применения метода предельного равновесия для анализа разрушения конструкций при внешних ударно-динамических воздействиях рассматривались три различных схемы разрушения железобетонных конструкций, предполагающие образование "конуса выбивания"/13-15/. Первая схема предполагает образование усеченного конуса с нарушением сцепления арматуры с бетоном на радиусах превышающих соответствующие радиусы конуса в местах расположения арматуры. Вторая схема, основанная на дополнительном анализе напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции в момент образования конуса выбивания, предполагает более сложную, криволинейную поверхность разрушения. Третья модель, предполагает наличие у "конуса" выбивания цилиндрической части. Следует отметить, что все три схемы предполагают локальное разрушение конструкции и могут быть использованы как для плит так и для оболочек.

Методика анализа надежности строительных конструкций при ударе деформируемых летящих тел с использованием имитационных моделей базируется на применении двух кратко описанных выше методик для определения нагрузок и применении метода предельного равновесия. При этом в качестве варьируемых величин были выбраны семь параметров: 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.

Для всех рассмотренных задач были разработаны прикладные расчетные модули, которые прошли расчетную апробацию и будут использоваться в дальнейших работах двух центров. Пример определения нагрузок на строительные конструкции реакторного отделения АЭС с использованием разработанного программно методического обеспечения представлен на рис.5.

F, МН



**Рис.5** Пример определения нагрузки на строительные конструкции при ударе гражданского самолета первой группы массой 130 тонн с использованием кода CONUS

## Литература

1. ИНСАГ-5: Безопасность атомной энергетики. МАГАТЭ, 1994, 101 с.
2. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97 НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97).- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 68с
3. Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения.- М.: Ядерное общество, 1992.- 265с.
4. Safety Series N 50-SG-S1. Earthquakes and associated topics in relation to nuclear power plant siting .- IAEA, Vienna, 1991.- 60р.
5. Safety series N 50-SG-D2. Fire protection in nuclear power plant.- IAEA, Vienna, 1992. - 84р.
6. Safety series N 50-SG-S5. External man-in-duced events to nuclear power plant siting.- IAEA, Vienna, 1991. - 89 р.
7. ПНАЭ Г-05-035-94 Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты/ М.: Госатомнадзор, 1995.
8. Буторин С.Л., Тананаев А.В., Шульман С.Г. Вероятностная оценка безопасности АЭС с учетом катастрофических динамических воздействий.//Сб. тезисов ежегодной научн.- техн. конф. Ядерного общества. Нижний Новгород, 1993.
9. ИНСАГ-8: Общая основа для оценки безопасности атомных электростанций, сооруженных в соответствии с ранее принятыми нормами. МАГАТЭ, 1996, 74 с.
10. IAEA. Safety Report Series No.12. Evaluation of the Safety of Operating Nuclear Power Plants Built to Earlier Standards, Vienna, December 1998, 93 p.
11. Riera J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces.// Nucl. Eng. and Des. 1968. V.8. P.415-426.
12. Караковский М. В., Шульман Г. С. О динамическом взаимодействии жестко-пластического стержня плоской конструкцией. // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. - 1993. - Т 227 - с. 75-80.
13. Bougaenko S. E., Boutorin S. L., Shulman G. S., Kraev A. G. Impact loading of Building Structures // The literature review // Moscow, Russia, RINSC, July 1998, 46 p.
14. Залесов А.С., Пугачев В.И. Метод расчета железобетонной защитной оболочки АЭС на нагрузки от удара падающего самолета. // Энергетическое строительство. 1991. №5. С. 56-60.
15. Людковский А.М. Несущая способность железобетонного купола при падении самолета. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Проектирование и строительство./ М.: 1985. Вып.3(21), с. 45-50.