

*На правах рукописи*



ВОЛКОДАВ Иван Алексеевич

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС  
ПРИ УДАРАХ РАЗРУШАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(энергетика)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена на кафедре «Гражданское строительство и прикладная экология» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель –  
– кандидат техн. наук, доцент

*Бирбраер Адольф Никитич*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ

*Беляев Вячеслав Семёнович*

– кандидат техн. наук

*Попов Александр Иванович*

Ведущая организация – *ОАО «Атомэнергопроект», г. Москва.*

Защита диссертации состоится 24 мая 2011 г. в 18-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29,  
в аудитории 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «22» апреля 2011 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 552-6552

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*К.А. Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Энергетическая стратегия России до 2030 г. предусматривает увеличение производства электроэнергии на атомных станциях до 356–437 млрд. кВт·ч/год. Кроме ввода новых атомных мощностей, предусматривается модернизация и продление срока эксплуатации действующих энергоблоков, строительство объектов хранения радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Непременным требованием при проектировании атомных электростанций (АЭС) является обеспечение безопасности при возникновении аварийных и чрезвычайных ситуаций. При проектировании новых и модернизации существующих энергоблоков необходимо учитывать современные требования к безопасности АЭС при экстремальных воздействиях, в том числе при падении на АЭС летательного аппарата, ударах предметов, подхваченных ураганом или торнадо; разлете осколков при взрывах; обрушении конструкций, падении грузов при транспортировке, и др. Основное внимание уделено объектам, которые сами разрушаются при ударе о преграду («разрушающимся»).

Наиболее опасным случаем удара разрушающегося объекта является падение на АЭС самолёта. Расчёт на такое воздействие особенно актуален при проверке действующих объектов, спроектированных при менее строгих, чем современные, требованиях безопасности. Так, в проектах АЭС, построенных до середины 80-х гг. XX века, согласно действовавшим в то время нормам безопасности, падение самолёта не учитывалось.

Безопасность АЭС в этом случае подразумевает обеспечение прочности и герметичности защитных строительных конструкций, а также сохранение работоспособности технологического оборудования при инерционных нагрузках, вызванных вибрациями здания вследствие удара. Для проверки безопасности требуется выполнение расчетов прочности и колебаний строительных конструкций. Применяющиеся в настоящее время методы определения нагрузок на сооружения при ударах летящих объектов, определения прочности и колебаний строительных конструкций основаны на ряде существенных упрощений и допущений и не позволяют в полной мере произвести оценку безопасности АЭС.

Диссертация посвящена актуальной проблеме обеспечения безопасности АЭС в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного происхождения, вызванных ударами разрушающихся объектов.

**Цель работы** заключается в разработке методики оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся летящих объектов, основанной на расчётах прочности и колебаний защитных конструкций и нагрузок на оборудование.

### **Поставлены и решены следующие основные задачи:**

- разработана математическая модель совместного движения объекта и защитной конструкции и установлены зависимости для определения нагрузки при ударе разрушающегося летящего объекта с учетом его собственного веса, наклона, массы и податливости преграды, угла их соударения;

- определено влияние закона изменения нагрузки при ударе разрушающихся объектов, расчётных характеристик материалов защитной конструкции, её локальных повреждений (вплоть до пробивания) на поэтажные спектры отклика (ПС), определяющие инерционные нагрузки на оборудование;

- разработаны методики расчётов прочности и колебаний зданий и сооружений АЭС для оценки их безопасности.

### **Научная новизна** работы заключается в следующем:

- усовершенствована методика оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся объектов, основанная на расчетах совместного движения летящего объекта и защитной конструкции;

- получены зависимости для определения нагрузки при ударе объектов с произвольной, постоянной и линейно изменяющейся по длине массой и прочностью в податливую защитную конструкцию;

- разработана математическая модель совместного движения наклонной защитной конструкции и разрушающегося летящего объекта при ударах под углами к нормали меньше и больше угла трения;

- установлено влияние податливости преграды на нагрузку, создаваемую при действии поражающего фактора (летящего объекта); разработан метод расчёта совместного движения объекта и защитной конструкции и нагрузок на неё с использованием схематизации по методу конечных элементов;

- разработана методика расчёта пробивания железобетонной конструкции разрушающимся объектом на основе комбинации конечно-элементного расчета в упругой стадии и схематизации с шарнирами пластичности в неупругой;

- разработаны рекомендации по определению влияния пробивания защитной конструкции, выбору ее расчётных характеристик и способа задания нагрузки на значения поэтажных спектров отклика при колебаниях зданий АЭС;

- предложен новый способ задания расчётных нагрузок при ударе самолёта, основанный на статистической обработке законов изменения нагрузок при ударах самолетов одного класса.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается корректным использованием методов системного анализа и математического

аппарата при проведении исследований и доказательствах теоретических положений, результатами компьютерных расчётов, реализованных с помощью верифицированного программного обеспечения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель совместного движения системы «ударяющий объект - защитная конструкция», описываемая дифференциальными уравнениями с учетом веса объекта и наклона конструкции.

2. Зависимости для определения нагрузок на преграду при ударах разрушающихся летящих объектов простейших форм: с постоянной и линейно изменяющейся по длине погонной массой и прочностью.

3. Метод вычисления совместного движения объекта и преграды и нагрузок на неё с использованием конечно-элементной схематизации преграды.

4. Методика расчёта характеристик «эквивалентного» разрушающегося объекта по закону изменения нагрузки при его ударе в недеформируемую преграду.

5. Усовершенствованная методика расчёта последовательного пробивания системы преград на основе конечно-элементного упругого расчёта.

6. Результаты анализа влияния схематизации сооружения и упрощений закона изменения нагрузки в расчётах поэтажных спектров при ударе самолета.

7. Новый способ задания расчетных нагрузок при ударах самолетов различных видов, основанный на статистической обработке законов изменения нагрузок при их ударах.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследований, выполнении исследований, разработке математической модели совместного движения системы «ударяющий объект - защитная конструкция», обработке, формулировке и обобщении полученных результатов.

**Практическая значимость.** Основные результаты исследований были реализованы в ОАО «СПбАЭП» при расчётах прочности и колебаний зданий Кольской, Белоярской и Ленинградской АЭС-2, необходимых для оценки безопасности.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов «XXXVI Неделя науки СПбГПУ» и «XXXVII Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2007 и 2008); 65-й Научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов ГОУ «СПбГАСУ» (Санкт-Петербург, 2008); Научно-техническом семинаре «Кафедра СКМ. 75 лет на факультете» (Санкт-Петербург, 2009); в ОАО «СПбАЭП» и на кафедрах ГСиПЭ и УЗЧС СПбГПУ в 2009-2010 гг.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 публикации в центральных изданиях, включённых в перечень периодических изданий ВАК.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 67 наименований. Объём диссертации составляет 167 страниц машинописного текста, включая 82 рисунка и 25 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, сформулирована цель и основные задачи исследования.

**В первой главе** выполнен обзор состояния проблемы и рассмотрена существующая методика оценки и обеспечения безопасности АЭС при ударных воздействиях, на их основе сформулированы задачи исследования.

Наиболее опасным элементом АЭС является ядерный реактор. Здание реакторного отделения проектируется наиболее защищённым, в том числе от воздействия таких поражающих факторов, как удары летящих объектов. Однако в составе АЭС с реакторами разного типа имеются относительно менее защищённые здания, относящиеся к 1 и 2 классам безопасности: спецкорпус, хранилище РАО и ОЯТ, здание электротехнических устройств управления, вспомогательный корпус и др. Их повреждение также способно привести к возникновению аварий.

Проблемы безопасности АЭС, в том числе вопросы обеспечения прочности их строительных конструкций и работоспособности технологического оборудования при экстремальных воздействиях, рассмотрены в работах С. Б. Архипова, В.С. Беляева, А. Н. Бирбраера, С. Е. Бугаенко, С. Л. Буторина, А. С. Дмитриева, М.В. Караковского, А. П. Кириллова, А. В. Петренко, А. И. Попова, А. Ю. Роледера, А. Е. Саргсяна, Б. В. Цейтлина, Г. С. Шульмана, С. Г. Шульмана, J. Bauer, K. Drittler, P. Gruner, J. D. Riera, F. Scharpf, G. J. Schuëller, R. Schwarz, H. Shibata, J. D. Stevenson, P. Varpassuo, N. F. Zorn и других авторов.

Удар разрушающихся объектов рассматривался применительно к падению на АЭС самолета. Впервые нагрузка при его ударе в недеформируемую преграду была найдена Риерой. Он схематизировал фюзеляж самолёта в виде жесткопластического стержня с погонной массой  $\mu[\xi(t)]$  и разрушающей нагрузкой  $P[\xi(t)]$ , зависящими от длины. Нагрузка на преграду

$$R(t) = P[\xi(t)] + \dot{\xi}^2(t)\mu[\xi(t)], \quad (1)$$

где  $\xi(t)$  и  $\dot{\xi}(t)$  – перемещение и скорость не разрушенной части фюзеляжа.

Результаты, позже полученные при иных схематизациях самолета и предположениях о направлении удара, мало отличаются от (1). Во всех случаях рас-

сма­тривался удар в вертикальную преграду без учёта влияния веса самолёта. При ударе объекта, летящего с малой скоростью, вносимая этим погрешность может оказаться значительной, что критично при расчётах в случае обрушения (свободного падения) строительных конструкций и грузов при транспортировке. В связи с этим необходимо разработать способ вычисления нагрузки с учётом веса летящего объекта и наклона преграды.

При расчёте совместного движения летящего объекта и конструкции последнюю часто заменяют системой с одной степенью свободы, параметры которой в упругой стадии деформации можно определить по методу Бубнова–Галеркина, приняв форму перемещений конструкции в виде функции перемещений при статическом приложении нагрузки. Но если размеры «пятна удара» существенно меньше ударяемой поверхности, то из-за действия сил инерции формы статических и динамических перемещений конструкции могут сильно отличаться. Поэтому необходимо разработать методику вычисления перемещения ударяющего объекта и конструкции, а также нагрузок на неё с использованием её конечно-элементной схематизации.

При расчётах конструкции на динамические нагрузки с учётом неупругих деформаций её часто заменяют эквивалентным упругопластическим осциллятором, применяя схематизацию с шарнирами пластичности. В имеющихся публикациях параметры осциллятора определялись аналитически, что применимо только для простейших конструкций (балок и пластинок с элементарными граничными условиями). В связи с этим требуется разработать процедуру определения параметров эквивалентного упругопластического осциллятора на основе конечно-элементного расчёта конструкции.

При расчётах поэтажных спектров отклика (ПС), используемых для проверки работоспособности оборудования АЭС при колебаниях здания, вызванных ударом самолёта, используют упрощённые (сглаженные) законы изменения нагрузки. Считается, что такое упрощение мало сказывается на результатах расчёта. Однако справедливость этого допущения не очевидна и необходима его проверка.

**Во второй главе** разработана методика определения нагрузок на строительные конструкции при ударах разрушающихся летящих объектов на основе уточнённых дифференциальных уравнений совместного движения.

При ударе летящего объекта в преграду, нормаль к которой наклонена к горизон­тали на угол  $\alpha$ , нагрузка на преграду с учётом веса объекта

$$R(t) = \begin{cases} P[\xi(t)] + \dot{\xi}^2(t)\mu[\xi(t)] + gm_1[\xi(t)]\sin\alpha & \text{при } \dot{\xi}(t) \geq 0; \\ gm_c \sin\alpha & \text{при } \dot{\xi}(t) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_c$  – масса летящего объекта (самолета);  $m_1[\xi(t)]$  – масса смятой части.

Нагрузка (2) отличается от решения Риеры (1) наличием последнего слагаемого в правой части, пока  $\dot{\xi}(t) \geq 0$ , и тем, что не обращается в ноль при  $\dot{\xi}(t) = 0$ .

Чтобы использовать формулу (2), необходимо вычислить закон движения объекта в процессе разрушения. Для объектов простейшей формы получены законы изменения нагрузки в замкнутом виде. Если прочность объекта  $P_1$  и погонная масса  $\mu_1$  постоянны по длине, то при ударе со скоростью  $v_0$

$$R(t) = \begin{cases} P_1 + \frac{\mu_1}{2} [t(at + 2v_0)g \sin \alpha + 2(at + v_0)^2] & \text{при } \dot{\xi}(t) \geq 0; \\ gm_c \sin \alpha & \text{при } \dot{\xi}(t) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

При линейно изменяющихся по длине прочности  $P(\xi) = a_p \xi$  и погонной массе  $\mu(\xi) = a_\mu \xi$  нагрузка вычисляется по формуле (2), где

$$\begin{aligned} \xi &= \left( \sqrt{v_0^2 + (g/\lambda)^2} \sin(\lambda t - \gamma) + (g/\lambda) \sin \alpha \right) / \lambda; & \dot{\xi} &= \sqrt{v_0^2 + (g/\lambda)^2} \cos(\lambda t - \gamma); \\ \lambda &= \sqrt{a_p/m_c}; & \gamma &= \text{arctg}(g/(v_0 \lambda)). \end{aligned} \quad (4)$$

Уточненное значение нагрузки можно получить, рассматривая совместное движение разрушающегося летящего объекта и конструкции. При схематизации последней по методу конечных элементов (МКЭ) и в случае приложения нагрузки в одной точке конечно-элементной сетки в направлении по  $k$ -ой степени свободы, движение объекта и конструкции описывается системой уравнений

$$[\tilde{M}] \{\ddot{x}\} + [K] \{x\} = \{J\} \left( P(\xi) + \dot{\xi}^2 \mu(\xi) + gm_1(\xi) \sin \alpha \right), \quad (5)$$

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{M_k + m_1(\xi)} \left[ \sum_{j=1}^n k_{kj} x_j - \dot{\xi}^2 \mu(\xi) - \frac{(M_k + m_c)}{m_2(\xi)} P(\xi) + gm_k \sin \alpha \right], \quad (6)$$

где  $[K]$  – матрица жесткостей;  $\{J\}$  – вектор,  $k$ -й элемент которого  $J_k = 1$ , а остальные  $J_i = 0$  ( $i \neq k$ );  $[\tilde{M}]$  – диагональная переменная матрица масс, диагональные элементы которой, кроме  $k$ -го, равны  $\tilde{M}_{ii} = M_i$ , а  $k$ -й элемент, соответствующий точке удара,  $\tilde{M}_{kk} = M_k + m_1(\xi)$ ;  $m_2(\xi)$  – масса неразрушенной части летящего объекта. Интегрирование системы должно производиться с начальными условиями  $\xi(0) = 0$ ;  $\dot{\xi}(0) = v_0$ ;  $x_i(0) = 0$ ;  $\dot{x}_i(0) = 0$ ;  $i = 1 \dots n$ .

Система уравнений (5)–(6) является нелинейной и должна интегрироваться каким-либо пошаговым методом. При высоком порядке системы это связано с достаточно серьезными вычислительными сложностями. Задачу можно упростить, воспользовавшись тем, что часто масса разрушенной части объекта невелика по сравнению с массой «пятна удара», принадлежащего защитной конструкции. В этом случае можно произвести расчет итерационным способом, позволяющим отдельно определять перемещения конструкции и смятие объекта. Этапы расчета:



- 1) рассчитать по формуле (2) нагрузку  $R^{(0)}(t)$  при ударе объекта в неподвижную преграду;
- 2) вычислить перемещения линейной конструкции под действием нагрузки  $R^{(0)}(t)$  и найти закон изменения ускорений точки удара  $\ddot{x}_k(t)$ ;
- 3) численно интегрировать уравнение (6), найти перемещение  $\xi(t)$  и скорость  $\dot{\xi}(t)$ . По ним найти по формуле (2) скорректированный закон нагрузки  $R^{(1)}(t)$ , а также полную массу разрушенной части объекта  $m_1$ ;
- 4) добавить половину массы  $m_1$  к массе точки удара для получения скорректированной матрицы масс  $[M^{(1)}]$ ;
- 5) вернуться к шагу 2 и повторить расчет при нагрузке  $R^{(1)}(t)$ .

Если площадь пятна удара соизмерима с размерами конструкции, то задачу можно упростить, сведя систему с помощью метода Бубнова–Галеркина к эквивалентной системе с одной степенью свободы с массой  $m_k$  и жесткостью  $k_k$  (рис. 1). С учетом веса объекта движение конструкции, наклоненной под углом  $\alpha$ , описывается системой дифференциальных уравнений:

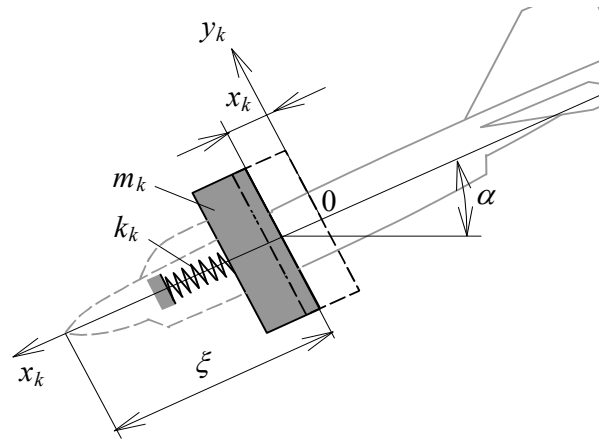


Рис. 1. Замена конструкции системой с одной степенью свободы

$$\ddot{x}_k = \frac{1}{m_k + m_1(\xi)} \left[ -k_k x_k + P(\xi) + \dot{\xi}^2 \mu(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha \right]; \quad (7)$$

$$\ddot{\xi} = \frac{1}{m_k + m_1(\xi)} \left[ k_k x_k - \dot{\xi}^2 \mu(\xi) - \frac{(m_k + m_c)}{m_2(\xi)} P(\xi) + g m_k \sin \alpha \right]. \quad (8)$$

Нагрузка на конструкцию может быть найдена по формуле:

$$R(t) = \left[ P(\xi) + \dot{\xi}^2 \mu(\xi) + g m_1(\xi) \sin \alpha + m_1(\xi) \omega_k^2 x_k \right] / [1 + \delta_m(\xi)], \quad (9)$$

где  $\omega_k^2$  – квадрат собственной круговой частоты конструкции,  $\delta_m(\xi)$  – отношение масс смятой части объекта и конструкции:

$$\omega_k^2 = k_k / m_k; \quad \delta_m(\xi) = m_1(\xi) / m_k. \quad (10)$$

При ударе разрушающегося объекта в податливую преграду под углом к нормали  $\varphi$  меньшим угла трения  $\varphi_{\text{тр}}$ , проскальзывание объекта по преграде не происходит. Составляющие  $R_x$  и  $R_y$  нагрузки на преграду, наклоненную на угол  $\alpha$ , вычисляются по формулам:

$$R_x = m_k \ddot{x}_k + R_{kx} - g m_k \sin \alpha; \quad R_y = m_k \ddot{y}_k + R_{ky} - g m_k \cos \alpha. \quad (11)$$

Перемещения конструкции  $x_k$  и  $y_k$ , линейное и угловое перемещение объекта  $\xi$  и  $\varphi$  находятся путем интегрирования системы уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_k(m_k + m_c) + \ddot{\xi}m_2 \cos \varphi - \ddot{\varphi}(\xi m_2 - S_2) \sin \varphi = \dot{\xi}^2 \mu(\xi) \cos \varphi + \\ + \dot{\varphi}^2 (\xi m_2 - S_2) \cos \varphi + 2\dot{\xi}\dot{\varphi}m_2 \sin \varphi - R_{kx}(x_k) + g(m_k + m_c) \sin \alpha ; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_k(m_k + m_c) + \ddot{\xi}m_2 \sin \varphi + \ddot{\varphi}(\xi m_2 - S_2) \cos \varphi = \dot{\xi}^2 \mu(\xi) \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi}^2 (\xi m_2 - S_2) \sin \varphi - 2\dot{\xi}\dot{\varphi}m_2 \cos \varphi - R_{ky}(y_k) + g(m_k + m_c) \cos \alpha ; \end{aligned} \quad (13)$$

$$- \ddot{x}_k \sin \varphi + \ddot{y}_k \cos \varphi + \ddot{\varphi} \left( \xi - \frac{\xi S_2 - I_2}{m_2 \xi - S_2} \right) = \quad (14)$$

$$= -2\dot{\varphi}\dot{\xi} + g(m_k + m_c)(x_k \cos \alpha - y_k \sin \alpha) - g(S_2 - \xi m_2) \cos(\alpha + \varphi) ;$$

$$(m_k + m_1)\ddot{x}_k = -R_{kx}(x_k) + [P + \dot{\xi}^2 \mu(\xi)] \cos \varphi - T \sin \varphi + g(m_k + m_1) \sin \alpha ; \quad (15)$$

$$(m_k + m_1)\ddot{y}_k = -R_{ky}(y_k) + [P + \dot{\xi}^2 \mu(\xi)] \sin \varphi + T \cos \varphi + g(m_k + m_1) \cos \alpha , \quad (16)$$

где  $P$  и  $T$  - силы, действующие со стороны неразрушенной части объекта. Начальные условия интегрирования:  $x_k(0) = 0$ ;  $\dot{x}_k(0) = 0$ ;  $y_k(0) = 0$ ;  $\dot{y}_k(0) = 0$ ;  $\xi(0) = 0$ ;  $\dot{\xi}(0) = v_0$ ;  $\varphi(0) = \varphi_0$ ;  $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_0$ ;  $T(0) = 0$ .

При начальном угле удара  $\varphi_0 > \varphi_{\text{тр}}$  объект в процессе смятия будет проскальзывать относительно преграды. Принято, что в момент удара вектор скорости направлен по оси летящего объекта, а его угловая скорость отсутствует. Положение объекта определяется координатами  $\xi$ ,  $\varphi$ , и перемещением относительно преграды  $\eta$ . Перемещения объекта и конструкции описываются системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{x}_k(m_k + m_c) + \ddot{\xi}m_2 \cos \varphi - \ddot{\varphi}(\xi m_2 - S_2) \sin \varphi = \dot{\xi}^2 \mu(\xi) \cos \varphi + \\ + \dot{\varphi}^2 (\xi m_2 - S_2) \cos \varphi + 2\dot{\xi}\dot{\varphi}m_2 \sin \varphi - R_{kx}(x_k) + g(m_k + m_c) \sin \alpha ; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_k(m_k + m_c) + \ddot{\xi}m_2 \sin \varphi + \ddot{\varphi}(\xi m_2 - S_2) \cos \varphi + m_c \ddot{\eta} = \dot{\xi}^2 \mu(\xi) \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi}^2 (\xi m_2 - S_2) \sin \varphi - 2\dot{\xi}\dot{\varphi}m_2 \cos \varphi - R_{ky}(y_k) + g(m_k + m_c) \cos \alpha ; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} - \ddot{x}_k \left( \sin \varphi + \frac{m_c \eta}{\xi m_2 - S_2} \right) + \ddot{y}_k \cos \varphi + \ddot{\eta} \cos \varphi - \ddot{\xi} \frac{m_2 \eta}{\xi m_2 - S_2} \cos \varphi + \\ + \ddot{\varphi} \left[ \eta \sin \varphi + \xi - \frac{\xi S_2 - I_2}{\xi m_2 - S_2} \right] = -\dot{\xi}^2 \frac{\mu \eta}{\xi m_2 - S_2} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \eta \cos \varphi - \end{aligned} \quad (19)$$

$$- 2\dot{\xi}\dot{\varphi} \left( 1 + \frac{m_2 \eta}{\xi m_2 - S_2} \sin \varphi \right) + g(\cos(\alpha + \varphi)) - \frac{m_c \eta}{\xi m_2 - S_2} \sin \alpha ;$$

$$\ddot{y}_k = f \ddot{x}_k - \frac{fR_{kx} - R_{ky}}{m_k} + g(\cos \alpha - f \sin \alpha); \quad (20)$$

$$R = m_k \ddot{x}_k + R_{kx} - gm_k \sin \alpha; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_k(m_c - m_2) \sin \varphi + \ddot{\eta}(m_c - m_2) \sin \varphi + \ddot{x}_k(m_c - m_2) \cos \varphi = \\ = \dot{\xi}^2 \mu + P - \dot{\xi} \mu ((\dot{y}_k + \dot{\eta}) \sin \varphi + \dot{x}_k \cos \varphi) - R(\cos \varphi + \\ + f \sin \varphi) + g(m_c - m_2) \sin(\alpha + \varphi); \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} T = (m_c - m_2)[(\dot{y}_k + \dot{\eta}) \cos \varphi - \dot{x}_k \sin \varphi] + \dot{\xi} \mu ((\dot{y}_k + \dot{\eta}) \cos \varphi - \\ - \dot{x}_k \sin \varphi) - g(m_c - m_2) \cos(\alpha + \varphi) - R(\sin \varphi - f \cos \varphi), \end{aligned} \quad (23)$$

где  $f = \operatorname{tg} \varphi_{\text{тр}}$  – коэффициент трения. Для интегрирования системы к начальным условиям системы (12) - (16) добавляются:  $\eta(0) = 0$ ;  $\dot{\eta}(0) = 0$ ;  $R(0) = 0$ .

Приведенные решения, в отличие от уже имеющихся, учитывают угол наклона преграды  $\alpha$  и вес объекта, что важно при расчетах таких строительных конструкций АЭС, как купол защитной оболочки реакторного отделения. Эти решения позволяют также использовать полученные зависимости для определения нагрузок при падении грузов и обрушении строительных конструкций.

**В третьей главе** исследованы способы схематизации железобетонной конструкции в виде эквивалентного упругого или упругопластического осциллятора для упрощения расчётов при ударах летящих объектов.

На примере прямоугольной пластинки изложен способ определения массы и жесткости эквивалентного линейно-упругого осциллятора на основе статического конечно-элементного расчёта, который применим для любой упругой конструкции. Жесткость осциллятора может быть найдена из выражения для эквивалентной частоты, определяемой посредством метода Бубнова–Галеркина:

$$\omega_3^2 = \left( \frac{1}{S_1} \iint_{(S_1)} w_{\text{ст}}(x, y) dx dy \right) / \left( \mu \iint_{(S)} w_{\text{ст}}^2(x, y) dx dy \right), \quad (24)$$

где  $w_{\text{ст}}(x, y)$  – перемещение пластинки (по МКЭ) при статическом приложении нагрузки 1 Н, равномерно распределенной по площади «пятна удара»  $S_1$ ;  $S$  – общая площадь пластинки;  $\mu$  – масса единицы площади пластинки. В формуле (24) числитель должен быть умножен на 1 Н.

Числитель в (24) – это среднее перемещение  $w_{\text{ср}}$  под пятном удара. Обратная величина к  $w_{\text{ср}}$  представляет собой эквивалентную жесткость  $K_3$ . Эквивалентная масса вычисляется через эквивалентную частоту:

$$m_3 = \omega_3^2 / K_3. \quad (25)$$

Формулу (24) можно трактовать как выражение квадрата частоты по методу Релея–Ритца, поскольку числитель – это удвоенная работа внешних сил, равная потенциальной энергии пластинки, а знаменатель – ее удвоенная кинетическая энергия пластинки. Такая трактовка удобна, так как многие вычислительные программы непосредственно выдают значение работы внешних сил.

Для расчёта неупругих перемещений конструкции при кратковременных динамических нагрузках применена схематизация с шарнирами пластичности. До достижения в конструкции определенных значений внутренних усилий она рассматривается как линейно-упругая, после чего в ней мгновенно образуются шарниры пластичности, за счет поворотов в которых происходят перемещения конструкции. Сама конструкция превращается в изменяемую систему (механизм), т.е. в систему с одной степенью свободы. Критерием отказа конструкции является превышение неупругими перемещениями допускаемых значений.

В простейшем случае - для шарнирно-опертой балки - шарнир пластичности мгновенно образуется при достижении изгибающим моментом предельного значения. Для этого случая в нормах рекомендована зависимость восстанавливающей силы от перемещения в виде идеальной упругопластической диаграммы (диаграмма Прандтля).

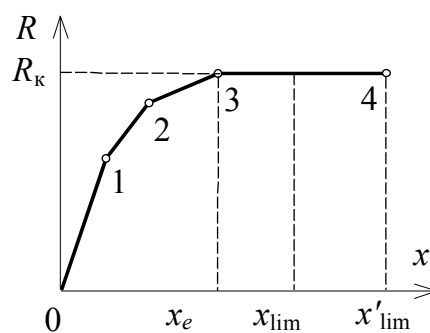


Рис. 2. Трёхлинейная диаграмма упругопластического осциллятора

При одновременном образовании шарниров пластичности в пролёте и на опорах балки с двумя заделками на концах она частично превращается в механизм, а частично остается упругой. При этом зависимость «сила – перемещение» имеет вид трёхлинейной диаграммы (рис. 2), где участки 1–2 и 2–3 соответствуют упругопластической стадии. Согласно нормам, отказ балки определяется по условию достижения углом поворота в пластических шарнирах  $\psi_i$  предельного значения:

$$\psi_i \leq \psi_{i,\text{lim}} = \begin{cases} 0.035 + \frac{0.003}{\xi_d} & \text{при } \xi_d \geq 0.018 \\ 0.2 & \text{при } \xi_d < 0.018 \end{cases} \quad (26)$$

где  $\xi_d$  – относительная высота сжатой зоны бетона. Предельное неупругое перемещение конструкции

$$x_{\text{lim}} = R_{\text{ш}} \psi_{i,\text{lim}} / 2, \quad (27)$$

где  $R_{\text{ш}}$  – длина звена механизма при образовании шарниров.

Часто сложные многозвенные диаграммы (рис. 3) упрощают теми или иными способами, сводя к диаграмме Прандтля.

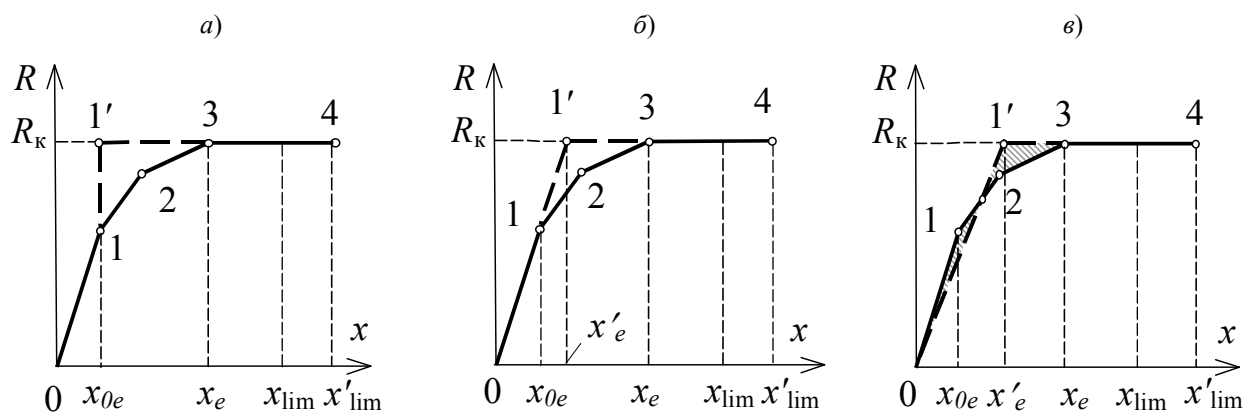


Рис. 3. Упрощение диаграммы «сила–перемещение»:

*a* – неупругая стадия сразу после упругой; *б* – продолжение упругого участка до точки «эффективной текучести» 1'; *в* – эквивалентный участок 0-1' со сниженной жёсткостью

Показано, что при всех способах упрощения площадь под наклонной линией, соответствующей эквивалентной жёсткости, меньше, чем под исходной линией на упругопластической стадии. Следовательно, работа упругой деформации меньше, чем на упругой и упругопластической стадиях при использовании исходной линии. Поэтому рассматриваемые упрощения ведут к определению максимального неупругого перемещения с запасом.

Неупругий расчет плит также выполнен с использованием схем с шарнирами пластичности. Допущения, принятые при схематизации плит – те же, что и для балок: при определенных значениях внутренних усилий в плите происходит её излом и она разделяется на отдельные абсолютно жесткие диски, соединенные между собой прямолинейными шарнирами пластичности. При этом плита превращается в механизм, перемещению которого препятствуют погонные изгибающие моменты в шарнирах, т.е. в эквивалентный неупругий осциллятор. Так, при ударе в точку заземленной по контуру плиты ее излом происходит в виде кругового конуса, ограниченного круговым шарниром пластичности с центром в точке удара и радиусом, равным расстоянию до ближайшего края, и разбитого на сегменты радиальными шарнирами пластичности. Масса эквивалентного неупругого осциллятора равна 1/6 массы выламываемой части, а сила сопротивления

$$R_k = 4\pi M_d, \quad (28)$$

где  $M_d$  – предельный момент, воспринимаемый сечением железобетонного элемента в упругой стадии.

Вследствие того, что в разных точках плиты предельные значения изгибающего момента достигаются не одновременно, зависимость «сила – переме-

шение» для эквивалентного осциллятора имеет криволинейный упругопластический участок. Способы ее приближенной замены диаграммой Прандтля аналогичны применяемым для балок. При всех этих способах площадь под наклонной частью диаграммы Прандтля, численно равная работе упругой деформации, меньше, чем суммарная площадь под исходной кривой в упругой и упругопластической стадиях. Поэтому, как и для балок, рассматриваемые приближения приведут к определению значений неупругих деформаций с запасом.

**В четвёртой главе** произведены расчёты прочности и колебаний зданий АЭС, необходимые для оценки безопасности и учитывающие совместное движение объекта и защитной конструкции. Основное внимание уделено следующим задачам: определение расчётных нагрузок на защитные конструкции при этом воздействии, параметров вынужденных колебаний зданий и сооружений АЭС и динамических нагрузок на оборудование, важное для безопасности.

Предложена методика решения «обратной задачи», а именно, подбора по заданному закону изменения нагрузки параметров «эквивалентного самолёта» (зависимости его массы и прочности от длины), удар которого в недеформируемую преграду даст такую же нагрузку. Для этого приближенно задается закон изменения скорости самолета в процессе удара в виде кубического полинома. Его коэффициенты определяются из условия равенства приближенной и действительной скоростей нулю в момент окончания действия нагрузки, а также равенства начальной кинетической энергии самолета и работы заданной нагрузки по разрушению его фюзеляжа.

При подстановке этого закона скорости и найденного по нему закона перемещений в формулу Риеры (1) подобрано такое распределение прочности  $P(\xi)$  и погонной массы  $\mu(\xi)$  самолета, при котором получен заданный закон изменения нагрузки  $R(t)$ . На рис. 4 приведена приближенная нагрузка для самолета «Lear Jet-23», построенная по нагрузке, заданной в нормах Франции.

С использованием найденных параметров самолета возможен расчет конструкций с учетом их податливости и неупругих перемещений. Установлено, что при увеличении податливости рассчитываемой конструкции нагрузка на неё несколько уменьшается.

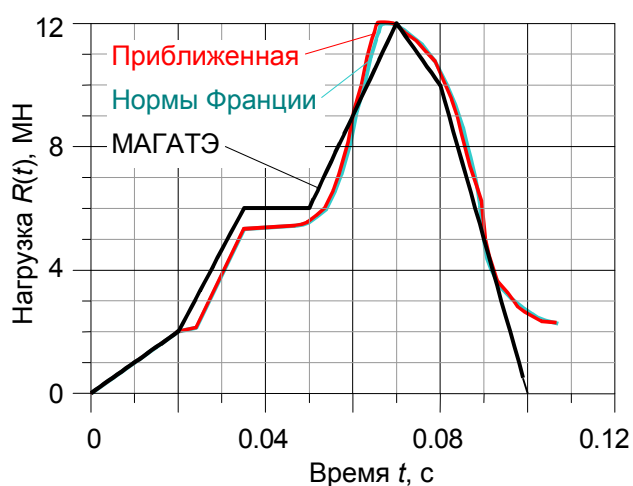


Рис. 4. Нагрузка при ударе самолета «Lear Jet 23»

На примере расчёта несущей способности ограждающих конструкций спецкорпуса 4-го блока Белоярской АЭС сравнены три способа расчёта: квазистатический с использованием коэффициента динамичности; прямое пошаговое интегрирование уравнений движения с помощью МКЭ; способ, учитывающий одновременное разрушение самолёта и движение преграды.

Установлено, что первые два способа приводят к примерно одинаковому требуемому армированию конструкции. Расчёт одновременного разрушения самолёта и деформации преграды позволил снизить необходимое армирование на 40% и предложить более экономичную конструкцию. Подтвержден вывод о том, что уменьшение расчётной жёсткости конструкции приводит к уменьшению нагрузки на неё.

Усовершенствована методика расчёта последовательного пробивания самолётом ряда строительных конструкций. Существующие методики такого расчёта основаны на аналитических решениях, а потому имеют ограниченное применение (простейшие конструкции со стандартными граничными условиями). В отличие от этого, предлагаемая методика основана на конечно-элементном расчёте сооружения, а потому не имеет прежних ограничений.

Рассмотрены вопросы расчета колебаний здания при ударе самолёта и поэтажных спектров отклика, посредством которых задаются динамические нагрузки на расположенное внутри оборудование. Расчет произведен на примере здания спецкорпуса 4-го блока Белоярской АЭС (рис. 5) с помощью программного комплекса *MSC/NASTRAN*. Изучено влияние на значения ПС двух факторов: выбора расчетной модели сооружения и упрощения закона нагрузки при ударе самолёта.

Установлено, что пренебрежение при расчёте поэтажных спектров снижением жёсткости конструкций вследствие неупругой работы железобетона приводит к завышению значений ускорений и, следовательно, расчетных нагрузок на оборудование, важное для безопасности АЭС (кривая «Без учёта трещин» на рис. 6).

В то же время допущение работы защитных конструкций в пластической стадии, позволяющее использовать дополнительные ресурсы их прочности, может привести к повышению поэтажных спектров отклика на некоторых час-

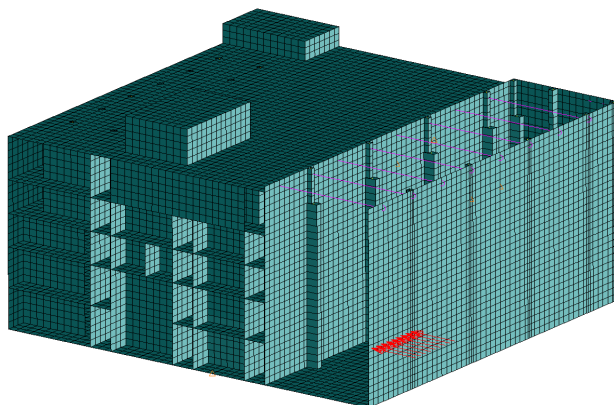


Рис. 5. Расчётная модель и схема нагружения при ударе самолёта *Lear Jet-23*

татах. Так, в примере расчета, выполненного с учетом пластической работы ударяемой железобетонной конструкции (кривая «5Ø20» на рис. 6), в диапазоне частот 35–45 Гц поэтажные спектры отклика понизились по сравнению с упругой конструкцией (кривая «5Ø25» на рис. 6), но в диапазоне 45–55 Гц – повысились.

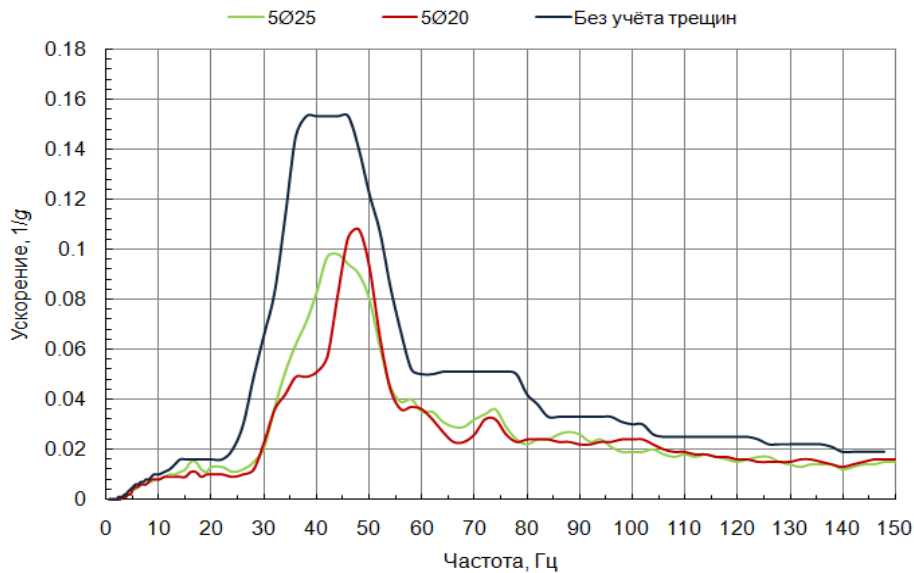


Рис. 6. Спектры ускорений на отметке установки оборудования при различных вариантах жёсткости строительных конструкций

При последовательном пробивании конструкций самолетом поэтажные спектры также могут оказаться выше, чем при сохранении их цельности (рис. 7).

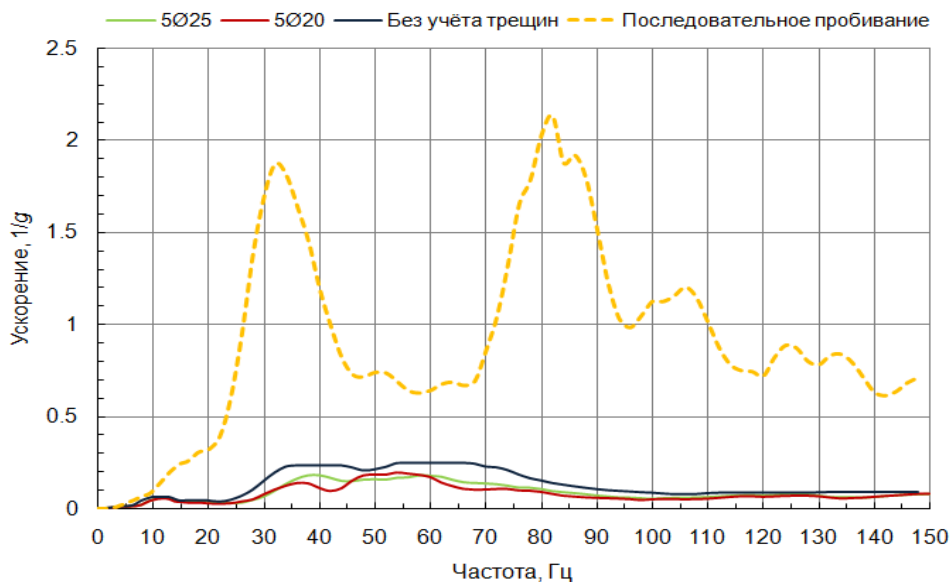


Рис. 7. Сравнение вариантов поэтажных спектров при допущении и недопущении разрушения части конструкций

Таким образом, хотя возможность последовательного пробивания защитных конструкций позволяет наиболее полно использовать их несущую способность, но это может привести к увеличению динамических нагрузок на оборудование, расположенное внутри здания. Поэтому при допущении пробивания части не-



ответственных конструкций выбор варианта обеспечения безопасности рассматриваемого элемента АЭС следует производить на основании комплексного технико-экономического анализа.

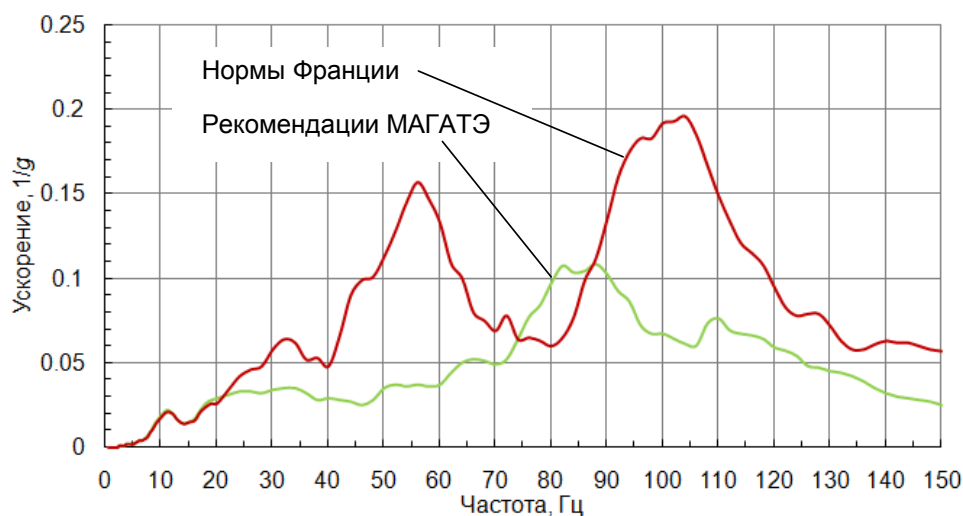


Рис. 8. Спектры ускорений на отметке установки оборудования

Произведено сравнение поэтажных спектров на одной из отметок спецкорпуса при ударе самолета *Lear Jet-23* (рис. 8) с использованием двух вариантов нагрузки, показанных на рис. 3: заданной в нормах Франции и упрощенной, приведенной в рекомендациях МАГАТЭ. Полученные поэтажные спектры значительно различаются, причем использование упрощенной нагрузки привело к существенному снижению спектров ускорений, что может привести к недооценке нагрузок на оборудование.

Нагрузки при ударе самолёта принципиально не могут быть заданы точно, так как заранее неизвестен ни тип, ни характеристики падающего самолёта. Поэтому сам расчет на это воздействие становится условным. Для оценки безопасности АЭС предлагается при задании нагрузки использовать следующую процедуру.

1. Разделить самолеты на классы (коммерческие различной величины, авиация общего применения, военные различного назначения и пр.).
2. Для самолетов одного класса, при необходимости варьируя их параметры, рассчитать нагрузки при ударе в недеформируемую преграду.
3. Выполнить статистическую обработку этих нагрузок и построить нагрузку с заданной обеспеченностью (вероятностью непревышения). Эта нагрузка и должна рассматриваться как расчетная для самолетов данного класса.
4. Для учёта в расчетах на удар самолета податливости конструкции и её пробивания, необходимо подобрать параметры «эквивалентного самолета».

Рассмотрено применение разработанных методов определения нагрузок для случая удара в защитные конструкции разрушающегося объекта, летящего с

малой скоростью - рассчитана прочность монолитной плиты покрытия спецкорпуса Кольской АЭС при падении на неё стеновой панели расположенного рядом здания. Установлено, что расчет совместного движения панели и защитной конструкции наилучшим образом учитывает ресурсы несущей способности и, в отличие от стандартных квазистатических методов расчёта, позволяет обосновать прочность рассматриваемой защитной конструкции.

Получено, что при ударе объекта, летящего с малой скоростью, основной вклад в значение нагрузки, определяемой по формуле Риеры (1), вносит прочность тела (первый член в правой части), а не динамический (второй) член, как при ударе быстролетящего объекта (самолёта).

**В пятой главе** изложена усовершенствованная методика оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся объектов для случая удара самолёта. Основные этапы разработанной методики представлены в виде блок-схемы на рис. 9 и заключаются в следующем.

Существующая методика используется до момента определения типов самолётов, падение которых возможно. Затем выполняется процедура определения расчётных нагрузок для самолётов одного класса. Для определения погонной массы и прочности «эквивалентного самолёта» решается «обратная задача».

Следующим этапом методики является аппроксимация защитной конструкции в виде системы с одной или несколькими степенями свободы. Выбор аппроксимации производится исходя из соотношения габаритов конструкции и «пятна удара» бьющего самолёта.

Далее производится динамический расчёт схематизированной защитной конструкции на полученную нагрузку с учётом совместного движения защитной конструкции и бьющего самолёта.

Если в результате расчёта несущая способность защитной конструкции обеспечена, тогда выполняется расчёт динамических нагрузок на оборудование, определяемых поэтажными спектрами отклика. При необходимости усиления оборудования для обеспечения безопасности проверяемого элемента АЭС в проект вносятся соответствующие изменения.

В случае если несущая способность защитной конструкции не обеспечена, возможно два варианта:

а) разрушение защитной конструкции допускается, тогда на следующем этапе определяются динамические нагрузки на оборудование, для расчёта поэтажных спектров отклика принимается нагрузка с учётом пробивания защитной конструкции; при необходимости производится усиление оборудования;

б) несущая способность защитной конструкции не обеспечена при недопустимости пробивания, тогда проектируется её усиление, затем уточняются

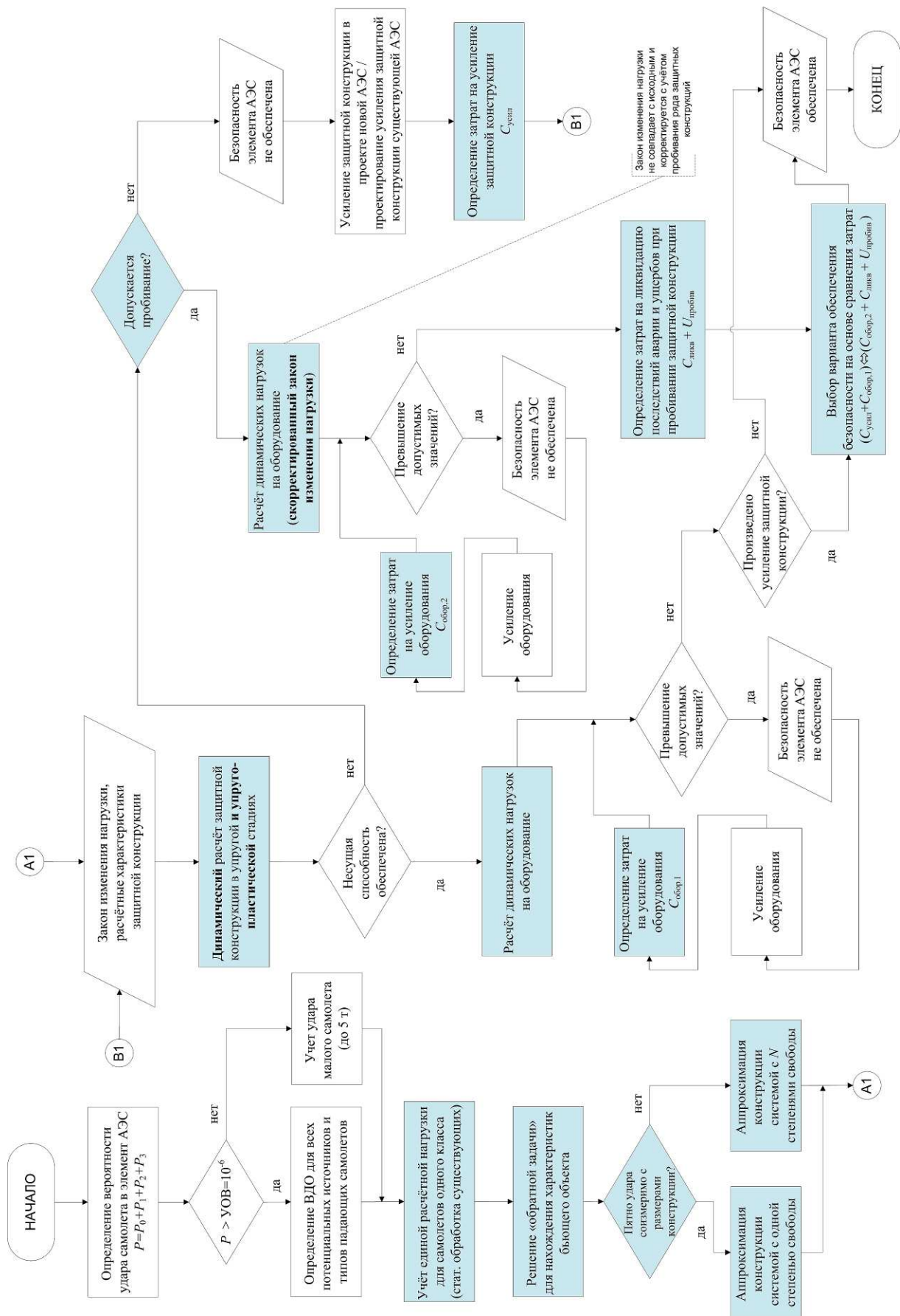


Рис. 9. Блок-схема методики оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся объектов (элементы, разработанные автором и дополняющие существующую методику, выделены цветом)

расчётные характеристики усиленной защитной конструкции и осуществляется её расчёт; если после очередного усиления несущая способность конструкции обеспечена, тогда повторяется расчёт динамических нагрузок на оборудование и при необходимости производится усиление оборудования.

При допущении пробивания неотчетственных защитных конструкций выбор варианта обеспечения безопасности рассматриваемого элемента АЭС должен быть основан на комплексном технико-экономическом анализе, предусматривающем определение затрат на усиление защитной конструкции, усиление оборудования, ликвидацию последствий пробивания и возможных ущербов.

**В заключении** сформулированы основные результаты исследований.

1. Разработана методика оценки безопасности АЭС, основанная на математической модели совместного движения разрушающегося объекта и защитной конструкции, а также нагрузок на последнюю при ударах разрушающихся объектов с учетом веса объекта, наклона конструкции и схематизации её по методу конечных элементов. Методика позволяет произвести оценку безопасности при ударах в наклонные поверхности, падении грузов и обрушении строительных конструкций. Получены зависимости для вычисления нагрузок при ударах объектов простейшей формы.

2. Усовершенствованы способы упрощенной схематизации железобетонных защитных конструкций в виде эквивалентных линейно-упругого и упруго-пластического осцилляторов с использованием шарниров пластичности, применяемой при динамических расчетах. Предложен универсальный способ определения параметров эквивалентного линейно-упругого осциллятора, основанный на статическом конечно-элементном расчёте.

3. Разработана методика решения «обратной задачи», заключающаяся в подборе по заданному закону нагрузки параметров (распределения массы и прочности) «эквивалентного» разрушающегося объекта для расчёта прочности и колебаний защитных конструкций с учетом их податливости и неупругих перемещений.

4. На примере расчета несущей способности защитных конструкций спецкорпуса 4-го блока Белоярской АЭС при ударе самолета показано, что учет одновременного разрушения самолёта и движения защитной конструкции позволяет более точно оценить её несущую способность и предложить более экономичную конструкцию при соблюдении требований безопасности. Установлено, что при ударе объекта, летящего с малой скоростью, основной вклад в нагрузку вносит сила его разрушения, а не динамическая составляющая.

5. Определено влияние выбора расчётных характеристик защитной конструкции и использования упрощенного закона изменения нагрузки на результаты расчёта колебаний зданий и сооружений АЭС, вызванных ударом самолета, и поэтажных спектров отклика, определяющих инерционные нагрузки на расположенное внутри оборудование: учёт снижения расчётной жёсткости конструкций приводит к снижению значений ПС; расчет с использованием упрощенного и сглаженного закона изменения нагрузки при ударе самолёта приводит к существенному занижению ПС. Выявлено, что при последовательном пробивании самолетом строительных конструкций нагрузки на оборудование могут оказаться выше, чем при сохранении цельности защитных конструкций, а потому решение о допустимости такого пробивания следует принимать на основе комплексного технико-экономического анализа.

6. Предложен способ задания расчётных нагрузок при ударе самолёта, основанный на статистической обработке законов изменения нагрузок при ударах самолетов определенного типа, в результате которой определяется стандартный расчётный закон изменения нагрузки с заданной обеспеченностью, позволяющий подобрать параметры «эквивалентного самолета». Такой способ задания нагрузок при падении самолёта позволяет произвести более полную оценку безопасности элементов АЭС.

7. Использование разработанной методики позволило выполнить расчёты прочности и колебаний зданий Кольской, Белоярской и Ленинградской АЭС-2 для оценки безопасности их элементов при ударе самолёта малой гражданской авиации и обрушении вышележащих строительных конструкций. Результаты работы могут быть использованы для оценки безопасности при разработке проектов новых АЭС, а также для обоснования безопасности при продлении срока службы действующих энергоблоков АЭС.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**1. Бирбраер А. Н. Нагрузки на строительные конструкции при ударах разрушающихся летящих тел / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.– 2008.– № 2.– С. 53–57.**

**2. Бирбраер А. Н. Пробивание строительных конструкций разрушающимся летящим телом / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2009.– № 2.– С. 24–28.**

**3. Бирбраер А. Н. Оценка прочности строительных конструкций АЭС при ударах разрушающихся тел / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // Научно-технические ведомости СПбГПУ.– 2009.– № 4-1 (89).– С. 68–74.**

4. Бирбраер А.Н. Последовательное пробивание системы преград самолётом / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. I. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.– С. 71–72.

5. Бирбраер А.Н. Методы расчета железобетонных конструкций на сопротивление обрушению / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. I. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.– С. 109–110.

6. Волкодав И.А. Корректировка жесткостных характеристик элементов при расчете конструкций из монолитного железобетона / И.А. Волкодав, Ю.С. Мелентьева // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. I. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.– С. 114–116.

7. Бирбраер А.Н. Методы расчёта строительных конструкций при ударах разрушающихся летящих тел / А.Н. Бирбраер, И.А. Волкодав // Кафедра СКИМ. 75 лет на факультете: сборник материалов научно-технического семинара. 29–30 октября 2009 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.– С. 36–41.