



DOI: 10.18721/JEST.230416

УДК 629.039.58

*Н.А. Чернуха<sup>1</sup>, В.В. Лалин<sup>2</sup>, А.Н. Бирбраер<sup>3</sup>*

1, 2 — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

3 — АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия

## **ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОБОРУДОВАНИЕ АЭС ПРИ УДАРЕ САМОЛЕТА**

Статья посвящена обоснованию величины расчетных динамических нагрузок на технологическое оборудование АЭС при ударе самолета. Обычно эти нагрузки задаются в виде поэтажных спектров ответа (ПС) и применяется консервативный детерминистический подход, когда в качестве расчетного принимается максимально возможный ПС. Однако падение самолета на АЭС — чрезвычайно редкое случайное воздействие, и при анализе нагрузок на оборудование необходимо использовать вероятностный подход. Приведена методика вычисления ПС с требуемой вероятностью непревышения (обеспеченность). Учитываются следующие случайные факторы: место и угол удара, расстояние от него до интересующего оборудования. Предложена методика вероятностного обоснования расчетных динамических нагрузок на оборудование в случае преднамеренного падения самолета на АЭС (террористический акт). Дана методика суммирования одноименных внутренних усилий, рассчитанных по трем компонентам ПС. Определен критерий оптимального шага интегрирования уравнений движения при расчете вынужденных колебаний сооружений при ударе самолета.

АЭС; УДАР САМОЛЕТА; ПРЕДНАМЕРЕННОЕ ПАДЕНИЕ САМОЛЕТА; ТЕРРОРИСТИЧЕСКИЙ АКТ; НАГРУЗКИ НА ОБОРУДОВАНИЕ; ПОЭТАЖНЫЙ СПЕКТР ОТВЕТА; ВЕРОЯТНОСТЬ НЕПРЕВЫШЕНИЯ; КОМПОНЕНТЫ НАГРУЗОК.

*Ссылка при цитировании:*

Н.А. Чернуха, В.В. Лалин, А.Н. Бирбраер. Вероятностное обоснование динамических нагрузок на оборудование АЭС при ударе самолета // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 159–171. DOI: 10.18721/JEST.230416.

*N.A. Chernukha<sup>1</sup>, V.V. Lalin<sup>2</sup>, A.N. Birbraer<sup>3</sup>*

1, 2 — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

3 — JSC «Atomproekt», St. Petersburg, Russia

## **PROBABILISTIC JUSTIFICATION OF DYNAMIC LOADS ON NPP EQUIPMENT CAUSED BY AIRCRAFT IMPACT**

The article is dedicated to the problem of justification of dynamic loads on NPP process equipment, caused by aircraft impact. Usually these loads are set by means of floor response spectra (FRS). Nowadays, a conservative deterministic approach is used in practice, when the maximum possible FRS is taken in NPP process equipment design. Since aircraft crash on NPP is an extremely rare random event, it is necessary to use the probabilistic approach to analyze dynamic loads on NPP equipment. The method of FRS calculation with the required non-exceedance probability is given. The following random variables are considered: point and angle of aircraft impact, distance between point of impact and equipment support. Probabilistic justification of dynamic loads on NPP equipment caused by intentional aircraft crash (act of terrorism) is presented. The procedure for summing the corresponding internal forces, calculated using three components of FRS, is given. The criterion of the optimal step for integrating the equations of motion when calculating the forced oscillations of structures under aircraft impact is determined.

NPP; AIRCRAFT IMPACT; INTENTIONAL AIRCRAFT CRASH; ACT OF TERRORISM; LOADS ON EQUIPMENT; FLOOR RESPONSE SPECTRA; NON-EXCEEDANCE PROBABILITY; LOAD COMPONENTS.

*Citation:*

N.A. Chernukha, V.V. Lalin, A.N. Birbraer, Probabilistic Justification of Dynamic Loads on NPP Equipment Caused by Aircraft Impact, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017) 159–171, DOI: 10.18721/JEST.230416.

### Введение

Объекты использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе атомные электростанции (АЭС), относятся к особо опасным и технически сложным объектам<sup>1</sup>, к которым предъявляются повышенные требования по безопасности [1–3].

При проектировании АЭС должны быть выявлены все прогнозируемые внутренние и внешние опасности природного и техногенного происхождения, которые могут оказать влияние на обеспечение ядерной и радиационной безопасности<sup>2</sup>. Они должны быть учтены при определении постулируемых иницирующих событий (ИС) в проекте АЭС, а их последствия (эффекты, нагрузки и т.д.) — при проектировании конструкций, систем и компонентов (КСК) АЭС, важных для безопасности<sup>3,4</sup>.

Падение самолета на АЭС — одно из наиболее опасных внешних воздействий техногенного происхождения [4–8]. Оно сопровождается целым комплексом нагрузок и воздействий. Среди них: удар фюзеляжа самолета и его обломков (например, двигатель, шасси); горение и/или взрыв авиационного топлива, проникновение топлива внутрь здания через вентиляционные

и технологические отверстия в ограждающих конструкциях [9–11]<sup>5</sup>. В статье рассмотрено обоснование нагрузок на оборудование АЭС при падении самолета, связанных с механическим воздействием первичного летящего тела — ударом фюзеляжа самолета.

Удар самолета вызывает интенсивные колебания как самого сооружения, так и размещенного в нем технологического оборудования АЭС [12, 14]. В результате возникают динамические нагрузки на это оборудование. В проектных основах безопасности современных АЭС учитываются падения легких, военных и даже больших коммерческих самолетов. Динамические нагрузки на оборудование при ударе большого коммерческого самолета могут быть очень велики, поэтому их корректный анализ и обоснованное снижение — актуальная проблема при проектировании АЭС.

Для снижения нагрузок на оборудование при ударе самолета используют различные способы. Так, сооружения АЭС, важные для безопасности, могут дублироваться и разноситься на площадке так, чтобы не подвергнуться последствиям падения самолета одновременно. Для них нагрузки от удара самолета можно вообще не учитывать. Однако, например, здание реактора существует на площадке АЭС в единственном числе. Снижение нагрузок на реакторную установку и другие системы, размещенные в этом здании, достигается путем устройства двойной защитной оболочки (*double wall containment*) [14, 15].

Но не все здания и сооружения АЭС проектируются с двойными ограждающими конструкциями. Более того, может потребоваться оценка безопасности действующих АЭС, которые были или спроектированы вообще без учета удара самолета, или рассчитаны на удар малого самолета, но со временем выяснилась необходимость

<sup>1</sup> Федеральный закон от 30.12.2009 года N384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [электр. ресурс] URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 02.09.2017)

<sup>2</sup> Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series. Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 Available: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf> (Accessed 02.09.2017)

<sup>3</sup> Швыряев Ю.В. Вероятностный анализ безопасности при проектировании и эксплуатации атомных станций с реакторами ВВЭР: дисс. ... докт. техн. наук: 05.14.03. Москва, 2004. 340 с.

<sup>4</sup> Шульман Г.С. Вероятностный анализ безопасности АЭС с учетом комплекса экстремальных природных и техногенных воздействий: дисс. ... докт. техн. наук: 05.14.16. Санкт-Петербург, 1999. 293 с.

<sup>5</sup> См. также: External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5 Available: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1159\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1159_web.pdf) (Accessed 02.09.2017)

учета более тяжелого. Проблема в последние годы приобрела особую актуальность ввиду опасности преднамеренных крушений (террористические акты) с использованием больших самолетов коммерческой авиации.

Падение самолета на АЭС — очень тяжелое, но крайне редкое внешнее воздействие. Поэтому применение детерминистического подхода, когда при проектировании технологического оборудования принимаются максимально возможные величины нагрузок, представляется излишне консервативным. Более рациональные величины нагрузок можно получить посредством вероятностного анализа [10, 16, 17]<sup>6</sup>, при котором принимаются во внимание случайные факторы при падении самолета на АЭС: вероятность реализации самого падения, вероятность его удара именно в данную конструкцию, место удара, угол между направлением удара и нормалью к поверхности конструкции.

**Целью** была разработка методики вероятностного обоснования динамических нагрузок на оборудование АЭС при ударе самолета с учетом названных случайных факторов.

#### Методы исследования динамических нагрузок на оборудование

В соответствии с требованиями норм<sup>7</sup> динамический расчет сооружений при падении самолета выполняется с определением поэтажных записей акселерограмм (ПА), т.е. ускорений от времени, и поэтажных спектров отклика (ПС), вычисленных в местах крепления оборудования. ПС используются для проверки прочности оборудования по линейно-спектральной теории (ЛСТ), ПА — для прямого динамического анализа [18]. Для некоторого оборудования АЭС предусмотрены натурные испытания, чтобы проанализировать их работоспособность при динамических нагрузках [19, 20].

Изначально подходы к вычислению ПА и ПС разрабатывались для сейсмических ра-

счетов<sup>8,9</sup> [21]. Процедура расчета ПА и ПС при ударе самолета приведена в [10].

Наиболее консервативный способ задания динамической нагрузки на оборудование — принять в качестве расчетного наибольший по величине ПС. Максимальный ПС может быть получен путем огибания ПС, вычисленных при различных вариантах удара самолета в открытые ограждающие конструкции. Обычно он соответствует удару самолета в точку здания, ближайшую к месту расположения оборудования, и по нормали к поверхности ограждающей конструкции.

На рис. 1 приведено сравнение ПС на консоли полярного крана здания реактора при возникновении максимального расчетного землетрясения (МРЗ) интенсивностью 7 баллов<sup>10</sup>, которое обязательно учитывается в проектах АЭС, и ударе большого коммерческого самолета.

Как видно, динамические нагрузки на консоли полярного крана при ударе самолета очень велики. При этом в диапазоне высоких частот они существенно больше, чем сейсмические. Но вероятность их возникновения чрезвычайно мала по нескольким причинам.

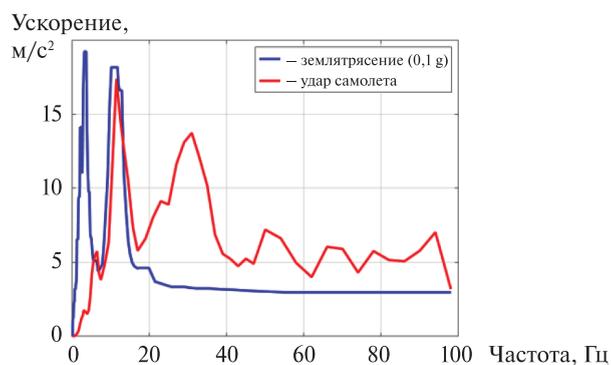


Рис. 1. Сравнение ПС при землетрясении и ударе самолета

Fig. 1. Comparison of FRS in case of earthquake and aircraft impact

<sup>8</sup> НП-031–01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. 2001. 25 с.

<sup>9</sup> ASCE4–98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. USA: ASCE. 2000. 118 p.

<sup>10</sup> НП-064–05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2005. 62 с.

<sup>6</sup> См. также: Архипов С.Б. Вероятностный анализ прочности и колебаний строительных конструкций зданий АЭС при ударе самолета: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГПУ, 2000.— 138 с.

<sup>7</sup> ПиНАЭ-5.6. Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа. М.: Минатомэнерго РФ. 1986. 22 с.

Во-первых, очень мала вероятность самого падения самолета на АЭС. Во-вторых, удар самолета может прийти в любую открытую ограждающую конструкцию здания, а не рядом с рассматриваемой единицей оборудования. Наконец, в-третьих, траектории падения самолета случайны, и удар может быть нанесен не по нормали, а под углом к поверхности ограждающей конструкции. Таким образом, нагрузка на конкретную единицу оборудования, зависящая от его расстояния до места удара и угла соударения самолета с ограждающей конструкцией здания, является случайной. Поэтому логично определять ее с учетом случайных факторов.

### Вычисление ПС с требуемой обеспеченностью

Решение включать или не включать падение самолета в проектные основы АЭС принимается на основе анализа вероятности этого события. По существующей проектной практике после этого действуют по принципу «или-или»: если вероятность падения на АЭС меньше заданного в нормах<sup>11</sup> значения  $10^{-6}$  1/год, то это воздействие вообще не рассматривается; в противном случае считается, что самолет упадет обязательно.

Далее нагрузки на оборудование будут определяться с использованием такого же подхода: считается, что падение самолета на важ-

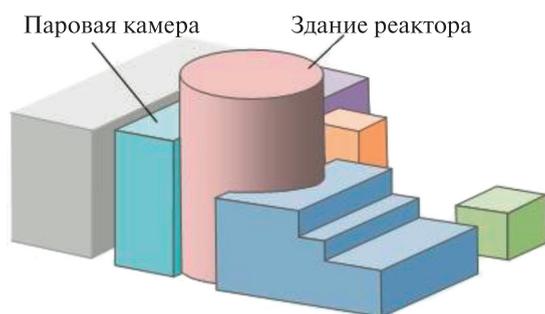


Рис. 2. Важные для безопасности Здания и сооружения условной АЭС (ядерный остров)  
Fig. 2. NPP buildings and structures, related to safety (nuclear island)

<sup>11</sup> НП-064–05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. — 2005. 62 с.

ные для безопасности сооружения АЭС, произойдет обязательно, т.е. с вероятностью 1. Это допущение консервативно и принято в запас надежности, ибо в действительности вероятность падения очень мала.

Кроме того, в настоящей работе предполагается, что полет самолета с любой стороны равновероятен [22]. Аналогичным образом нагрузки могут быть определены, если АЭС расположена вблизи трассы полетов [23]. Учитывается случайность точки удара (т.е. расстояния от нее до места крепления рассматриваемого оборудования), а также угла между направлением удара и нормалью к поверхности ударяемой конструкции.

Вычисление ПС с требуемой обеспеченностью будет продемонстрировано на примере зданий реактора и паровой камеры условной АЭС, изображенных на рис. 2. Они соединены между собой, т.е. являются единым сооружением.

Параметры нагрузки и пятна удара рассматриваемого самолета *Boeing 747–400* представлены на рис. 3.

Процедура вычисления ПС содержит следующие этапы.

1. *Разбивка поверхностей ограждающих конструкций на возможные зоны удара.* В каждой из интересующих внутренних точек здания, где закреплено оборудование, вычисляются ПС при ударах во все наружные точки. Для этого поверхности ограждающих конструкций, открытые для удара, разбиваются на участки (рис. 4, а-в). Предполагается удар в центр участка по нормали к конструкции. В результате в каждой внутренней точке получаются исходные ПС, используемые далее при вычислении ПС с заданной обеспеченностью.

В дальнейших расчетах не учитывались удары в одну из стен паровой камеры (участки 18–21), так как она закрыта другим сооружением и удар в нее невозможен. Таким образом, число точек удара —  $n = 19$ ; такое же число исходных спектров.

2. *Определение вероятностей удара в каждый участок.* Вероятность удара в  $i$ -й участок строительной конструкции зависит не только от его площади  $A_i$ , но и от положения в пространстве. Поэтому при ее вычислении используется эквивалентная площадь  $A_{эi}$ , зависящая от угла  $\gamma$  между направлением удара и нормалью к поверхности конструкции [22, 23]. Этот угол лежит в диапазоне  $0 \leq \gamma \leq \pi/2$ . Для горизонтальной плоскости

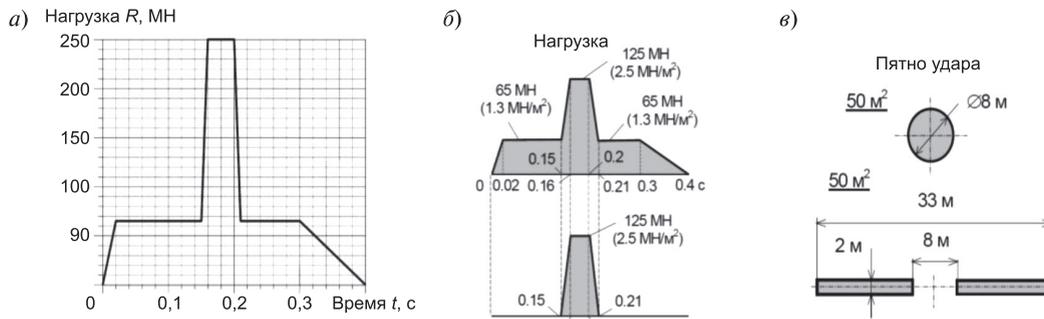


Рис. 3. Параметры нагрузки при ударе Boeing-747-400 [10]:

a — функция зависимости нагрузки от времени; б — распределение нагрузки по пятну удара; в — пятно удара

Fig. 3. Load parameters for Boeing-747-400 impact [10]:

a — load-time function; б — load distribution on impact area; в — area of impact

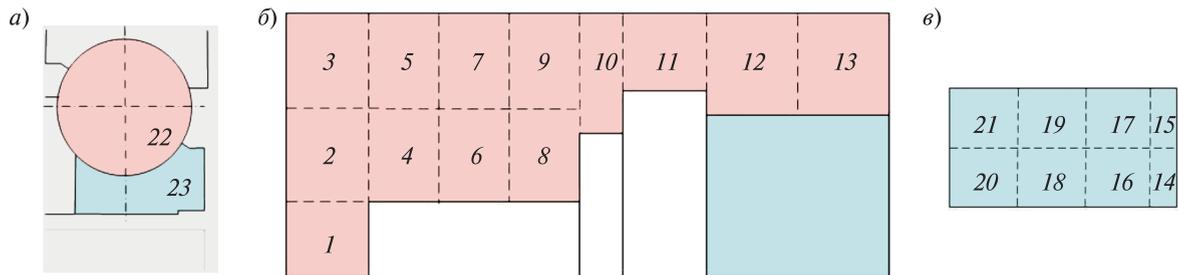


Рис. 4. Разбивка конструкций, открытых для удара, на участки:

a — план зданий реактора и паровой камеры; б — развертка цилиндра здания реактора; в — развертка стен паровой камеры

Fig. 4. Structures open for impact, divided to areas:

a — reactor building and steam cell plan view; б — cylinder wall of reactor building; в — steam cell walls

$$A_{эvi} = A_{Гi} f_{Г}(\gamma), \quad (1)$$

где  $f_{Г}(\gamma)$  — вероятность того, что удар будет нанесен под углом к нормали, не превосходящим  $\gamma$ .

Если подлет самолета к АЭС одинаково вероятен с любой стороны [22], то для вертикальной плоскости, а также цилиндра с вертикальной осью будет

$$A_{эvi} = A_{Bi} f_{B}(\gamma). \quad (2)$$

Коэффициенты  $f_{B}(\gamma)$  и  $f_{Г}(\gamma)$  рассчитаны в [22] в предположении, что соответствующие ограждающие конструкции здания полностью открыты для удара. В случае горизонтальной плоскости это означает, что азимут подлета самолета может лежать в пределах от 0 до 360°, а для вертикальных конструкций (плоскости или цилиндра) — от 0 до 180°. В действительности некоторые поверхности зданий закрыты

соседними сооружениями, в результате чего сектор подлета сокращается. Если подлет возможен в пределах угла  $\beta$ , то для горизонтальной плоскости вероятность удара, найденную для открытой плоскости, следует умножить на коэффициент

$$k_{Г} = \beta/360, \quad (3)$$

а для вертикальных поверхностей — на коэффициент

$$k_{B} = \beta/180, \quad (4)$$

что равносильно умножению на эти коэффициенты площадей указанных поверхностей.

Например, кровля паровой камеры на рис. 4, a (участок 23) с одной стороны «затенена» зданием реактора и подлет к ней возможен в пределах  $\beta = 180^\circ$ . Поэтому ее площадь должна быть умножена на коэффициент

$k_r = 180/360 = 0,5$ . Стенка паровой камеры (участки 14–15) с одной стороны закрыта зданием реактора, и сектор полета к ней составляет  $\beta = 90^\circ$ . Поэтому их площади умножаются на коэффициент  $k_b = 90/180 = 0,5$ .

Если разбить диапазон  $0 \leq \gamma \leq \pi/2$  на  $j$  интервалов, то вероятность удара в  $i$ -ю горизонтальную конструкцию под углом к нормали, лежащим в интервале  $\gamma_k \leq \gamma \leq \gamma_{k+1}$ , равна

$$P_{ri,k} = \frac{A_{ri}}{A_s} [f_r(\gamma_{k+1}) - f_r(\gamma_k)], \quad (5)$$

где  $A_s$  — эквивалентная площадь всего ядерного острова, вычисленная в [22].

Аналогично вычисляется вероятность  $P_{vi,k}$  удара под таким углом в вертикальную стену, цилиндр защитной оболочки. Вероятность того, что самолет вообще не попадет в рассматриваемое сооружение, равна

$$\bar{P} = 1 - \sum_i \sum_k (P_{vi,k} + P_{ri,k}). \quad (6)$$

Для зданий реактора и паровой камеры  $\bar{P} = 0,74$ .

3. *Определение зависимости ускорений ПС от угла удара.* Значения ускорений пропорциональны нагрузке, нормальная составляющая которой равна  $R_n = R \cos \gamma$  (касательная составляющая при расчете ПС не учитывалась). Следовательно, значения ПС при ударе в данную наружную точку здания под углом  $\gamma$  равняются его значениям при ударе по нормали, умноженным на  $\cos \gamma$ .

Таким образом, в результате второго и третьего этапов найдены величины ускорений и вероятности их реализации при ударах под разными углами. Общее количество полученных исходных ПС равно  $nj$ , т.е. произведению количества точек удара  $n$  на число интервалов  $j$ .

4. *Вычисление распределения вероятности ускорений в ПС.* Как известно, ПС  $S(f)$  представляет собой зависимость модуля максимального ускорения осциллятора от его частоты  $f$ . Ускорения при разных частотах определяются независимо друг от друга, поэтому и их вероятности вычисляются независимо.

Каждой частоте  $f_s$  соответствуют  $nj$  ускорений  $w$  осциллятора со своими вероятностями. Диапазон между максимальным и минимальным значениями ускорений при данной частоте разбивается на интервалы. Все ускорения

распределяются по интервалам, и вероятности ускорений, попавших в один интервал, суммируются. Обозначим как  $p_r$  найденную таким образом вероятность для  $r$ -го интервала.

С использованием этих данных строится интегральный закон  $P(w)$  вероятности ускорений при заданной частоте. Если самолет не попал в здание, то  $w = 0$ , а вероятность этого  $P(0) = \bar{P}$ . Вероятность каждого следующего значения ускорения  $P(w_{r+1}) = P(w_r) + p_{r+1}$ . Аналогично определяются вероятности ускорений при всех других частотах.

5. *Построение ПС с требуемой обеспеченностью.* С использованием интегральных законов распределения ускорений строится ПС, т.е. зависимость ускорений от частоты, с требуемой обеспеченностью.

На рис. 5 изображены ПС с обеспеченностями 1, 0,95 и 0,85, вычисленные для консоли полярного крана (рис. 5, а) и паровой камеры (рис. 5, б). ПС с обеспеченностью 1 — это огибающая ПС при ударах во все точки и под всеми углами, т.е. наихудший вариант нагрузки.

Видно, что учет случайных факторов приводит к значительному снижению ускорений, т.е. расчетных динамических нагрузок на оборудование. Для сравнения на обоих рисунках показан ПС при МРЗ интенсивностью 7 баллов. Видим, что на консоли полярного крана при ударе самолета ПС с обеспеченностью 0,85 при всех частотах меньше сейсмического. Ускорения для паропроводов значительно выше, чем на консоли крана, так как она меньше здания реактора. Тем не менее при ударе ПС с обеспеченностью 0,85 также практически не превосходит сейсмический. Значит, если расчетные нагрузки от удара самолета приняты с такой обеспеченностью, то они не превосходят обязательно учитываемые сейсмические. Следовательно, для оборудования, расположенного в данных местах зданий, удар самолета можно вообще не учитывать.

Результаты расчетов по предлагаемой методике позволяют сделать вывод, что ускорения ПС при ударе самолета тем меньше, чем меньше обеспеченность. Поэтому принципиально важно определить, с какой обеспеченностью задавать расчетные ПС. Ее можно принять по аналогии с сейсмическими расчетами АЭС. Как известно, сейсмические спектры отклика на грунте вычисляют по совокупности аксе-

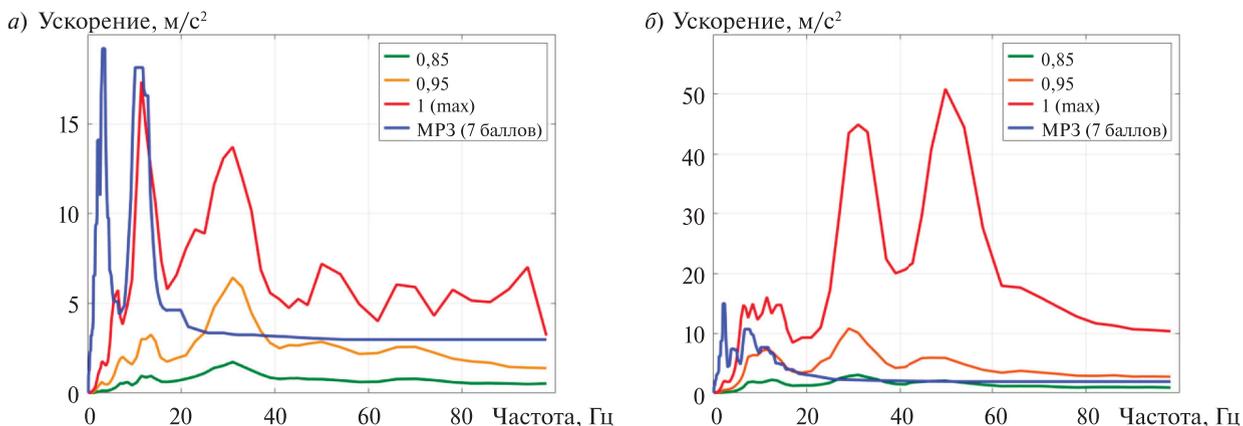


Рис. 5. ПС с разной обеспеченностью: *а* — полярный кран; *б* — паропроводы II контура  
 Fig. 5. FRS with different non-exceedance probability: *a* — polar crane; *b* — steam pipelines

лерограмм как «математическое ожидание +1 стандартное отклонение». В случае нормального распределения это соответствует обеспеченности примерно 0,85. Такую же обеспеченность можно принимать и при ударе самолета. Это относительно невысокое ее значение оправдано тем, что ПС служат исходными данными для расчетов оборудования по линейно-спектральной теории, которая дает внутренние усилия с большим запасом.

**Обоснование динамических нагрузок на оборудование при преднамеренном падении самолета**

В последние годы произошло несколько случаев преднамеренных аварий самолетов: например, террористическая атака на Всемирный торговый центр 11.09.2001 в Нью-Йорке (США)

и умышленное падение самолета, устроенное пилотом авиакомпании Germanwings 24.03.2015 под г. Динь-ле-Бен (Франция). Теперь в проектах АЭС иногда стали предполагать не случайное, а преднамеренное падение самолета (террористический акт) и рассматривать его как обязательное, постулированное ИС. Это может быть определено в специальных требованиях Заказчика, а также в нормативных документах страны размещения площадки АЭС.

Далее будем считать, что падение самолета на ядерный остров произойдет обязательно, т.е. с вероятностью 1, и будет нанесен наиболее опасный удар — по нормали к строительной конструкции, т.е. не будем учитывать возможную вариацию угла удара с нормалью. Таким образом, будем принимать во внимание только один случайный фактор — точку удара.

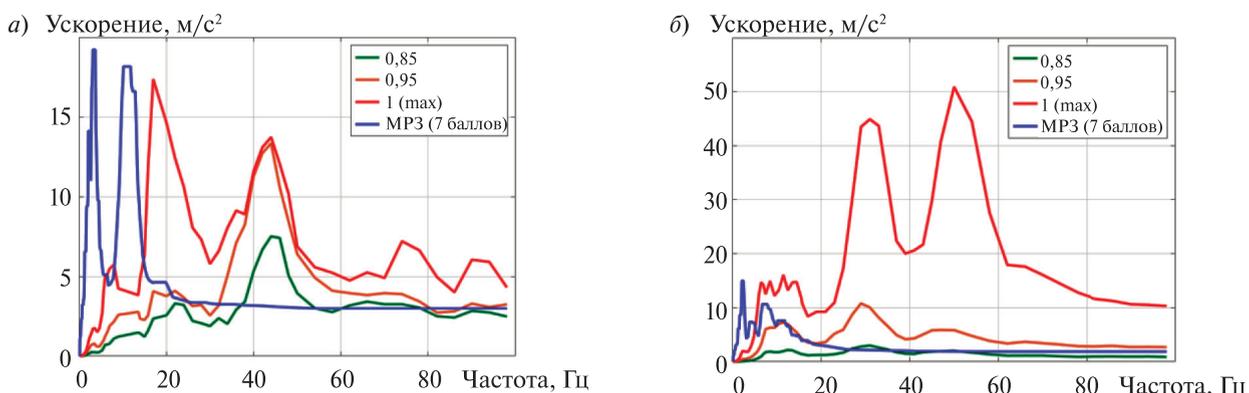


Рис. 6. ПС при преднамеренном падении самолета: *а* — полярный кран; *б* — паропроводы II контура  
 Fig. 6. FRS in case of intentional aircraft crash: *a* — polar crane; *b* — steam pipelines

Процедура вычисления ПС с требуемой обеспеченностью при теракте — такая же, как изложена выше (за исключением учета угла удара).

На рис. 6 изображены ПС с разной обеспеченностью, вычисленные в тех же точках, что на рис. 5. Сравнение этих двух рисунков показывает, что ускорения при преднамеренном падении самолета (террористический акт) значительно выше, чем при случайном падении. Но в то же время благодаря учету случайности точки удара ускорения существенно ниже максимально возможных величин. Как и выше, при задании расчетных ускорений можно принимать ПС с обеспеченностью 0,85.

#### Суммирование внутренних усилий при использовании трех компонент ПС

Прочность оборудования при динамических воздействиях, в том числе вызванных ударом самолета, должна проверяться в предположении одновременного действия трех компонент нагрузки<sup>12</sup>. Если оборудование схематизировано как линейная система, то внутренние усилия можно рассчитывать не на все компоненты одновременно, а на каждую отдельно. В результате получаются одноименные внутренние усилия, соответствующие действию каждой из компонент нагрузки. Например, для момента  $M_x$  — три момента:  $M_x^{(x)}$ ,  $M_x^{(y)}$  и  $M_x^{(z)}$  (верхний индекс означает компоненту нагрузки). После этого одноименные внутренние усилия следует сложить.

Если компоненты нагрузки заданы в виде функций времени, то найденные внутренние усилия также зависят от времени. В этом случае никакой проблемы с суммированием одноименных усилий не возникает: их просто алгебраически складывают в каждый из моментов времени.

Но если воздействие задано с помощью трех компонент ПС —  $S_x$ ,  $S_y$  и  $S_z$ , то в результате расчета на каждую из них получаются максимальные значения одноименных усилий, которые достигаются в разные, неизвестные моменты времени. Поэтому при их суммировании приходится вводить дополнительные допущения.

Часто при ударе самолета используют такие же способы суммирования, как при сейсмическом воздействии. В соответствии с одним из них («ККСК») суммарное внутреннее усилие считается равным квадратному корню из суммы квадратов одноименных усилий, вычисленных по каждой из компонент:

$$M_x = \sqrt{[M_x^{(x)}]^2 + [M_x^{(y)}]^2 + [M_x^{(z)}]^2}. \quad (7)$$

В другом способе («100+40+40») и аналогичном ему, но с другими коэффициентами («100+30+30»)<sup>13</sup>, рассматриваются следующие сочетания одноименных усилий:

$$M_x = \begin{cases} M_x^{(x)} \pm 0,4M_x^{(y)} \pm 0,4M_x^{(z)}; \\ \pm 0,4M_x^{(x)} + M_x^{(y)} \pm 0,4M_x^{(z)}; \\ \pm 0,4M_x^{(x)} \pm 0,4M_x^{(y)} + M_x^{(z)}. \end{cases} \quad (8)$$

Применимость этих способов при колебаниях, вызванных ударом самолета, вызывает сомнения. Во-первых, колебания при ударе самолета имеют иной характер, чем сейсмические (частотный состав, соотношение компонент) [24]. Во-вторых, описанные способы были предложены на основе анализа записей землетрясений и предназначены для сооружений, опирающихся на грунт. Поэтому неясно, насколько они вообще пригодны для колебаний внутри зданий.

Далее излагается методика суммирования одноименных усилий при колебаниях вследствие удара самолета. Она подобна способу «100+40+40», но с другими коэффициентами сочетаний, которые вычисляются посредством вероятностного анализа колебаний здания. Рассматриваются три сочетания одноименных усилий, в которых они складываются алгебраически. При этом одно из усилий («главное») входит с коэффициентом 1, т.е. своим максимальным значением, а два других («добавки») — с коэффициентами, определенными, как описано далее.

Но прежде необходимо отметить два обстоятельства. Во-первых, при ударе самолета в одну и ту же наружную точку здания колебания в разных внутренних точках различны. Поэтому и коэффициенты сочетаний для од-

<sup>12</sup> НП-031—01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. М.: Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности, 2001. 25 с.

<sup>13</sup> BS EN 1998—1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. London: BSI.— 2005. 233 p.

ноименных усилий не могут быть одинаковыми для всего здания, т.е. в каждой внутренней точке они свои. Во-вторых, колебания в одной и той же внутренней точке при ударах в разные наружные точки также различны. Поскольку удар в каждую из наружных точек имеет свою вероятность, то и коэффициенты сочетаний могут быть определены только с определенной вероятностью.

Вычисление коэффициентов, приведенных в табл. 1, производится следующим образом.

При ударе самолета в какую-то наружную точку здания в каждой внутренней точке получается три компонента ПА (далее они именуются «исходными»), по которым затем вычисляются компоненты ПС. Сначала компоненты ПА нормируются, для чего все значения каждой из них делятся на максимальное по модулю значение (далее они называются «нормированными»).

В варианте 1 главной является компонента спектра  $S_x$ , поэтому  $k_{1x} = 1$ . В качестве  $k_{1y}$  и  $k_{1z}$  задаются значения нормированных компонент  $y$  и  $z$  в тот момент времени, когда значение нормированной компоненты  $x$  по модулю равно 1. При этом, если знак значения соответствующей исходной компоненты  $y$  (или  $z$ ) совпадает со знаком исходной компоненты  $x$ , то для коэффициента  $k_{1y}$  (или  $k_{1z}$ ) принимается знак «+». В противном случае принимается «-». Таким образом, при данном сочетании соотношение величин и знаки усилий, рассчитанных по компонентам ПС  $S_x, S_y, S_z$ , являются такими же, как у исходных компонент акселерограммы.

Аналогичным образом определяются коэффициенты в вариантах 2 и 3, в которых главными являются  $S_y$  и  $S_z$ .

Такие таблицы сочетаний получаются при ударах в каждую из наружных точек здания, т.е. их количество равно числу точек удара. Вероятность коэффициентов сочетаний равна вероятности удара в соответствующую точку здания. С вероятностью  $\bar{P}$  по формуле (6) самолет вообще не попадет в сооружение. В этом случае нагрузки на оборудование равны нулю, а коэффициенты их сочетаний считаются равными 1. Используя эти данные, можно найти значения коэффициентов с требуемой обеспеченностью. Процедура вычисления такая же, как изложено в разделе о распределении вероятностей ускорений в ПС.

Таблица 1

**Обозначение коэффициентов сочетаний при ударе самолета**

Table 1

**The designation of the combination coefficients for an air strike**

Вариант сочетания одноименных усилий	Компонента ПС		
	$S_x$	$S_y$	$S_z$
1	$k_{1x} = 1$	$k_{1y}$	$k_{1z}$
2	$k_{2x}$	$k_{2y} = 1$	$k_{2z}$
3	$k_{3x}$	$k_{3y}$	$k_{3z} = 1$

Таблица 2

**Коэффициенты сочетаний одноименных усилий с обеспеченностью 1**

Table 2

**Coefficients of combinations of the same effort with security 1**

Вариант сочетания одноименных усилий	Компонента ПС		
	$S_x$	$S_y$	$S_z$
1	1,00	0,68	0,80
2	0,90	1,00	0,93
3	0,31	0,07	1,00

Таблица 3

**Коэффициенты сочетаний одноименных усилий с обеспеченностью 0,85**

Table 2

**Coefficients of combinations of the same effort with a security of 0.85**

Вариант сочетания одноименных усилий	Компонента ПС		
	$S_x$	$S_y$	$S_z$
1	1,00	0,23	-0,28
2	-0,54	1,00	0,17
3	-0,23	-0,65	1,00

В качестве примера в табл. 2 приведены коэффициенты сочетаний одноименных усилий с обеспеченностью 1, а в табл. 3 — с обеспеченностью 0,85, найденные для ПС на рис. 5, а.

**Оптимизация расчета ПА**

Процедура вероятностного обоснования нагрузок требует многократного повторения расчетов ПС. Наиболее трудоемко вычисление ПА путем численного интегрирования системы уравнений колебаний здания.

Важнейший параметр при динамическом анализе, влияющий на трудоёмкость расчетов, — это шаг интегрирования уравнений движения. Удар самолета является высокочастотным воздействием, поэтому крупный шаг исказит динамический отклик сооружения в диапазоне высоких частот [25]. Слишком мелкий шаг увеличит потребность в вычислительных ресурсах без прироста точности результатов.

Оптимальный шаг можно задать исходя из требования к точности вычисления ускорений осциллятора на втором этапе. Выразим их с помощью интеграла Дюамеля:

$$\begin{aligned} \ddot{X}_{\text{осц}}(t, f, \zeta) = \\ = -\omega_D \int_0^t \ddot{X}_3(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\omega$  и  $\omega_D$  — круговая частота осциллятора соответственно без учета и с учетом затухания (при обычном малом затухании  $\zeta$  они практически не отличаются). Если максимальная частота осциллятора равна  $\omega_{\text{max}}$  (то есть период колебаний минимален и равен  $T_{\text{min}}$ ), то шаг, с которым должна быть задана подынтегральная функция, т.е. шаг оцифровки  $\ddot{X}_3(t)$ , должен быть не крупнее  $\frac{1}{4}$  периода синусоидальной функции под интегралом:

$$\Delta t \leq \frac{T_{\text{min}}}{4} = \frac{1}{8\pi\omega_{\text{max}}} = \frac{1}{4f_{\text{max}}}, \quad (10)$$

где  $f_{\text{max}}$ , Гц, — максимальная частота осциллятора при расчете ПС. В этом случае при вычис-

лении интеграла с использованием линейной интерполяции методом трапеций синусоида отображается в виде двух треугольников.

При ударе большого коммерческого самолета спектры нагрузок содержат частоты до 100–150 Гц. Поэтому ПА можно рассчитывать с шагом  $\Delta t = 0,0025–0,0015$  с. Окончательный выбор шага осуществляется посредством проведения тестовых вычислений для каждой отдельной модели.

### Выводы

Предложенная методика определения ПС с заданной обеспеченностью позволяет обоснованно снизить расчетные динамические нагрузки на оборудование АЭС при ударе самолета.

Изложенная методика исходит из предположения, что подлет самолета с любого направления равновероятен [22] (например, случайное падение при равновероятном подлете с любой стороны, террористический акт). Однако она может быть распространена и на случай известного преимущественного азимута подлета (например, падение при полете по трассе) [23].

Коэффициенты сочетаний усилий для расчета оборудования по трем компонентам ПС могут быть вычислены с заданной обеспеченностью для каждой опорной точки на основе записей ПА.

При расчете ПА выбор шага интегрирования уравнений движения можно определять исходя из требуемой точности вычисления интеграла Дюамеля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жиркова Е.О.** Надежность и безопасность — основные требования в развитии атомной энергетики // Транспортное дело России. 2010. № 12. С. 155–157.
2. **Кузнецов Н.С., Смогунов В.В.** Надежность атомных станций при бомбардировке космическими объектами // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2011. Т. 1. С. 48–53.
3. **Седых Н.А.** Проблемы безопасности атомных электростанций // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 1–2. С. 103–107.
4. **Iqbal M.A., Rai S., Sadique M.R., Bhargava P.** Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 243. P. 321–335.
5. **Sadique M.R., Iqbal M.A., Bhargava P.** Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash // Nuclear Engineering and Design. 2013. Vol. 260. P. 30–46.
6. **Duc-Kien Thai, Seung-Eock Kim.** Safety Assessment of a Nuclear Power Plant Building Subjected to an aircraft Crash // Nuclear Engineering and Design. 2015. Vol. 293. P. 38–52.
7. **Kostov M., Henkel F.O., Andonov A.** Safety assessment of A92 reactor building for large commercial aircraft crash // Nuclear Engineering and Design. 2014. Vol. 269. P. 262–267.
8. **Siefert A., Henkel F.O.** Nonlinear analysis of commercial aircraft impact on a reactor building — Comparison between integral and decoupled crash simulation // Nuclear Engineering and Design. 2014. Vol. 269. P. 130–135.

9. **Бирбраер А.Н., Шульман С.Г.** Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. М.: Энергоатомиздат, 1989. 304 с.
10. **Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.** Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
11. **Саргсян А.Е.** Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций: монография / ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Саров, 2013. 550 с.
12. **Беляев А.К.** Термодинамический подход к вычислению высокочастотных вибраций АЭС // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2012. № 1. С. 33–38.
13. **Schalk M., Wolfel H.** Response of equipment in nuclear power plants to airplane crash // Nuclear Engineering and Design. 1976. Vol. 38. Issue 3. P. 567–582.
14. **Казарин А.М., Молчанов А.В., Ершов Г.А.** Современная АЭС — требования и пути реализации // Сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск [Эл. ресурс] URL: [www.gidropress.podolsk.ru/filles/proceeding/mutk2015/.../mntk2015-009.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/filles/proceeding/mutk2015/.../mntk2015-009.pdf). Дата обращения: 07.11.2017, 2015.
15. **Буторин С.Л., Дмитриев А.С., Малов М.Ю., Сафутин В.Д.** Защитная оболочка реакторного отделения энергоблока с РУ МКЭР-1000 // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2000. Т. 237. С. 168–173.
16. **Augusti G., Baratta A., Casciatti F.** Probabilistic Methods in Structural Engineering. London: Chapman Hall, 1984. 549 p.
17. **Birbraer A.N., Roleder A.J., Arhipov S.B.** Probabilistic Assessment of NPP Building Vibrations Caused by Aircraft Impact. Paper No 1645 // Trans. 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16), Washington DC, 2001.
18. **Баженов В.Г. [и др.].** Численный анализ деформирования заглубленных трубопроводов системы охлаждения атомных станций при падении самолета / В.Г. Баженов, А.А. Артемьева, А.И. Кибец, ЮИ. Кибец, И.А. Фролова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1–3. С. 70–76.
19. **Афромеев Е.В., Хиблин И.Н., Рузаков А.Ю., Красова Н.А.** Математическое моделирование оборудования системы управления и защиты АЭС и его испытания на воздействия от удара самолета и воздушной волны // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 129. № 4. С. 49–54.
20. **Канунникова Е.А., Красова Н.А., Мещин И.А.** Формирование ударных импульсов по заданным спектрам ответа для испытания оборудования // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 130. № 5. С. 33–38.
21. **Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А.** Спектральный анализ сейсмических колебаний // Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2015. Т. 58, № 11. С. 1009–1016.
22. **Бирбраер А.Н., Лалин В.В., Чернуха Н.А.** Вероятность случайного и преднамеренного падения самолета на ответственные за безопасность сооружения АЭС // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 2. С. 17–24.
23. **Чернуха Н.А.** Вероятность падения самолета на АЭС, расположенную вблизи трассы полетов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. № 3. С. 21–30.
24. **Wolf J.P., Bucher K.M., Skrikerud P.E.** Response of Equipment to Aircraft Impact // Nuclear Engineering and Design. 1978. Vol. 47. Issue 1. P. 169–193.
25. **Бирбраер А.Н., Сазонова Ю.В.** Вклад высших мод в динамический отклик конструкций на высокочастотные воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6. С. 22–27.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЧЕРНУХА Никита Антонович** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: [chernukha.n@mail.ru](mailto:chernukha.n@mail.ru)

**ЛАЛИН Владимир Владимирович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: [vlalin@yandex.ru](mailto:vlalin@yandex.ru)

**БИРБРАЕР Адольф Никитич** — кандидат технических наук, АО «АТОМПРОЕКТ».

E-mail: [birbraer2009@yandex.ru](mailto:birbraer2009@yandex.ru)

#### REFERENCES

- [1] **Zhirkova Ye.O.** Nadezhnost i bezopasnost — osnovnyye trebovaniya v razvitií atomnoy energetiki [Reliability and safety — the main requirements in the development of nuclear energy]. *Transportnoye delo Rossii*. 2010. No 12. S. 155–157. (rus)
- [2] **Kuznetsov N.S., Smogunov V.V.** Nadezhnost atomnykh stantsiy pri bombardirovke kosmicheskimi obyektami [Reliability of nuclear power plants when bombarded with space objects]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost i kachestvo*. 2011. Vol. 1. S. 48–53. (rus)

- [3] **Sedykh N.A.** Problemy bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy [Problems of safety of nuclear power plants]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskkiye sredstva pro-tivodeystviya terrorizmu*. 2014. No 1–2. S. 103–107. (rus.)
- [4] **Iqbal M.A., Rai S., Sadique M.R., Bhargava P.** Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 243. P. 321–335.
- [5] **Sadique M.R., Iqbal M.A., Bhargava P.** Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 260. P. 30–46.
- [6] **Duc-Kien Thai, Seung-Eock Kim.** Safety Assessment of a Nuclear Power Plant Building Subjected to an aircraft Crash. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. Vol. 293. P. 38–52.
- [7] **Kostov M., Henkel F.O., Andonov A.** Safety assessment of A92 reactor building for large commercial aircraft crash. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 269. P. 262–267.
- [8] **Siefert A., Henkel F.O.** Nonlinear analysis of commercial aircraft impact on a reactor building — Comparison between integral and decoupled crash simulation. *Nuclear Engineering and Design*. 2014. Vol. 269. P. 130–135.
- [9] **Birbraer A.N., Shulman S.G.** Prochnost i nadezhnost konstruksiy AES pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Strength and reliability of NPP structures under special dynamic actions]. M.: Energoatomizdat, 1989. 304 p. (rus.)
- [10] **Birbraer A.N., Roleder A. Yu.** Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya [Extreme actions on structures]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 594 p. (rus.)
- [11] **Sargsyan A. Ye.** Dinamika i seysmostoykost sooruzheniy atomnykh stantsiy [Dynamics and seismic stability of structures of nuclear power plants] / FGUP «RFYaTs-VNIIEF». Sarov, 2013. 550 p. (rus.)
- [12] **Belyayev A.K.** Termodinamicheskii podkhod k vychisleniyu vysokochastotnykh vi-bratsiy AES [Thermodynamic approach to the calculation of high-frequency vibrations of nuclear power plants]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomich-eskogo sotrudnichestva*. 2012. No 1. S. 33–38. (rus.)
- [13] **Schalk M., Wolfel H.** Response of equipment in nuclear power plants to airplane crash. *Nuclear Engineering and Design*. 1976. Vol. 38. Issue 3. P. 567–582.
- [14] **Kazarin A.M., Molchanov A.V., Yerшов G.A.** Sovremennaya AES — trebovaniya i puti realizatsii [Modern NPP — requirements and ways of realization]. [Elektronniy resurs] URL: [www.gidropress.podolsk.ru/files/proceeding/mutk2015/.../mntk2015-009.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceeding/mutk2015/.../mntk2015-009.pdf). Дата обращения: 07.11.2017. *Sbornik trudov 9-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER»*. Podolsk: 2015. (rus.)
- [15] **Butorin S.L., Dmitriyev A.S., Malov M. Yu., Safutin V.D.** Zashchitnaya obolochka reaktornogo ot-deleniya energobloka s RU MKER-1000 [Containment of the reactor of the power unit with MKER-1000]. *Iz-vestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneyeva*. 2000. Vol. 237. S. 168–173. (rus.)
- [16] **Augusti G., Baratta A., Casciatti F.** Probabilistic Methods in Structural Engineering. London: Chapman Hall, 1984. 549 p.
- [17] **Birbraer A.N., Roleder A.J., Arhipov S.B.** Probabilistic Assessment of NPP Building Vibrations Caused by Aircraft Impact. Paper No. 1645. *Trans. 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16)*. Washington DC, 2001.
- [18] **Bazhenov V.G., Artemyeva A.A., Kibets A.I., Kibets Yu I., Frolova I.A.** Chislennyy analiz deformirovaniya zaglublennykh truboprovodov sistemy okhlazhdeniya atomnykh stantsiy pri padenii samoleta [Numerically analyzing the deformation of submerged pipelines of an atomic power plant cooling system in the event of an aircraft crash]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013. № 1–3. S. 70–76. (rus.)
- [19] **Afromeyev Ye.V., Khiblin I.N., Ruzakov A. Yu., Krasova N.A.** Matematicheskoye modelirovaniye oborudovaniya sistemy upravleniya i zashchity AES i yego ispytaniya na vozdeystviya ot udara samoleta i vozdushnoy volny [Mathematical modeling of the equipment of the NPP control and protection system and its testing for impacts from an airplane and air shock wave]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*. 2012. Vol. 129. № 4. S. 49–54. (rus.)
- [20] **Kanunnikova Ye.A., Krasova N.A., Meshchikhin I.A.** Formirovaniye udarnykh impulsov po zadannym spektram otveta dlya ispytaniya oborudovaniya [The formation of shock pulses from the given response spectra for testing equipment]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*. 2012. Vol. 130. № 5. S. 33–38. (rus.)
- [21] **Nizomov D.N., Kalandarbekov I., Khodzhiboyev A.A.** Spektral'nyy analiz seysmicheskikh kolebaniy [Spectral analysis of seismic vibrations]. *Doklady akademii nauk Respubliki Tadjikistan*. 2015. Vol. 58. № 11. S. 1009–1016. (rus.)
- [22] **Birbraer A.N., Lalin V.V., Chernukha N.A.** Veroyatnost sluchaynogo i prednamerennogo padeniya samoleta na ot-vetstvennyye za bezopasnost sooruzheniya AES [Probability of Accidental and Intentional Aircraft Fall on NPP Safety Related Structures]. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*. 2017. № 2. S. 17–24. (rus.)
- [23] **Chernukha N.A.** Veroyatnost padeniya samoleta na AES, raspolozhennuyu vblizi trassy poletov [Probability of Aircraft Fall on NPP, Situated near Flight Route]. *Seysmostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*. 2017. № 3. S. 21–30. (rus.)



[24] **Wolf J.P., Bucher K.M., Skrikerud P.E.** Response of Equipment to Aircraft Impact. Nuclear Engineering and Design. 1978. Vol. 47. Issue 1. S. 169–193.

[25] **Birbraer A.N., Sazonova Yu.V.** Vklad vysshikh mod v dinamicheskiy otklik konstruktsiy na vysoko-

chas-totnyye vozdeystviya [Input of high modes in dynamic response of structures subjected to high frequency loads].

*Stroitel'naya mekhanika i raschet sooru-zheniy*. 2009. № 6. S. 22–27. (rus.)

#### AUTHORS

**CHERNUKHA Nikita A.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: chernukha.n@mail.ru

**LALIN Vladimir V.** — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university.*

E-mail: vllalin@yandex.ru

**BIRBRAER Adolf N.** — *JSC «ATOMPROEKT».*

E-mail: birbraer2009@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 3 сентября 2017 г.