

ББК НЭЭ1.18647 + НЭЭ1.38647 + Б18
УДК 624/042.3(076.5)

В.Г. Ширшов

РАСЧЕТ РИСКОВ ОТКАЗОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Разработана методика оценки рисков проявления неблагоприятных факторов, возникающих при падении воздушного судна на строительные конструкции. Предлагаемый подход позволит более точно оценить риски разрушения строительных конструкций ответственного объекта, исходя из его конструктивно-технологических особенностей и реальной воздушной обстановки в зоне расположения объекта.

Среди огромного количества зданий и сооружений различного технологического и функционального назначения можно выделить ту их часть, которая характеризуется как объекты повышенной социальной ответственности или ответственные объекты. Основной отличительной особенностью указанной группы зданий является предъявление исключительно высоких требований к надежности их функционирования. К ответственным объектам можно отнести атомные электростанции, гидротехнические сооружения, объекты нефтяной и химической промышленности, нефте- и газопроводы и т.п.

Сбои и нарушения регламента эксплуатации этих объектов приводят к экономическим и социальным потерям на территориях, во много раз больших размеров самих зданий или сооружений. Поэтому при проектировании ответственных объектов принимаются во внимание динамические воздействия весьма редкой повторяемости, отличающиеся, как правило, большой интенсивностью. Динамические воздействия на здания и сооружения подразделяются на следующие основные группы.

1. Воздействия, связанные с эксплуатацией самих объектов. Примером могут служить нагрузки на строительные конструкции и оборудование, возникающие при разрыве технологических трубопроводов, падении тяжелого оборудования и т.п.

2. Воздействия, связанные с деятельностью человека за пределами ответственного объекта. К этой группе относятся взрывные и сейсмозврывные воздействия, источниками которых могут быть близко расположенные взрывоопасные предприятия, хранилища и транспорт жидкого и газообразного топлива, авиационные катастрофы, в результате которых на здания и сооружения может упасть воздушное судно или его обломки, падение потерявшей управление ракеты, космического корабля и т.п.

3. Воздействия, связанные со стихийными явлениями: землетрясениями, ураганами, наводнениями, а для сооружений, расположенных на берегах крупных водоемов (морей, озер, водохранилищ), – воздействия волн значительной амплитуды (ветровых, селевых, цунами), что может, в частности, привести к возникновению неблагоприятного гидравлического режима в системе технического водоснабжения зданий.

Необходимость учета в проекте особых воздействий оценивается на основе анализа расположения потенциальных источников опасности и/или частоты возможных опасных событий.

Первый способ оценки заключается в установлении для каждого особого воздействия так называемого значения величины дистанции отбора (ВДО), представляющего собой наибольшее расстояние от объекта, в пределах которого данное воздействие может представлять опасность. Если все потенциальные источники воздействия лежат за пределами ВДО, оно может не учитываться в проекте.

Другой способ оценки применяется, когда может быть установлена вероятность реализации событий. Значение вероятности, до которого данное событие может не учитываться в проекте, например, атомной станции (АС), называется уровнем отбора по вероятности (УОВ). Другой уровень вероятности, начиная с которого событие обязательно должно учитываться в проекте, называется значением величины вероятности, закладываемым в проект (ВВЗП). Обычно оно примерно на порядок больше, чем УОВ. Если вероятность реализации воздействия лежит между УОВ и ВВЗП, то решение о необходимости учета данного события принимает регулирующий орган.

С учетом назначения и характера элементов, составляющих ответственный объект, к ним могут предъявляться самые различные технические, экономические и другие требования (работоспособность, прочность, герметичность и т.п.), которые определяют масштабы инженерного риска, т.е. требуемый уровень прочности и надежности. Это в равной степени относится и к принятию проектных решений, и к оценке рисков функционирования эксплуатируемых объектов.

Однако для строительных конструкций понятие "надежность" в более узком понимании может трактоваться как способность конструкции работать в течение определенного времени без отказа. При этом отказ определяется как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния; с другой стороны, для сооружений отказ трактуется как случайное событие в работе конструкции, последствием которого являются экономические или социальные потери (в том числе, связанные с возможностью травм и человеческих жертв). Важный показатель надежности – вероятность безотказной работы. Предполагается, что данный термин трактуется как вероятность непревышения некоторого предельного состояния (вероятность невыхода конструкции в пространстве состояний за выбранные предельные состояния).

Для оценки надежности сложных инженерных сооружений, конструкций, оборудования применяются в основном расчетно-теоретические методы, использующие статистические данные о параметрах воздействий, свойствах материалов, характере отказов различной степени тяжести. Таким образом, объединение методов расчета сооружений и оснований с методами теории вероятностей составляет основу теории надежности ответственных объектов. Обеспечение безопасности их функционирования – составная часть теории надежности. Под безопасностью понимается надежность объекта по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды. В частности, для АС требуется обеспечение радиационной и ядерной безопасности. Для сооружений, конструкций, грунтовых оснований условия безопасной работы считаются идентичными условиям ненаступления предельных состояний, регламентируемых нормативными документами.

Методы оценки надежности строительных конструкций развивались самостоятельно и поэтому отличаются от принятых подходов в оценках надежности механизмов, машин или электротехнического оборудования. Поскольку при проведении анализа надежности, как правило, отсутствует этап опытно-

конструкторской отработки сооружения в целом и при применении вероятностных методов, предполагается, что законы распределения случайных факторов, учитываемых при расчете, известны заранее. Отсутствует также возможность исследования фактических законов распределения случайных факторов, характеризующих условия работы сооружения.

В современной теории надежности строительных конструкций можно выделить два основных направления. При рассмотрении первого из них (более раннего) используется аппарат случайных величин и их функций, фактор времени в явном виде обычно не учитывается, рассматриваются элементарные модели отказов, что приводит к существенному упрощению вычислений и требует относительно ограниченного объема исходной информации. Практически это сводится к использованию существующей методологии предельных состояний при вероятностной трактовке исходных параметров и результатов расчета.

При использовании второго подхода принимается во внимание более общая постановка задачи с введением фактора времени, что существенно приближает используемые математические модели к реальным условиям работы объекта, но требует более сложного аппарата (используется теория случайных чисел и полей) и большого объема исходной информации.

Следует заметить, что расчеты строительных конструкций на надежность долгое время не имели единого общепринятого содержания, нередко под этим подразумевались обычные расчеты на прочность, устойчивость и т.п.

Рассмотрим две основные схемы оценки прочности и надежности строительных конструкций при действии нагрузок самого различного назначения.

Традиционная (детерминистическая по форме) схема, положенная в основу нормативных расчетов, базируется на основе системы коэффициентов, в той или иной мере учитывающих случайные и неопределенные факторы (вариабельность нагрузок, деформационных и прочностных характеристик материала, условность расчетных схем, степень ответственности сооружения и т.п.). При таком подходе общее условие неперевышения предельного состояния (по прочности, устойчивости и т.п.) может быть записано в виде:

$$F\left(\gamma_f F_n, \frac{R_p}{\gamma_m}, \gamma_n, \gamma_d, \dots\right) \geq 0,$$

где $\gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_d$ – коэффициенты надежности по нагрузке, материалу, назначению конструкции, условиям работы; F_n – нагрузка; R_p – прочность материала.

Кроме того, при действии на конструкцию нескольких нагрузок вводятся коэффициенты сочетаний нагрузок (меньше 1,0), учитывающие уменьшение вероятности одновременного проявления нескольких нагрузок.

Альтернативной является схема теории надежности, рассматривающая нагрузки, деформационные и прочностные характеристики материала как случайные величины (процессы, поля) и позволяющая методами теории вероятностей определять надежность строительных конструкций, т.е. вероятность того, что заданные параметры системы (напряжения, смещения, углы поворотов и т.п.) не выйдут за некоторые предельные значения или вероятность того, что не наступит предельное состояние. В случае элементарной модели отказа, когда условие прочности формулируется в виде:

$$F(R, Q) > 0, \quad (1)$$

где R и Q – обобщенные значения прочности и нагрузки (случайные величины), вероятность отказа определяется выражением

$$V = \int_{-\infty}^0 p_F(x) dx = P_F(x)|_{x=0},$$

где $p_F(x)$, $P_F(x)$ – соответственно плотность и интегральный закон распределения F .
Условие (1) можно также представить в виде:

$$F = R - Q > 0.$$

Если при этом в первом приближении считать, что R и Q распределены по нормальному закону, то и F также нормально распределенная случайная величина, тогда:

$$V = 0,5 - \Phi(\gamma),$$

где $\Phi(\gamma)$ – интеграл вероятности; $\gamma = \frac{m(F)}{\sigma(F)}$, $m(F)$, $\sigma(F)$ – математическое ожидание и стандарт F .

В более общем случае R и Q могут представлять собой случайные функции (времени, координат); модели отказа могут быть многомерными.

Общая схема оценки надежности конструкций при динамических воздействиях включает следующие основные этапы:

- определение на основе имеющейся информации вероятностных характеристик воздействия на конструкции;
- построение математической модели (расчетной схемы) сооружения;
- решение задачи статической динамики (статики при квазистатическом подходе);
- выбор пространства качества и области допустимых (допредельных) состояний системы;
- выбор нормативной надежности на основе технических, экономических и иных требований
- определение надежности как вероятности пребывания в допустимой области соответствующих элементов пространства качества.

Применение теории случайных процессов для описания динамических воздействий во многих случаях приводит к значительным и громоздким выкладкам. Это обстоятельство приводит к необходимости искать приближенные способы описания случайного характера воздействий и описания надежности строительных конструкций, более простые с точки зрения практического использования. Возможны несколько подходов.

Первый из них основывается на том, что во многих случаях расчет строительных конструкций и оборудования на динамические нагрузки выполняется в рамках статических и квазистатических подходов, т.е. когда динамическая нагрузка заменяется иной, в некотором смысле «эквивалентной», статической нагрузкой путем введения соответствующих «коэффициентов динамичности». Такой прием во многих случаях протестирован на практике при сооружении объектов разной степени ответственности и положен в основу нормативных расчетов. По такой методике случайный процесс (воздействие) заменяется случайной величиной «эквивалентная статическая нагрузка».

Таким образом, оценка надежности строительных конструкций объекта проводится в рамках существующей методологии предельных состояний при вероятностной трактовке исходных параметров и результатов расчета на уровне случайных величин и их функций.

Другой подход применительно к различным нагрузкам, являющимся случайными функциями времени, основан на следующих положениях. Многие нагрузки в отдельные короткие интервалы времени резко увеличивают свою интенсивность. Эти пиковые значения нагрузок (перегрузки), определяющие отказ строительной конструкции, и предполагается ввести в расчет. Поэтому непрерывную случайную величину следует приближенно представить в виде импульсов нагрузки

(перегрузки), характеризующихся случайной длительностью Δ и появляющихся через случайные промежутки времени t . Длительность Δ зависит от интенсивности нагрузки q , вызывающей отказ. Если нагрузка представляет собой непрерывный случайный процесс, пиковой нагрузкой являются выбросы за некоторый уровень q , от которого зависят распределения случайных интервалов t и длительностей Δ . Вероятность возникновения перегрузки в любой момент времени

$$a = \frac{\Delta}{t};$$

где Δ и t – математические ожидания $\bar{\Delta}$ и \bar{t} .

Если задан срок службы объекта T , то задача заключается в определении вероятности возникновения перегрузок и вызываемых ими отказов в течение этого срока. Вероятность появления перегрузки хотя бы один раз в течение времени T

$$P = 1 - \left(1 - \frac{\Delta}{t}\right)^{\frac{T}{\Delta}},$$

а при малых значениях вероятности –

$$P \approx \frac{T}{t} = \frac{aT}{\Delta} \quad (t \gg T).$$

Ключевым вопросом является выбор нормативных значений для показателей надежности и безопасности объектов. Наиболее приемлемыми считаются следующие положения.

1. Назначение показателей надежности и безопасности на основе уровня, соответствующего статистическим данным для данной отрасли с повышением уровня надежности на полпорядка - порядок.

2. Назначение показателей надежности и безопасности на основе уровня, существующего в смежных отраслях.

На вопрос о том, как мала должна быть вероятность события, чтобы практически его можно было считать невозможным, нельзя дать общего ответа, потому что все зависит от того, насколько важно событие, о котором идет речь.

При рассмотрении в качестве события падение воздушного судна можно отметить, что вероятность данного события весьма мала, а возникающие при этом нагрузки на строительные конструкции и оборудование ответственных объектов чрезвычайно большие и для их восприятия может потребоваться проведение значительных мероприятий, приводящих к заметному удорожанию объекта.

Вместе с тем учет вероятности данного события обязателен при нормативном проектировании АС в предположении, что воздействие обязательно реализуется за срок службы АС, причем самым неблагоприятным с точки зрения ее безопасности образом. В комплексе особых динамических воздействий (сейсмичность, взрывная волна, ветровые нагрузки), рассматриваемых при расчете строительных объектов, процесс соударения падающего воздушного судна с конструкциями и элементами оборудования является наименее изученным.

Риск функционирования ответственного объекта при анализе последствий падения воздушного судна – комплексная характеристика, определяющая уровень безопасности объекта и его элементов, предполагает оценку прочности и надежности строительных конструкций и оборудования и включает следующие аспекты.

1. Изучение вероятности падения и определение аварийной конфигурации воздушного судна.
2. Анализ динамического взаимодействия падающего тела воздушного судна со строительными конструкциями и определение расчетной нагрузки.
3. Исследование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций и элементов оборудования в различных вероятностных моделях воздействий и работы конструкций.

Вероятность падения воздушного судна напрямую связана с уровнем безопасности воздушного движения (безопасности полетов). Под уровнем безопасности полетов понимается вероятность того, что при производстве полета на борту воздушного судна не возникнет катастрофическая ситуация, а используемый на практике и в нормативных документах показатель – вероятность возникновения катастрофической ситуации оценивается для воздушного судна по принятым критериям и методам их количественной оценки.

Уровень безопасности воздушного движения в районе расположения ответственного объекта может оцениваться в соответствии с нормативными документами при подходе как по ВДО, так и по УОВ.

Согласно нормам проектирования, отказ строительных конструкций объекта может произойти в результате разрушения по нормальному или наклонному сечению или в виде продавливания (достижения предельного состояния), причем эти события рассматриваются как независимые. Тогда критерий отказа строительных конструкций примет вид:

$$M_{\max}^{(x,y)} \geq [M^{(x,y)}] \cup Q_{\max}^{(x,y)} \geq [Q^{(x,y)}] \cup N \geq [N], \quad (2)$$

где $M_{\max}^{(x,y)}$, $Q_{\max}^{(x,y)}$ – максимальные усилия в сечениях, параллельных осям OX и OY при приложении нагрузки в различные точки конструкции (максимум берется по всем сечениям и всем точкам приложения нагрузки); $[M^{(x,y)}]$, $[Q^{(x,y)}]$, $[N]$ – допускаемые значения усилий, определенные по нормативным документам; N – расчетная сила продавливания.

Будем считать, что при выполнении соответствующего условия из неравенств (2) вероятность данного вида отказа (P_M , P_Q , P_N) равна единице, в противном слу-

чае – нулю. Вероятность отказа конструкции с учетом всех возможных видов разрушения:

$$P(D_i / \gamma) = 1 - (1 - P_M) (1 - P_Q) (1 - P_N). \quad (3)$$

Левые части неравенств (2) зависят от угла приложения нагрузки γ и для каждого из видов отказа можно найти предельное значение этого угла, до которого возможен отказ:

$$\cos \gamma^{(M)} = \frac{[M^{(x,y)}]}{M_{\max}^{x,y}}; \quad \cos \gamma^{(Q)} = \frac{[Q^{(x,y)}]}{Q_{\max}^{x,y}}; \quad \cos \gamma^{(N)} = \frac{[N^{(x,y)}]}{N_{\max}^{x,y}}.$$

Очевидно, что

$$P(D_i / \gamma) = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \leq \gamma'; \\ 0 & \text{при } \gamma > \gamma', \end{cases}$$

где $\gamma = \max(\gamma^{(M)}, \gamma^{(Q)}, \gamma^{(N)})$; γ' – угол приложения нагрузки.

Вероятность отказа определяется по формуле (3) при подстановке значения $\gamma = \max(\gamma^{(M)}, \gamma^{(Q)}, \gamma^{(N)})$:

$$P = \gamma_i (A_i \gamma_i^2 + B_i \gamma_i + C_i) F_i \tau,$$

где A_i, B_i, C_i – коэффициенты, зависящие от ее формы и положения в пространстве площади конструкции; F_i – площадь конструкции.

Более точную оценку значения вероятности отказа можно получить, если считать случайным не только угол падения, но и место соударения воздушного судна с конструкцией. При такой постановке задачи критерий отказа (2) относится к каждой конкретной (j -й) точке удара (под которой понимается точка приложения равнодействующей нагрузки с координатами x_i, y_i). Соответственно этому усилия $M^{(x,y)}, Q^{(x,y)}, N$ также определяются при приложении нагрузки в эту точку, и ей же соответствуют предельные углы $\gamma^{(M)}, \gamma^{(Q)}, \gamma^{(N)}$ и их максимум γ_i . По значению величины γ_i определяется условная вероятность отказа:

$$dP(D_i / x_i, y_i) = P(D_i / x_i, y_i) dx dy.$$

Повторив эту процедуру для различных точек удара, можно найти зависимость вероятности отказа от координат точки $P(D_i / x, y)$. Полная вероятность отказа

$$P(D_i) = \iint_F P(D_i / x, y) dx dy,$$

где F – площадь конструкции.

Дальнейшее уточнение значения вероятности отказа достигается путем учета вероятностного разброса прочностных характеристик строительных материалов.

Стаття надійшла до редакції 23 грудня 1999 року.