

УДК 691.97

Зиннуров Т.А. – кандидат технических наук, ассистент

E-mail: leongar@mail.ru

Майстренко И.Ю. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Проектирование башенных сооружений с учётом требуемого уровня безопасности

Аннотация

Метод предельных состояний, используемый в расчётах строительных конструкций, обладает некоторыми недостатками: 1) отсутствием возможности проектировать конструкцию с требуемым уровнем надёжности; 2) использованием при расчете конструкции только двух групп предельных состояний. В статье анализируются данные недостатки и предлагается способ проектирования башенного сооружения с требуемым уровнем безопасности на основе применения численных вероятностно-статистических методов.

Ключевые слова: надёжность, безопасность, вероятностно-статистические методы, башенные сооружения, предельные состояния.

Введение

С 1955 года по настоящий день для технического расчёта строительных конструкций зданий и сооружений в большинстве стран мира применяется метод предельных состояний. Этот метод предполагает использование коэффициентов надёжности, ответственности, условия работы, которые обладают полувероятностной природой, и двух групп предельных состояний. Он не всегда является универсальным инструментом для решения задач. Во-первых, в методе предельных состояний априори заложен определенный уровень надёжности, согласно которому подбираются сечения элементов и назначаются конструктивные решения. Однако для проектировщика всегда остается загадкой, насколько надёжно спроектирована конструкция.

Например, если рассматривать надёжность железобетонных и металлических элементов конструкции, то она будет отличаться из-за различия в коэффициентах надёжности по материалу [2].

Во-вторых, количество предельных состояний ограничено до двух, что не всегда даёт полноценную картину о работе конструкции. Разговоры о создании третьей группы предельных состояний ведутся уже давно. В частности, Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. [6] предлагают перенести из первой группы в третью воздействия аварийного типа (сейсмические воздействия, пожары, взрывы и т.д.), а также некоторые запроектные величины расчётных значений основных нагрузок. Большинство представленных факторов являются причинами повреждений, что недопустимо самим понятием безотказности конструкции.

Обратимся к формулировке предельных состояний [1]. Предельные состояния подразделяются на две группы:

- первая группа включает предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом;

- вторая группа включает предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций (оснований) или уменьшающие долговечность зданий (сооружений) по сравнению с предусматриваемым сроком службы.

В приведённом выше определении первой группы предельных состояний прослеживается неоднозначность, то есть предельное состояние наступает, когда конструкция не пригодна к эксплуатации или полностью или частично потеряла несущую способность. Если потерю несущей способности можно назвать чрезвычайной ситуацией, при которой возникают человеческие жертвы, то непригодность к эксплуатации – это следствие наличия деформаций в конструкции, влияющих на её работоспособность. При этом зданию или сооружению не даётся оценка с точки зрения безопасности. Одним из примеров таких сооружений служат башни. Если конструкция расположена в населённом

пункте, то главным показателем конструктивной безопасности является сохранность человеческой жизни, наибольшую опасность они вызывают в зоне возможного обрушения.

Основные положения по оценке безопасности башенных сооружений

Проанализируем основные аспекты метода предельных состояний на примере расчёта башенных сооружений. Отметим, что критерии первой группы предельных состояний не допускают малейших пластических деформаций, которые могут привести к изменению положения конструкции в пространстве. В связи с этим в расчёте на прочность и устойчивость элементов пространственной решётки башенного сооружения за расчётное сопротивление принимается значение предела текучести стали, то есть работа элементов в пластической стадии практически не учитывается. Это условие действует как для статически определимых конструкций, так и для статически неопределимых конструкций, где возможно перераспределение усилий за счёт развития пластических деформаций. Вопрос о надёжности конструкции башенного сооружения за рамками предела текучести остаётся открытым.

В Республике Татарстан насчитывается около 500 башенных сооружений. Обследование их небольшой части, проведённое сотрудниками КГАСУ, показало, что по физическому состоянию и расположению башенные сооружения можно разделить на две группы. Первую группу составляют башенные сооружения сотовых операторов и группы компаний ВГТРК, они расположены вдоль главных автомагистралей и в небольших поселениях. Состояние таких сооружений в большинстве случаев нормальное или работоспособное, что доказывает проведение периодических осмотров и ремонта. Вторая группа включает в себя башенные сооружения, расположенные на территории предприятий или складов, они обычно не используются по прямому назначению, так как их состояние чаще всего оценивается как неработоспособное или аварийное, и они имеют некоторые повреждения [3]. Всегда существует опасность обрушения таких конструкций. Конечно, можно надеяться на их высокий запас прочности, закладываемый при проектировании, но альтернативой такому наивному решению является обеспечение требуемого уровня надёжности.

Существуют несколько подходов назначения необходимого уровня надёжности конструкции. Требуемый уровень надёжности может быть назначен из соображений: приемлемой вероятности гибели людей или экономических затрат на строительство, по сравнению с ремонтными работами.

Первый подход заключается в сравнении количества отказов сооружения с частотой несчастных случаев. По данным различных источников [7, 8], вероятность отказа изменяется от $4,4 \cdot 10^{-7}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$ в год и соответствует крайне редким событиям (пожары, природные и техногенные катастрофы и т.п.).

Второй подход в назначении вероятности отказа предусматривает определение его величины с экономической точки зрения. Суть метода в том, что чем дешевле стоимость конструкции, тем ниже уровень ее надёжности, то есть нужно найти компромисс между затратами на строительство башенного сооружения и затратами на его восстановление при отказе.

Область применения метода ограничивается рамками критериев возможной дальнейшей эксплуатации и нормальной эксплуатации башенного сооружения. Конечно, желание заказчика снизить затраты на строительство позволит ему руками проектировщика варьировать такими параметрами, как форма башни, марка стали, схема решётки, но любое желание должно быть ограничено установленными требованиями в виде уровня надёжности по критерию безопасности.

Введем нормативный показатель вероятности отказа сооружения при оценке по критерию безопасности, изменяющийся в соответствии с первым подходом в пределах от $4,4 \cdot 10^{-7}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$ в год.

В таблице 1 представлены критерии, условия и уровень требуемой надёжности, которые следует выполнять при расчёте конструкций башенных сооружений. Обозначение $R[\sigma_m]$ – расчётное сопротивление по пределу текучести является аналогом расчётного сопротивления стали R_y , и $R[\sigma_t]$ – расчётное сопротивление по временному сопротивлению является аналогом расчётному сопротивлению стали R_u , оба параметра обладают стохастической природой.

Таблица 1

Критерии, условия и уровень требуемой надёжности башенных сооружений

Критерий	Положения метода предельных состояний		Безопасность	
	Нормальная эксплуатация	Возможная дальнейшая эксплуатация	По прочности и устойчивости элементов	На опрокидывание
Показатель	По прогибам	По прочности и устойчивости элементов	По прочности и устойчивости элементов	
Условие	$f \leq [f]$	$\sigma \leq R[\sigma_m]$	$\sigma \leq R[\sigma_e]$	$M_{opr} \leq M_{yop}$
Уровень надёжности	На усмотрение заказчика	Зависит от уровня надёжности по критерию безопасности	Вероятность отказа от $4,4 \cdot 10^{-7}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$	

С применением вероятностно-статистических методов появляется возможность назначения требуемого уровня надёжности рассчитываемой конструкции. Этот метод подразумевает отход от традиционного понимания расчётных и нормативных значений нагрузок, сопротивления стали, он основан на учете случайной природы основных параметров. Варьируя периодом эксплуатации и количеством однотипных башенных сооружений, можно установить требуемый уровень надёжности [3].

На примере простейшей задачи в виде вертикального стержня покажем возможность использования численного вероятностного метода для нахождения требуемых размеров сечения с заданной надёжностью. За исходные данные задачи примем жестко защемлённый стержень высотой 6 метров, на который действует ветровая нагрузка q (рис. 1). Требуется назначить размеры сечения h и b с учётом требуемого уровня надёжности Q .

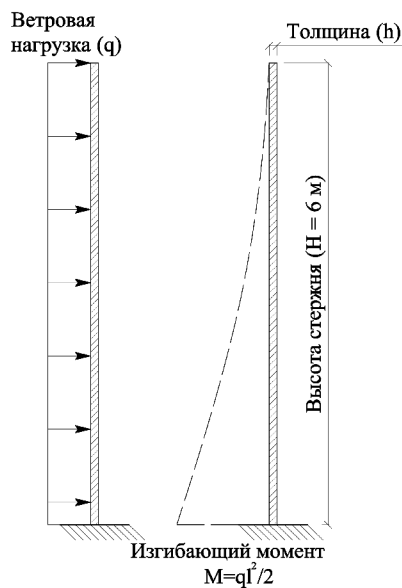


Рис. 1. Расчётная схема задачи

Из условия:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \frac{R}{\gamma_m} \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где $q = W \cdot b \cdot \gamma_f$; $M = \frac{q \cdot H^2}{2}$; $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$, γ_f – коэффициент надёжности по нагрузке, γ_m – коэффициент надёжности по материалу, γ_c – коэффициент условия работы, R – расчётное сопротивление, получаем, что размер сечения:

$$h \leq \sqrt{\frac{3 \cdot W \cdot \gamma_f \cdot \gamma_m \cdot H^2}{R \cdot \gamma_c}}. \quad (2)$$

В ходе эксперимента выполняется три вида численного моделирования с различным уровнем надёжности Q (0,99; 0,999; 0,9999; 0,99999). Уровень надёжности с показателем 0,99999 согласно таблице 1 является практически верхней границей по критерию безопасности, все остальные показатели предложены больше для наглядности результатов. В первом моделировании параметром для вариации была ветровая нагрузка, при этом использовался принцип генерации значений из [4, 5]. В ходе второго моделирования для генерации случайных значений вводился дополнительный параметр – временное сопротивление стали, и в третьем моделировании учитывалась стохастическая природа коэффициента условия работы [2, 3]. Каждая задача решалась 50 раз для получения стабильных результатов моделирования.

Сам процесс генерации статистических множеств параметров не является столь трудоемким и может быть выполнен инженером любой квалификации. Основная сложность заключается в сборе начальной информации о рассматриваемых параметрах в виде статистических данных. На начальном этапе моделирования устанавливается требуемая надёжность, относительно которой определяется количество испытаний. Например, при надёжности 0,999 отказу может быть подвержено лишь одно сооружение из 1000, значит, для каждого параметра генерируем числовое множество M_i случайных значений по заданному закону распределения, где $i = 1000$. Если генерируется несколько параметров, то производится автоматическая синхронизация по порядковому номеру i . Из общего числа случайных комбинаций выбирается наиболее неблагоприятная согласно условию (1), (2), для которого вычисляется значение h согласно формуле:

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot W_i(t) \cdot H^2}{R_i \cdot K_i}}, \quad (3)$$

где $W_i(t)$ – случайная реализация значения ветровой нагрузки за время t , R_i – случайная реализация значения временного сопротивления, K_i – случайная реализация значения коэффициента, учитывающего работу конструкции.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что с увеличением требуемого уровня надёжности происходит рост средних значений экстремумов скорости ветра за 25 лет (табл. 2).

Таблица 2

Основные результаты первого моделирования

Показатели	Уровень надёжности по критерию безопасности			
	0,99	0,999	0,9999	0,99999
Среднее значение экстремумов скорости ветра за 25 лет (м/с)	32,66	36,67	40,86	44,72
Средний уровень надёжности по критерию возможной дальнейшей эксплуатации	0,795	0,952	0,992	0,999

Следовательно, требуется увеличивать размеры сечения, чтобы обеспечить прочность под действием ветровой нагрузки (табл. 3). Вследствие роста надёжности с показателя 0,99 до 0,99999 размер h увеличится на 32,2 %. Результаты эксперимента также доказывают, что существует экспоненциальная зависимость между уровнем надёжности по критерию безопасности и критерию возможной дальнейшей эксплуатации (рис. 2). Однако, полученные значения не поддаются точной аппроксимации, так как с увеличением показателя надёжности получаем высокую плотность результатов. В итоге значение дисперсии результатов эксперимента и подобранной функции, согласно критерию максимального правдоподобия, выходит за рамки допустимого. Можно отметить, что рост надёжности по критерию возможной дальнейшей эксплуатации составил 26 %.

В случае реального проектирования в качестве h рекомендуется принимать максимальное его значение 2,2 см с надёжностью 0,99999, которое учитывает наиболее неблагоприятную комбинацию случайных величин.

В таблице 3 представлена интервальная оценка и среднее значение требуемых размеров сечения для обеспечения прочности на действие изгибающего момента при

различном уровне надёжности по итогам трёх моделирований. Если анализировать влияние количества введённых параметров, имеющих стохастическую природу, то заметен небольшой рост среднего значения величины h . Причиной роста значений является взаимодействие случайных величин, когда для наиболее неблагоприятного случая с максимальным значением наиболее весомой случайной переменной добавляются ещё несколько со значениями выше среднего.

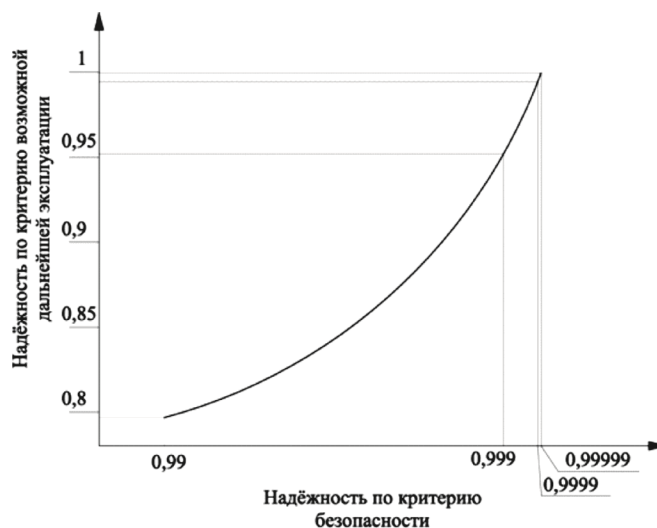


Рис. 2. Зависимость надёжности по критерию безопасности и критерию возможной эксплуатации

Таблица 3

Требуемые размер h поперечного сечения стержня

Номер моделирования	Размер h , (см)	Уровень надёжности по критерию безопасности			
		0,99	0,999	0,9999	0,99999
Первое	Интервал	1,3-1,6	1,4- 1,8	1,6-1,9	1,7-2,1
	Среднее значение	1,43	1,53	1,71	1,89
Второе	Интервал	1,2- 1,6	1,4-1,8	1,6-1,9	1,7- 2,1
	Среднее значение	1,43	1,56	1,72	1,89
Третье	Интервал	1,3-1,7	1,4-1,8	1,7-1,9	1,8-2,2
	Среднее значение	1,46	1,57	1,74	1,91

В формуле (1) параметр R – расчётное сопротивление стали зависит от критерия оценки. В качестве критерия по безопасности принимается временное сопротивление R_u , по возможности к дальнейшей эксплуатации принимается предел текучести стали R_y . Поэтому численным методом статистического моделирования было исследовано влияние различных марок стали на надёжность по критерию возможной эксплуатации при установленной надёжности 0,999 по критерию безопасности. Наибольший показатель надёжности по критерию возможной дальнейшей эксплуатации показала марка стали 10ХНДП (ГОСТ 19282-73*), в результате он увеличился на 3,8 %. Это объясняется тем, что соотношение между временным сопротивлением и сопротивлением по пределу текучести является наименьшим (табл. 4).

Таблица 4

Влияние марки стали на надёжность

Марка стали	ВСТ3сп5 (ГОСТ 380-71*)	09Г2С (ГОСТ 19282-73*)	10ХНДП (ГОСТ 19282-73*)
Соотношение R_u/R_y	1,57	1,42	1,36
Надёжность по критерию возможной эксплуатации	0,952	0,9805	0,9887

Проектирование башенных сооружений с заданной надёжностью использует аналогичный алгоритм статистического моделирования, изменения коснутся только формулы (3), которую заменят более сложные детерминированные зависимости перехода от нагрузок к усилиям и напряжениям.

Заключение:

1. Работу башенного сооружения следует оценивать по трём критериям: по возможной дальнейшей эксплуатации; по нормальной эксплуатации и по безопасности. При оценке безопасности учитывается работа элементов конструкции в пластической стадии до полного или частичного разрушения.

2. Целесообразно отказаться от полувероятностных коэффициентов: надёжности по нагрузке, надёжности по материалу, надёжности по ответственности и условию работы, а необходимо непосредственно задавать требуемый уровень надёжности и период эксплуатации башенного сооружения. Нормативный уровень надёжности в виде вероятности отказа, требуемый для безопасной эксплуатации, установить в интервале от $4,4 \cdot 10^{-7}$ до $1,2 \cdot 10^{-5}$. Для достижения поставленной цели применять статистически-вероятностные методы согласно схеме на рис. 3.



Рис. 3. Схема статистического моделирования

3. Увеличение уровня надёжности прямо пропорционально влечёт за собой рост нагрузок, следовательно, и увеличение размеров сечения. Уровень надёжности по критерию безопасности имеет экспоненциальную зависимость относительно надёжности по критерию возможной эксплуатации, поэтому, опираясь на минимальный показатель одного, всегда можно установить минимальный показатель другого. Чтобы дополнительно добиться увеличения показателя надёжности по критерию возможности к дальнейшей эксплуатации, нужно применять марки стали с наименьшим отношением временного сопротивления к сопротивлению по пределу текучести R_u/R_y .

Список библиографических ссылок

1. ГОСТ 27751-88*. Надёжность строительных конструкций и оснований. – М.: Стандартинформ, 2007. – 6 с.
2. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надёжности и безопасности строительных конструкций. – М.: АСВ, 2007. – 254 с.
3. Зиннуров Т.А. Оценка надёжности решётчатых башенных сооружений методом статистического моделирования // Автореферат канд. дисс. на соиск. степени канд. тех. наук. – Казань, 2013. – 23 с.
4. Зиннуров Т.А., Манапов А.З. Алгоритмы метода Монте-Карло для моделирования ветровой нагрузки на сооружения // Известия КГАСУ, 2010, № 1 (13). – С. 147-155.
5. Зиннуров Т.А., Манапов А.З. О влиянии количества однотипных сооружений и расчетного времени эксплуатации на ожидаемые максимальные реализации скорости ветра // Известия КГАСУ, 2011, № 2 (16). – С. 94-101.
6. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть строительных конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварийных ситуаций. // Металлические конструкции, 2009, № 1. – С. 59-71.

7. Кузеванов Д.В. Требуемый уровень надежности. // НИИЗНБ2.RU: публикации сотрудников, 2010. URL <http://www.niizhb2.ru/Article/A8-2.pdf> (дата обращения: 24.09.2013).
8. Michael H. Faber, Oliver Kubler, Mario Fontana, Marcus Khonbloch. Failure consequences and reliability acceptance criteria for exceptional building structures. Zurich, 2004 – 141 p.

Zinnurov T.A. – candidate of technical sciences, assistant

E-mail: leongar@mail.ru

Maystrenko I.Yu. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Tower structures design with the required level of security

Resume

The basic idea of the article is to use numerical probabilistic – statistical methods in designing of tower structures, because of the limitations of the limit states method. The first one does not give any information about reliability of designing building structure and in the second one – there are only two groups of limit states. Therefore, for reliability assessment it is proposed to input the third limit state where the tower structures will be calculated in terms of its safety for humans. The reliability level is limited by the security of not less than $1,2 \cdot 10^5$. Reliability for the first and the second group can set the customer himself.

The article generated by statistical modeling stochastic set of parameters (wind load, ultimate strength steel, yield stress of steel, coefficient of working conditions). Then analyzed the effect of these parameters on the cross section size of the tower construction elements, depending on the specific reliability level in the amount of: 0,99; 0,999; 0,9999; 0,99999.

The result of article is a new approach to the appointment of sectional dimensions to the required reliability level.

Keywords: reliability, security, statistical and probabilistic methods, tower structures, limit states.

Reference list

1. GOST 27751-88*. Reliability of structures and foundations. – M.: Standartinform, 2007. – 6 p.
2. Perelmuter A.V. Selected problems of building structures reliability and safety. – M.: Publishers ASV, 2007. – 254 p.
3. Zinnurov T.A. Reliability assessment of lattice tower structures using statistical modeling // The master's thesis author's abstract of competition of degree Can. Tec. Sci. – Kazan, 2013. – 23 p.
4. Zinnurov T.A., Manapov A.Z. Algorithms of Monte-Carlo method in wind action simulation on structure // News of the KSUAE, 2010, № 1 (13). – P. 147-155.
5. Zinnurov T.A., Manapov A.Z. About influence of similar constructions quantity and an estimated operation time on expected maximal wind velocity realizations // News of the KSUAE, 2011, № 2 (16). – P. 94-101.
6. Kudishin U.I., Drobot D.U. Building structures durability – an important factor in reducing the losses in terms of emergencies. // Metal structures, 2009, № 1. – P. 59-71.
7. Kusevanov D.V. The required level of reliability. // НИИЗНБ2.RU: staff publication, 2010. URL <http://www.niizhb2.ru/Article/A8-2.pdf> (reference date: 24.09.2013).
8. Michael H. Faber, Oliver Kubler, Mario Fontana, Marcus Khonbloch. Failure consequences and reliability acceptance criteria for exceptional building structures. Zurich, 2004. – 141 p.