

О назначении уровня надежности

Андрей И. Долганов, ООО «Сев. Р. Девелопмент», Москва, Россия
Александр В. Сахаров, ООО «Сев. Р. Девелопмент», Москва, Россия



Андрей И.
Долганов



Александр В.
Сахаров

Резюме. Проблема назначения оптимального уровня надежности существует давно и пока не решена. Отмечается ошибочность требований абсолютной надежности. Однако недостаточная надежность сооружений чревата большими социально-экономическими потерями. Поэтому возникает задача определения необходимого, оптимального уровня надежности. В РФ количественно значение надежности зданий и сооружений не регламентируется. В то же время сопротивление материалов железобетонных конструкций регулируются ГОСТ 34028–2016 для стержневой арматуры и ГОСТ 18105–2010 для бетона, а также строительными правилами СП 63.13330–2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Надежность строительной системы «Нагрузки – конструкция» в данной работе предлагается определять с учетом формулы полной вероятности. При этом принимается, что механические характеристики материалов конструкции и нагрузки являются независимыми и совместными случайными величинами: появление одной случайной величины не зависит от появления другой; изменение нагрузки изменяет напряжения в сечении конструкции. Исследования распределений случайных величин показали, что из-за их асимметрии они могут существенно отличаться от нормального распределения. Поэтому в данной работе распределения случайных величин аппроксимируются кривыми Пирсона, включающими в себя, как частный случай, распределения Гаусса. Вероятностные расчеты показали, что в течение 10 лет объекты, запроектированные по СП 38.13330.2012 для эксплуатации в Финском заливе, будут разрушены почти со 100% вероятностью. Для объектов нормального уровня ответственности (КС-2) требуемая надежность должна стремиться к 3σ (0,99865). Чтобы обеспечить требуемую надежность строительной системы примерно 3σ , следует стремиться к обеспеченности нагрузок 0,99865. Применение СП не всегда гарантирует требуемую надежность строительных объектов. Использование вероятностных подходов при решении инженерных задач может предотвратить появление чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: вероятность, здание, материалы, нагрузки, надежность, разрушение, сооружение, строительные правила, характеристики.

Формат цитирования: Долганов А.И., Сахаров А.В. О назначении уровня надежности // Надежность. 2018. Т. 18, № 3. С. 18–21. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-3-3-18-21

Проблема назначения оптимального уровня надежности существует давно и пока не решена [1]. Так, в 1890 г. вышел в свет русский вариант справочника Хютте [2] с развитой системой коэффициентов по надежности. В 1926 году проф. М. Майер опубликовал работу [3], в которой он критикует расчет по допускаемым напряжениям и предлагает рассчитывать конструкции из учета невыгодного сочетания нагрузок и сопротивлений материалов. В 1929 г. Н.Ф. Хоциалов [4] развил идеи М. Майера. Он, имея в виду стохастическую изменчивость механических и геометрических параметров конструкций, вместо лозунга «Строить без разрушений, во что бы то ни стало» предложил новый – «Строительство с целесообразным числом разрушений». Проектирование по мнению Н.Ф. Хоциалова должно вестись с учетом как капитальных затрат, так и вероятных «дефектных уклонений» и суммы убытков, наносимых государству аварией.

В 1945 году, в связи с разработкой новых норм расчета и проектирования, комиссией по унификации методов расчета, организованной Наркомтяжстроем, была принята условная схема расчетных коэффициентов, предложенная И.И. Гольденблатом, М.Г. Костюковским, А.М.

Поповым. По этой схеме общий коэффициент запаса зависел от коэффициентов однородности, перегрузок и условий работы конструкции. В дальнейшем предложенная схема вошла в метод расчета по предельным состояниям. Было принято, что конструкции должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям с разумной степенью риска.

Вопросы развития теории надежности строительных конструкций связаны с социально-экономическими вопросами. А.В. Геммерлингом [5] отмечается ошибочность требований абсолютной надежности. Он полагал, что какие бы методы расчета не применялись, реальные нагрузки и характеристики прочности всегда остаются случайными величинами или случайными функциями. Поэтому возникает задача определения необходимого уровня надежности.

А.Р. Ржаницын в своей работе [6] учитывает экономические принципы расчета на безопасность. Он определяет минимум математического ожидания затрат, связанных с возведением сооружения и возможными его повреждениями в течение заданного срока службы, то есть находит минимум функции:

$$R = C + V \cdot Y, \quad (1)$$

где C – первоначальная стоимость возведения сооружения; V – вероятность его повреждения; U – ущерб, вызываемый этим повреждением, включающий стоимость восстановления и убыток, нанесенный в результате нарушения процесса эксплуатации.

А.П. Синицин в своих работах отмечает нелинейную зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой и приводит статистические данные по величине риска в разных областях производства. По мнению А.П. Синицина [7], риск, характеризуемый числом 10^{-3} случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым. Уровень риска 10^{-4} требует принятия мер и может быть принят только в том случае, если нет другого выхода.

Для американских условий риск в автомобильных авариях достигает уровня $2,8 \times 10^{-4}$. Уровень риска 10^{-5} соответствует естественным случайным событиям, как, например, несчастные случаи при купании в море, для которых риск исчисляется $3,7 \times 10^{-5}$. Несчастные случаи, обусловленные риском 10^{-6} , относятся к такому уровню, на который реакция более спокойная, так как считается, что избежать этого риска может каждый, кто соблюдает элементарные правила предосторожности.

За рубежом [8] большое распространение получила формула нормирования вероятности отказа $Q(t)$:

$$Q(t) = 10^{-5} \xi_s T / L, \quad (2)$$

где ξ_s – коэффициент социальной значимости (таблица 1); T – расчетный срок эксплуатации в годах; L – среднее число людей, находящихся внутри сооружения или в непосредственной близости от него в течение периода, за который оценивается риск.

Таблица 1. Коэффициент социальной значимости ξ_s

Вид сооружения	ξ_s
Места собрания людей, плотины	0,005
Жилые, конторские, торговые и промышленные здания	0,05
Мосты	0,5
Башни, мачты, сооружения на морском шельфе	5

Для зданий нормального уровня ответственности требуемая надежность по (2) будет:

$$1 - Q(t) = 10^{-5} \times 0,5 \times 50 / 50 = 0,999995 \text{ или } 0,9^5.$$

Профессор Рюш (таблица 2) предлагает нормировать надежность $P(t)$ конструкций по вероятности их отказа $Q(t)$, где $Q(t) = 1 - P(t)$.

В РФ количественно значение надежности зданий и сооружений не регламентируется [9]. В то же время сопротивления материалов железобетонных конструкций регулируются ГОСТ 34028–2016 для стержневой арматуры и ГОСТ 18105–2010 для бетона, а также строительными правилами СП 63.13330–2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Согласно этим документам надежность (обеспеченность) нормативных сопротивлений материалов принята 0,95 ($1,64\sigma$), а обе-

Таблица 2. Нормирование надежности железобетонных конструкций

Вид и характеристика отказа	$Q(t)$
Отказ без предварительных сигналов (хрупкое разрушение, потеря устойчивости и т.п.)	$10^{-7} \dots 10^{-5}$
Потеря несущей способности с предварительным сигналом	10^{-4}
Непригодность к нормальной эксплуатации без потери несущей способности (подобно 2-й группе предельных состояний)	$10^{-3} \dots 10^{-2}$

спеченности расчетных сопротивлений материалов приближаются к 0,99865 (3σ): нормативные сопротивления делятся на коэффициенты надежности по материалам, которые больше 1. Следовательно, значение надежности $P(A \times B) = 0,99865$ (A, B – случайные события соответственно несущая способность конструкций и нагрузки) и следует назначать для конструкций зданий и сооружений нормального уровня ответственности.

Надежность строительной системы «Нагрузки – конструкция» определим по формуле полной вероятности (3). При этом принимаем, что механические характеристики материалов конструкции и нагрузки являются независимыми и совместными случайными величинами: появление одной случайной величины не зависит от появления другой; изменение нагрузки изменяет напряжения в сечении конструкции:

$$P(A \times B) = 1 - [P(A') + P(B') - P(A')P(B')], \quad (3)$$

где $P(A')$ и $P(B')$ вероятности противоположных событий A и B : $P(A') = 1 - P(A) = 1 - 0,99865 = 0,00135$, $P(B') = 1 - P(B) = 1 - 0,95 = 0,05$.

Подставим в формулу (3) известные значения и определим $P(A \times B)$:

$$P(A \times B) = 1 - (0,00135 + 0,05 - 0,00135 \times 0,05) = 0,94872.$$

Чтобы увеличить надежность системы примерно до 3σ , следует увеличить обеспеченность нагрузок, например, до 0,99865. Тогда надежность системы будет:

$$P(A \times B) = 1 - (0,00135 + 0,00135 - 0,00135 \times 0,00135) = 0,9973 \text{ или } 2,78\sigma.$$

Низкую обеспеченность ледовой нагрузки для Финского залива определяет, например, СП 38.13330.2012 [11]:

$$F_{c,p} = 1,26 \cdot 10^3 V h_d (m A k_b k_v R_c \rho \operatorname{tg} \gamma)^{1/2} = 1,26 \cdot 10^3 \times 0,87 \times 1,002 \times (0,83 \times 330,75 \times 4,529 \times 3,18 \times 0,3 \times 1000 \times 2,7475)^{1/2} = 1,505 \text{ МН}, \quad (4)$$

где V – скорость движения ледяного поля, $V = 3\% \times 29 \text{ м/с} = 0,87 \text{ м/с}$; m – коэффициент формы опоры в плане, $m = 0,83$; A – максимальная площадь ледяного поля, м^2 , которая может воздействовать на рассчитываемый элемент сооружения, определяемая по натурным наблюдениям или принимаемая в зависимости от поперечных размеров пролета сооружения как $A = 3l^2 = 3 \times 10,5^2 = 330,75$ (где l – пролет сооружения); k_b и k_v – коэффициенты, принимаемые по таблицам соответственно 18 и 19 [11]:

$k_b = 3,18, k_v = 0,3; R_c = 4,529$ МПа; ρ – плотность воды, $\rho = 1000$ кг/м³; $\text{tg}(70^\circ) = 2,7475$.

Согласно [11] нагрузка $F_{c,p}$, определенная по формуле (4), не может быть больше нагрузки $F_{b,p}$ МН, определяемой по формуле (5):

$$F_{b,p} = m k_b k_v R_c b h_d = 0,83 \times 3,18 \times 0,3 \times 4,529 \times 1,22 \times 1,002 = 4,386 \text{ МН}, \quad (5)$$

где b – ширина опоры по фронту на уровне действия льда, $b = 1,22$ м.

Согласно [11] следует принимать в расчетах меньшее значение ледовой нагрузки: 1,505 МН.

В формуле (4) учитывается скорость ветра за весь период наблюдений на Санкт-Петербургской метеостанции. Распределение ветра по данным Санкт-Петербургской метеостанции аппроксимируется кривыми Пирсона I типа [12]:

$$y = 1,13 \left(1 + \frac{x}{-13,834} \right)^{-0,37} \left(1 - \frac{x}{37,466} \right). \quad (6)$$

Значение скорости ветра с обеспеченностью 0,99 получается 29 м/с. Среднее многолетнее значение суммы градусо-дней мороза по ОГМС Санкт-Петербург за период 1881-1980 гг. составляет 775°C.

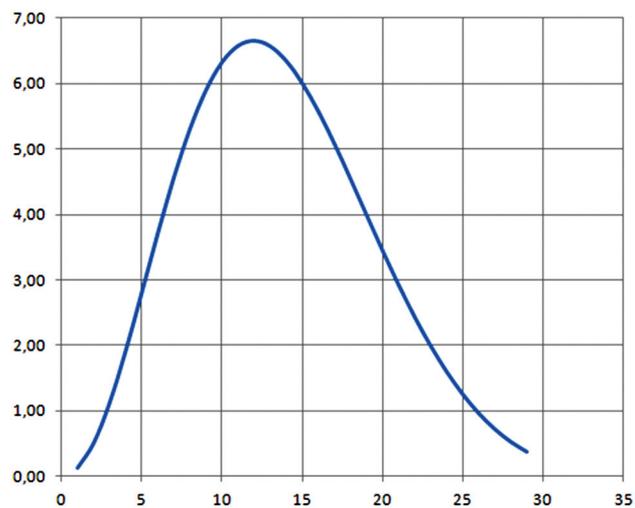


Рисунок 1 – Распределение индекса замерзания

На рисунке 1 приведено распределение индекса замерзания для Финского залива. Распределение индексов замерзания также аппроксимируется кривыми Пирсона I типа. С обеспеченностью 90% индекс замерзания получается равным 983,9. Индексы замерзания с обеспеченностью 99% и 99,9% равны соответственно 1274,2 и 1358,2.

Расчетную толщину льда определяем по формуле (7) после подстановки известных значений при индексе замерзания, $R = 1358,2$, с обеспеченностью 99,9%:

$$h_d = 0,034nR^{1/2} = 1,002 \text{ м}, \quad (7)$$

где n – коэффициент местных условий, принимаем в запас большее значение: $n = 0,8$.

Прочность льда при сжатии, R_c , определим по формуле (48) из [11]:

$$R_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i + \Delta_i)^2} = 4,529 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Рассчитанная по формуле (5) ледовая нагрузка 1,505 МН вызывает усилие среза одной сваи относительно ростверка условного створного знака 1,172 МН.

В 2013 г. несколько створных знаков, рассчитанных под нагрузку 1,505 МН, были разрушены в результате среза 80% свай относительно ростверка. Сваи были армированы 16Ø25A500. Несущая способность сваи по срезу, N_{sh} , при среднем (именно при среднем, а не при расчетном) сопротивлении стали составила 2,104 МН. Будем считать, что это есть срез при среднем значении ледовой нагрузки.

Среднее значение ледовой нагрузки определим по формуле (9):

$$F_{c,pm} = N_{sh} / (1 - 3,25/14,7) = 2,104 / (1 - 3,25/14,7) = 2,701 \text{ МН}. \quad (9)$$

где 3,25 и 14,7 – соответственно размеры сваи в м над зеркалом и под водой.

При коэффициенте вариации 0,15 ледовой нагрузки среднее квадратическое отклонение будет:

$$\sigma_{ice} = F_{c,pm} \times v = 2,701 \times 0,15 = 0,405 \text{ МН}. \quad (10)$$

Так как разрушилось 80% свай, то уточненные среднее значение и среднее квадратическое отклонения ледовой нагрузки будут соответственно: 2,701 + 0,405 = 3,106 МН и $3,106 \times 0,15 = 0,466$ МН.

Тогда ледовая нагрузка с обеспеченностью 0,99865 будет:

$$F_{c,p3\sigma} = F_{c,pm} + 3\sigma_{ice} = 3,106 + 3 \times 0,466 = 4,504 \text{ МН}. \quad (11)$$

Таким образом, обеспеченность расчетной по [11] ледовой нагрузки в Финском заливе составляет:

$$t = [(1,505 - 4,504) / 0,466] = -6,44. \quad (12)$$

То есть, в течение 10 лет объекты, запроектированные по [11] для эксплуатации в Финском заливе, будут разрушены почти со 100% вероятностью.

На наш взгляд, в [11] формулу (50): $F_{c,p} = 1,26 \cdot 10^{-3} V h_d (m A k_b k_v R_c \rho \text{tg}\gamma)^{1/2}$, следует изменить.

Из опытов следует, что с увеличением прочности льда, R_c , прямо пропорционально увеличивается сила, $F_{c,p}$. Поэтому переменную R_c следует вынести из-под знака радикала.

Лед по толщине не однороден, следовательно, $F_{c,p}$ имеет гиперболическую зависимость от переменной h_d . Поэтому переменную h_d следует внести под знак радикала.

Учет влияния воздействия ветра на гидротехническое сооружение имеет смысл только при учете ледовых массивов, которые в формуле (50) [11] в виде переменной A и коэффициента k_v размещены под знаком радикала. Поэтому скорость ветра также следует внести под знак радикала.

Переменная плотности воды ($\rho = 1000$ кг/м³) практически не меняется, поэтому ее следует убрать из формулы (50). Тогда коэффициент $1,26 \cdot 10^{-3}$ изменится

на 0,04: $1,26 \cdot 10^{-3} \times (1000)^{1/2} = 0,04$. Именно такой коэффициент использовался при определении $F_{c,p}$ в СНиП 2.06.04-82*.

После преобразований формула (50) в [11] будет иметь вид:

$$F_{c,p} = 0,04 R_c (m k_b k_v A V h_d \operatorname{tg} \gamma)^{1/2}. \quad (13)$$

Тогда сила от ледовой нагрузки, $F_{c,p}$, будет больше соответствовать физическому смыслу, а размерность $F_{c,p}$ будет: $\text{тс}/\text{м}^2 \times (\text{м}^2 \times \text{м}/\text{с} \times \text{с} \times \text{м})^{1/2} = \text{тс}/\text{м}^2 \times \text{м}^2 = \text{тс}$. Сейчас «на выходе» по формуле (50) [11] мы получаем следующую размерность: $\text{м}/\text{с} \times \text{с} \times \text{м} \times (\text{м}^2 \times \text{тс}/\text{м}^2 \times \text{тс}/\text{м}^3)^{1/2} = \text{тс} \times (\text{м})^{1/2}$.

Новое значение ледовой нагрузки $F_{c,p}$, определенное по (13), будет:

$$F_{c,p} = 0,04 \times 4,529 \times (0,83 \times 3,18 \times 0,3 \times 300 \times 0,87 \times 1,02 \times 2,75)^{1/2} = 4,538 \text{ МН}.$$

Значение $F_{b,p}$, определенное по (5) равно 4,386 МН. Таким образом, мы получаем сопоставимые значения ледовой нагрузки. Но для дальнейших расчетов будем принимать не меньшее значение ледовой нагрузки, как рекомендует [11], а большее – 4,538 МН.

Обеспеченность ледовой нагрузки будет:

$$P[(4,538 - 3,106) / 0,466 = 3,073] = 0,99894. \quad (14)$$

Вывод. Проблема назначения оптимального уровня надежности существует давно и пока не решена. Чтобы обеспечить надежность строительной системы примерно 3σ , следует стремиться к обеспеченности нагрузок 0,99865 (3σ).

Применение СП не всегда гарантирует требуемую надежность строительных объектов. Использование вероятностных подходов при решении инженерных задач может предотвратить появление чрезвычайных ситуаций.

Библиографический список

1. Долганов, А.И. Надежность стержневых железобетонных конструкций [Текст] / А.И. Долганов. – Магадан: ОАО «МАОБТИ», 2001. – 209 с.
2. «Hütte». Справочная книга для инженеров, архитекторов, механиков и студентов: Девятое издание. – М.: Т-во скоропечати А.А. Левенсона, 1916.
3. Maier, M. Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen

Spannungen [Текст] / М. Maier. – Berlin: Springer, 1926. – 73 с.

4. Хоциалов, Н.Ф. Запасы прочности [Текст] / Н.Ф. Хоциалов // Строительная промышленность. – 1929. – № 10. – С. 840.

5. Геммерлинг, А.В. О надежности массовых конструкций [Текст] / А.В. Геммерлинг // Строительная механика и расчет сооружений. – 1974. – № 5. – С. 69–73.

6. Ржаницын, А.Р. Экономический принцип расчета на безопасность [Текст] / А.Р. Ржаницын // Строительная механика и расчет сооружений. – 1973. – № 3. – С. 3–5.

7. Синицин, А.П. Метод конечных элементов в динамике сооружений [Текст] / А.П. Синицин. – М.: Стройиздат, 1978. – 231 с.

8. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиаи. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.

9. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований [Текст]. – Введ. 2015–07–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.

10. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия [Текст]. – Введ. 2018–01–01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 48 с.

11. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Текст]. – Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82. – Введ. 2013–01–01. – М.: ФГУП ЦПП, 2012. – 116 с.

12. Митропольский, А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

Сведения об авторах

Андрей И. Долганов – доктор технических наук, технический директор ООО «Сев. Р. Девелопмент», Москва, Россия, e-mail: dolganov-58@mail.ru

Александр В. Сахаров – кандидат технических наук, главный инженер проекта ООО «Сев. Р. Девелопмент», Москва, Россия, e-mail: arhsasha@mail.ru

Поступила: 19.02.2018