МОБИЛИЗОВАННОСТЬ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.В. Перельмутер

SCAD Soft Ltd., Киев, УКРАИНА

Аннотация: Рассматривается вопрос о различиях в возможной реакции конструкции на неожиданное возмущение с учетом того, что предельное состояние конструкции является редким явлением и большую часть времени конструкция весьма далека от этого состояния. Предлагается особая мера указанного качества конструкции, называемая мобилизованностью.

Ключевые слова: случайная нагрузка, выброс за расчетный уровень, надежность

MOBILIZATION AS A CHARACTERISTIC OF RELIABILITY OF STRUCTURES

Anatolii V. Perelmuter

SCAD Soft Ltd., Kiev, UKRAINE

Abstract: The problem of the differences in the possible reaction of a structure to an unexpected perturbation is considered, taking into account the fact that the limiting state of a structure is a rare phenomenon and most of the time the design is very far from this state. A special measure of the specified quality of the structure is proposed, called mobilization.

Key words: random load, reliability, mobilization

1. Становление современной теории надежности строительных конструкций, начавшееся в первой половине 20-го столетия с осознания вероятностной природы проблемы (М. Майер [17], Н.Ф. Хоциалов [14], Н.С. Стрелецкий [12, 13], А.М. Фрейденталь [16], А.Р. Ржаницын [11]) привело пониманию особенностей работы конструкций в условиях фактической изменчивости нагрузок и несущей способности. Более общие принципиальные вопросы применения вероятностных методов к анализу надежности сооружений получили развитие в фундаментальных исследованиях В.В. Болотина [1,2], который связал теорию надежности со статистической динамикой — вероятностным расчетом конструкций с учетом фактора времени. Тем не менее, временной аспект проблемы надежности и до сего времени нельзя полагать полностью сформировавшимся. Так, по-

становка задачи об обеспечении некоторого заданного уровня надежности в течение планируемого срока эксплуатации T_{ef} сегодня никак не связывается с картиной изменения уровня надежности во времени. При этом по сути равноправными будут конструкции, у которых фактическая надежность $P(t)$ определена графиком 1 или графиком 2 (рис. 1), хотя в случае 1 конструкция «в общем» более надежна [1, с. 62].

А с точки зрения анализа, принятого в нормах проектирования, конструкция плотины, обычный уровень нагружения которой не очень далек от предельно допустимого и составляет примерно 80% от расчетного, и конструкция дымовой трубы, у которой обычное нагружение соответствует примерно 15% расчетного, оказываются равноправными (и равнонадежными?).

Рисунок 1. Графики фактической надежности.

Но фактически здесь имеется определенная неувязка, поскольку мы можем полагаться на равнонадежность только по отношению к тем факторам (например, внешним воздействиям), которые были приняты во внимание при проектировании и статистические характеристики которых использованы при назначении указанных в нормах расчетных коэффициентов. И в случае некоторого не предусмотренного проектом (и нормами) случайного возмущения вероятность истощения 20% запаса в первом случае намного выше чем истощение 85% запаса во втором.

В настоящей работе дается некоторое формальное определение и меру использованному выше выражению «в общем более надежна», введением некоторой новой характеристики надежности, которая названа мобилизованностью конструкции. Заметим, что если полагать, будто вся информация для оценки надежности имеется в распоряжении расчетчика, то преимущества графика 1 по сравнению с графиком 2 практически отсутствуют. Действительно, поскольку и начальная надежность, проверяемая при приемке конструкции, и финальная надежность в обоих случаях одинаковы, то различия, существующие в промежуточные моменты времени, не сказываются на оценке качества конструкции, поскольку уровень надежности нигде не опускается ниже допустимого зна-

чения $[P]$, а не учтенные угрозы отсутствуют (напомним, что предполагается ситуация точного знания). Но если стать на более реалистичную позицию, которая учитывает невозможность полного знания и, следовательно, возможность некоторых неучтенных возмущений, то тот запас, который большую часть времени имеет конструкция 1, окажется не лишним. Эта конструкция имеет более высокую мобилизованность.

2. Будем фиксировать внимание именно на том, что помимо четко предсказуемых нагрузок и воздействий всегда существует возможность реализации некоторого непредусмотренного ни нормативными документами, ни прогнозом проектировщика случайного воздействия. Причем в этом контексте понятие «воздействие» понимается очень широко и включает в себя такие, например, события, как грубый брак, ошибка персонала, необычное для данной местности природное явление и т.п., одним словом, всяческие сюрпризы, которые ведут к существенным последствиям. Эти воздействия, безусловно, не являются массовыми и поэтому невозможен их статистический анализ, а также учет их влияния в вероятностном анализе надежности. Единственная правдоподобная гипотеза вероятностного типа состоит в том, что их реализация равновероятна в течение времени существования конструкции и что они являются весьма редкими явлениями. Американский экономист Nicolas Nassim Taleb [18] назвал подобные события «черными лебедями» (Ювенал говорил: “*tara avis in terris nigroque simillima cygno*” (лат.) – «хороший человек так же редок, как чёрный лебедь», поскольку существовала гипотеза о том, что все лебеди белые. Это было верно, пока в 1700 году не был обнаружен черный австралийский лебедь...). А с точки зрения этих сюрпризных событий важной характеристикой объекта проектирования является его уязвимость.

Уязвимость – это параметр, характеризующий возможность нанесения рассматривае-

мой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами. Уязвимость неразрывно связана с известной характеристикой «живучесть» и с дополнительно предлагаемой характеристикой — «мобилизованность».

Если, как обычно считается, живучесть является в некотором смысле пространственной характеристикой, показывающей, как локальное возмущение распространяется по пространству системы и может ли это локальное разрушение получить непропорционально большое развитие «вширь», то в качестве мобилизованности будем рассматривать временную характеристику, показывающую насколько система готова и способна среагировать на локальное во времени (импульсное) неожиданное возмущение. В обоих случаях возмущение может быть достаточно сильным, чтобы было необходимо считаться с его последствиями, а природа его такова, что предсказать момент и место появления, а также другие количественные характеристики не представляется возможным. Воздействия такого типа в части EN 1991-1-7 Еврокода [15] относятся к категории неустановленных (*unidentified actions*).

Заметное отсутствие мобилизованности конструкции, как и недостаточная живучесть, должны служить поводом к повышенному вниманию и использованию некоторых защитных мероприятий. Можно, конечно, повысить уровень прямой защиты такой конструкции, вводя некоторые дополнительные коэффициенты надежности, которые уже точно, как было принято говорить в прошлом веке, следует называть коэффициентами незнания, но вряд ли такой путь является продуктивным. Все же основой стратегии защиты должны стать косвенные меры предупредительного характера, такие как усиленный контроль, или же конструктивные решения.

Из малой вероятности реализации возможного возмущения следует, что проверке подлежит поведение конструкции, на которую действуют только постоянные нагрузки и и не-которая наиболее вероятная часть временных

нагрузок (например, их длительные составляющие), и оценивать уровень мобилизованности конструкции следует именно в таком состоянии. Так, в производственных зданиях усилия в колоннах, вызванные постоянными и длительными нагрузками редко превышают 15-20%, и поэтому даже вывод колонны из строя (например, вследствие террористического акта) не обязательно должен привести к обрушению всего здания, поскольку при хорошей пространственной развязке двадцатипроцентную нагрузку вместо выбывшего из строя элемента способны нести соседние элементы каркаса. А в офисных, жилых и общественных зданиях усилия от собственного веса несущих и ограждающих конструкций, а также от действия длительной части полезных нагрузок составляют 70-80% от уровня несущей способности и здесь уже трудно ожидать такого же эффекта.

Поэтому вызывают определенные сомнения слова из статьи [5] «В годы войны отступающие войска фашистов, пытаясь уничтожить наш промышленный потенциал, подрывали колонну громадного цеха, и, оглядываясь назад, с удивлением видели, что он не падает... Сейчас с экранов телевизоров нас убеждают в том, что если одна колонна упадет, то и все здание обязано упасть. Если это так, то такое здание должно стоять вдали от людей с часовым у ворот, который никого бы в него не впускал, кроме авторов проекта». Думаю, что с этим мнением вряд ли согласятся те, кто видел результаты подрыва жилых домов в Москве или в Волгодонске.

Следует заметить, что различия в мобилизованности могут никак не сказаться на вероятности отказа конструкции, если иметь в виду только те воздействия, которые прямо учтены проектом. Действительно, легко себе представить (рис. 2), что если на две конструкции действуют нагрузки с различными значениями математических ожиданий $\bar{q}_1$ и $\bar{q}_2 < \bar{q}_1$, но среднеквадратичные отклонения у них таковы, что $\hat{q}_2 > \hat{q}_1$, то может случиться, что расчетные значения таких нагрузок ока-

Рисунок 2. К вопросу сопоставления нагрузок.

Рисунок 3. К вопросу вероятности совпадения возмущения с тем или иным значением нагрузки.

жуются одинаковыми и используют одинаковый индекс надежности γ (измеренный в среднеквадратичных отклонениях запас надежности), и одинаковой будет их вероятность отказа (Система обозначений параметров случайных величин и случайных процессов принята по [11], где для случайной величины используется обозначение $\tilde{x}$, для ее математического ожидания – $\bar{x}$, для дисперсии – $\hat{x}$, а для стандарта – $\hat{x}$).

Эта ситуация является в достаточной мере типичной, если полагать, что нагружение q_1 связано только с одной временной нагрузкой, а нагружение q_2 включает в себя много (например, n) различных временных нагрузок. Действительно, дисперсии компонентов, входящих в комбинированное нагружение, суммируются и если для простоты предположить, что дисперсии всех упомянутых

нагрузок одинаковы и равны $\hat{q}_1$, то будем иметь $\hat{q}_n = n\hat{q}_1$.

Если обратится к описанию картины во времени, и учесть что возмущение может реализоваться в любой момент времени, то здесь важную роль начинает играть вероятность совпадения возмущения с тем или иным значением нагрузки, которая меняется во времени по случайному закону (рис. 3).

Здесь важной характеристикой системы является эффективная частота случайного процесса $\tilde{q}(t)$, которым является действующая нагрузка. Эта частота равна средней частоте пересечения среднего уровня нагрузки $\bar{q}$ и для нормального стационарного процесса определяется по формуле

$$\omega_{ef} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\hat{\dot{q}}}{\bar{q}}}, \quad (1)$$

Таблица 1. Сопоставление мобилизованности нагрузок.

Нагрузка		$\bar{q}$, Па	V	γ	ω	v_+ , 1/год	T_γ , лет	μ
Постоянная			0,10			0	∞	∞
Снеговая	I р-н	163,6	1,60	2,058	0,141 1/сут	0,4114	2,43	0,100
	II р-н	343,8	1,26	1,496	0,095 1/сут	0,3175	3,15	0,094
	III р-н	631,0	0,92	1,256	0,073 1/сут	0,2600	3,85	0,096
Ветровая	I р-н	8,6	1,814	20,130	6,58 1/сут	$1,151 \cdot 10^{-2}$	86,8	34,946
	II р-н	14,6	1,781	15,600	5,16 1/сут	$3,551 \cdot 10^{-2}$	28,2	8,798
	III р-н	22,3	1,731	13,210	5,42 1/сут	$7,456 \cdot 10^{-2}$	13,4	3,540
Вертикальная крановая	Вар-т 1			5,645	106,8 1/ч	$1,79 \cdot 10^{-2}$	55,8	6,300
	Вар-т 2			5,274	106,8 1/ч	$1,36 \cdot 10^{-1}$	7,4	0,780
	Вар-т 3			7,100	106,8 1/ч	$3,00 \cdot 10^{-7}$	$3,32 \cdot 10^6$	471440
	Вар-т 4			6,730	106,8 1/ч	$3,88 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^5$	34726,8
V — коэффициент вариации; v_+ — среднегодовое число выбросов за расчетный уровень нагрузок								

где $\hat{q}, \hat{q}$ — дисперсия скорости процесса и дисперсия его ординат. Эффективный период $T_{ef} = 1/\omega_{ef}$ определяет среднее время между этими пересечениями.

Знание эффективной частоты открывает возможность для определения частоты выбросов случайного процесса за нормированный уровень γ за время t , в частности, при нормальном распределении ординаты процесса, по известной формуле

$$v_+(\gamma, t) = \frac{1}{2\pi} \omega_{ef} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right). \quad (2)$$

3. Очевидно, что мобилизованность конструкции повышается как с увеличением индекса надежности $\square$ (числом стандартов, отделяющих среднее значение нагрузки от ее расчетного значения), так и с увеличением промежутка времени T_γ между выбросами нагрузочного процесса за уровень расчетного значения. Поэтому предлагается в качестве меры мобилизованности в первом приближении принять величину

$$\mu = \gamma(T_\gamma/T_s), \quad (3)$$

где T_s — расчетный срок эксплуатации сооружения.

Для нормального случайного процесса величина T_γ определяется формулой

$$T_\gamma = \frac{1}{v_+(\gamma)} = \frac{2\pi}{\omega_{ef}} \cdot \exp \frac{\gamma^2}{2}, \quad (4)$$

следовательно, в этом случае

$$\mu = \frac{2\pi\gamma}{\omega_{ef}T_s} \cdot \exp \frac{\gamma^2}{2}. \quad (5)$$

В таблице 1 приведены сведения об уровне мобилизованности некоторых нагрузок при сроке эксплуатации, равном 50 годам. Параметры вероятностного описания нагрузок приняты по данным [9].

Из этой таблицы видно насколько различными могут быть значения μ , у нагрузок, которые мы полагаем в некотором смысле рав-

ноценными, поскольку все они нормами проектирования отнесены к одному классу временных нагрузок.

4. На практике редко встречаются конструкции, подверженные действию только одной нагрузки чаще всего используется расчетная комбинация нагрузок, которую мы будем полагать суммой стационарных случайных процессов

$$\tilde{q}_\Sigma = \sum_{i=1}^n c_i \tilde{q}_i, \quad (6)$$

где коэффициенты влияния c_i переводят значения нагрузок в компоненты расчетного усилия или напряжения.

Математическое ожидание и стандарт суммарной нагрузки определяются как

$$\bar{q}_\Sigma = \sum_{i=1}^n c_i \bar{q}_i; \quad \hat{q}_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \bar{q}_i V_i)^2}. \quad (7)$$

Если составляющие этой суммы не коррелированы между собой, то, следуя рассуждениям В.В. Болотина [3], будем иметь для эффективной частоты суммарной нагрузки

$$\omega_\Sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i c_i \bar{q}_i V_i)^2}{\sum_{i=1}^n (c_i \bar{q}_i V_i)^2}}. \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим случай, когда на конструкцию действует постоянная нагрузка $\tilde{q}_1$ с математическим ожиданием $\bar{q}_1 = 15,12$ Па, снеговая нагрузка I-го района $\tilde{q}_2$ и ветровая нагрузка II -го района $\tilde{q}_3$. Коэффициенты $c_i \geq 0$ зависят от параметров конструкции и, в общем случае, от того, для проверки какого элемента (и какого его сечения) предполагается использовать расчет-

ную комбинацию усилий. Мы для простоты рассмотрим вариант $c_1 = c_2 = c_3 = 1$.

Числовые характеристики суммарного усилия, согласно формулам (7)

$$\begin{aligned} \bar{q}_\Sigma &= 15,12 + 163,6 + 14,6 = 193,3; \\ \hat{q}_\Sigma &= \sqrt{(15,2 \cdot 0,1)^2 + (163,6 \cdot 1,6)^2 + (14,6 \cdot 1,78)^2} = \\ &= 263,0. \end{aligned}$$

Принимая во внимание расчетное значение суммарного усилия

$$q_\Sigma^p = 19 + 700 + 420 = 1139$$

определим его нормированное отклонение

$$\gamma_\Sigma = \frac{q_\Sigma^p - \bar{q}_\Sigma}{\hat{q}_\Sigma} = \frac{1139 - 193,3}{263,0} = 3,60.$$

По формуле (8) вычисляем эффективную частоту суммарного воздействия, используя вероятностные параметры нагрузок из таблицы 1:

$$\begin{aligned} \omega_\Sigma &= \sqrt{\frac{(0,141 \cdot 163,6 \cdot 1,6)^2 + (5,16 \cdot 14,6 \cdot 1,78)^2}{(15,2 \cdot 0,1)^2 + (163,6 \cdot 1,6)^2 + (14,6 \cdot 1,78)^2}} = \\ &= 0,529 \text{ 1/сутки} \end{aligned}$$

Годичную частоту выбросов определяем по формуле (2), принимая во внимание среднюю продолжительность зимнего периода $t_3 = 145$ суток и введя в знаменатель коэффициент широкополосности $\beta_\omega = 3$, учитывающий многочастотность суммарного случайного процесса [6]:

$$v_\Sigma(\gamma_\Sigma, t_3) = \frac{0,529 \cdot 145 \cdot \exp(-0,5 \cdot 3,6^2)}{3 \cdot 2\pi \cdot 1/\text{год}} = 0,00623$$

Полученный период повторяемости выбросов $T_{\Sigma} = 1/\nu_{\Sigma} = 160,5$ лет намного превышает период повторяемости взятых порознь снеговой и ветровой загрузок, то же самое относится к величине $\mu = 11,56$.

Необходимо отметить, что значение мобилизованности характеризует не конструкцию в целом, а ее отдельный элемент (сечение). Подобно оценке надежности, минимальное из значений этой характеристики можно отнести к конструкции в целом (схема слабого звена).

5. Вычисление мобилизованности требует более тщательной оценки статистических свойств действующих на сооружение нагрузок, и коэффициент γ ни в коем случае не следует отождествлять с известным из норм коэффициентом надежности по нагрузке γ_f . Последний учитывает далеко не все факторы, определяющие реальную картину изменения нагрузок во времени. Так, например, для крановой нагрузки СНиП дает значение $\gamma_f = 1,1$, что очень далеко отстоит от данных таблицы 1. И дело не только в том, что коэффициент надежности по нагрузке γ_f связан с переходом от нормативного (характеристического) значения к расчетному, а коэффициент γ определяет переход от среднего значения к расчетному. Более важным является то обстоятельство, что нормируемые величины γ_f определены для «нагрузки вообще» и не учитывают целого ряда дополнительных случайных параметров, появляющихся при анализе способа реализации такой нагрузки в определенной конструкции.

Так, например, для крановой нагрузки [10] важным может быть такой фактор, как вероятность вполне конкретного положения на линии влияния, когда может реализоваться расчетное усилие в конструкции. Если же учитывать совместное действие нескольких кранов, то оказывается, что вероятность совпадения их расчетных позиций еще меньше, что резко снижает средний уровень усилия в конструкции.

Другой пример – действие ветровой нагрузки на башенное сооружение. Здесь появление

расчетного значения усилия в каком-нибудь элементе конструкции связанного со случайным направлением ветра. Кроме того, приведенная в нормах картина распределения ветрового напора по высоте является некой огибающей реальных реализаций скорости ветра и имеет вероятность реализации, далеко не равную единице. Не случайно, что вся мировая история высотного строительства не знает случаев обрушения башен от действия ветровой нагрузки (исключением являются торнадо и сочетание ветра с гололедом, да и то это в основном относится к мачтам на оттяжках).

6. В заключение подведем некоторые итоги:

- Мобилизованность, как новая характеристика способности конструкции к восприятию внезапного возмущения, по видимому, может служить основой для принятия проектных и организационных решений, в особенности для сооружений повышенного уровня ответственности.
- Нуждается в дальнейшем изучении вопрос о выборе удобного способа измерения мобилизованности. Соответствующая мера может быть сконструирована на основе сопоставления с хорошо зарекомендовавшими себя проектными решениями. Возможен также подход, основанный на соглашении о параметрах некоторого стандартизованного тестового возмущения (различного для разных типов сооружений). Примером может служить рекомендация пункта 3.3(2) из EN 1991-1-7 [15] об использовании для проверки живучести системы гипотетической нагрузки 34 кН/м^2 , которая прикладывается в любом направлении к ключевому элементу здания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Болотин В.В.** Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. – 280 с.

2. **Болотин В.В.** Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
3. **Болотин В.В.** О сочетании случайных нагрузок, действующих на сооружение // Строительная механика и расчет сооружений, №2, 1962, с. 1-5.
4. **Гульванесян Х., Формичи П., Калгаро Дж.А.** Руководство для проектировщиков к Еврокоду 1: Воздействия на сооружение. Разделы EN 1991-1-1 и с EN 1991-1-3 по EN 1991-1-7.— М.: МГСУ, 2011. – 343 с.
5. **Ларионов В.В.** Публичная техническая политика в строительстве // Промышленное и гражданское строительство, №5, 2004, с. 11-12.
6. **Лоллейт А.Ф.** О подборе сечений железобетонных элементов. по критическим усилиям. – М. – Л., 1933. – 68 с.
7. **Перельмутер А.В.** Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 256 с.
8. **Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф.** Об оценке уязвимости строительных конструкций. // Инженерно-строительный журнал, №5, 2014, с. 5-14.
9. **Пичугин С.Ф.** Надежность стальных конструкций производственных зданий. – М.: АСВ, 2011. – 456 с..
10. **Пичугин С.Ф.** Крановые нагрузки на строительные конструкции. – Полтава: ООО «АСМИ», 2014. – 504 с.
11. **Ржаницын А.Р.** Теория расчета конструкций на надежность.— М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
12. **Стрелецкий Н.С.** Новая методика расчета конструкций. – М.: Издание Московского инженерно-строительного института, 1936. – 36 с.
13. **Стрелецкий Н.С.** Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. – М.: Стройиздат. 1947. – 92 с.
14. **Хоциалов Н.Ф.** Запасы прочности. // Строительная промышленность, №10, 1929.
15. EN 1991-1-7: Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General actions. Accidental actions. Brussels: European Committee for Standardisation, 2006, 66 pages.
16. **Freudenthal A.M.** Safety und the probability of structural failure. // Proc. of ASCE, vol. 80, paper No 468, 1954.
17. **Maier M.** Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulassigen Spannungen . Berlin, Springer-Verlag, 1926.
18. **Nassim Nicolas Taleb.** The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. New York: Random House, 2007, 394 pages.

Перельмутер Анатолий Викторович, иностранный член РААСН, профессор, доктор технических наук, НПО СКАД Софт, 03037, Украина, г. Киев, ул. Провсящения, дом 3а, офис 2, e-mail: avp@scadsoft.com.

Anatolii V. Perelmuter, Foreign member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Science, Professor, SCAD Soft, Ltd, Kiev, Ukraine e-mail: avp@scadsoft.com.