

## Состояние расчетов кранов и основные направления их развития

**В.С. Котельников**, проф., д-р техн. наук (Ростехнадзор),  
**А.А. Зарецкий**, проф., д-р техн. наук, **А.Б. Макаров**, канд. техн. наук,  
(НИИКраностроения)

Расчеты кранов, как и других подъемных сооружений, проводят в целях аналитического доказательства их безопасности при проектировании, реконструкции, разнообразных оценках технического состояния и освидетельствованиях во время эксплуатации, а также при технической экспертизе, связанной с продлением срока эксплуатации, в частности с оценкой остаточного ресурса и т.п.

В соответствии с законом [1] под безопасностью понимают такое состояние крана, при котором отсутствует недопустимый риск наступления отказа. Под риском понимают вероятность отказа с учетом тяжести вреда. Считается, что отказ наступает, когда достигается состояние, называемое предельным, и дальнейшая эксплуатация крана становится невозможной, например из-за превышения допустимого риска возникновения аварии, или нецелесообразной, например из-за снижения эффективности. Таким образом, путем расчетов необходимо доказать, что за время эксплуатации в заданных условиях (т.е. в соответствии с инструкциями изготовителя) не наступит ни одно из предельных состояний крана в целом или его отдельных частей и деталей. Гарантией работоспособности крана служит достаточно малая вероятность наступления любого из возможных предельных состояний за срок службы. В проекте специального технического регламента [2] приведены значения допустимой расчетной вероятности отказов (см. таблицу) в течение срока службы крана в зависимости от причиненного вреда.

Категория вреда отказа	Характеристика вреда отказа	Расчетная допустимая вероятность отказа
I	Гибель более 5 человек или материальный ущерб, превышающий 10-кратную стоимость ПТО*	$10^{-6}$
II	Гибель менее 5 человек или материальный ущерб, не превышающий 10-кратную стоимость ПТО	$10^{-5}$
III	Риск для жизни людей отсутствует, материальный ущерб примерно равен стоимости ПТО	$10^{-4}$
IV	Риск для жизни людей отсутствует, материальный ущерб значительно меньше стоимости ПТО	$10^{-3}$

\* Подъемно-транспортное оборудование.

Эти значения вероятности являются в общем случае исходными при проведении расчетов кранов.



Предельные состояния кранов весьма разнообразны. Обычно металлическую конструкцию крана, его механизмы и их отдельные детали рассчитывают на прочность, жесткость, надежность и устойчивость формы. Свободностоящие краны стрелового типа (стреловые самоходные, башенные, порталные) и причальные перегружатели, кроме того, рассчитывают на устойчивость, а плавучие – на остойчивость против опрокидывания. Для предотвращения недопустимых перемещений крана или отдельных его частей необходимо вводить ограничения на усилия в некоторых связях. Например, чтобы не произошло запрокидывания стрелы, усилие в удерживающем канате не должно достигать нуля.

В настоящее время на практике применяют два метода расчета кранов: по допустимым напряжениям (The allowable stress method) и по предельным состояниям (The limit state method). Распространено мнение, что они равноценны. На самом деле это далеко не так, поскольку между ними есть принципиальные различия, которые в технической литературе (отечественной и зарубежной) по расчету кранов и нормативных документах обычно не обсуждаются.

Первый метод основан на предположении, что наступление предельного состояния по прочности, устойчивости формы и положения, долговечности и т.п. можно предотвратить, подбирая соответствующий коэффициент запаса (коэффициент безопасности). Этот метод возник давно и получил распространение практически во всех областях техники. В последние годы он подвергся критике из-за недостатков, обуславливающих его противоречие с современными требованиями машиностроения вообще и краностроения в частности. Основной его недостаток – отсутствие целевой ориентации расчета. Конструктор рассматривает расчетные и допускаемые напряжения или нагрузки как определенные величины, поэтому на основе этого метода расчета принципиально невозможно определить вероятность отказа крана, т.е. получить ответы на вопросы, вытекающие из требований закона [1] и проекта технического регламента [2].

В методе расчета по предельным состояниям нагрузки и сопротивления конструкций машин и сооружений признаются случайными процессами и/или величинами. Путем такого расчета можно оценить вероятность наступления любого отказа, которую в дальнейшем сравнивают с нормативными значениями (см. таблицу). Можно также представить себе еще одно решение задачи – установление размеров деталей на основе допускаемой вероятности отказа (см. таблицу). Заметим, что второе решение более пригодно для целей проектирования, тогда как первое целесообразнее применять в целях проверки, например для аналитической оценки (подтверждения) соответствия.

В предыдущие годы вопрос использования того или иного метода расчета кранов существенно зависел от «вкуса» и степени подготовленности конструктора, наличия нормативной документации и т.п. В настоящее

время, в условиях действия закона [1], безопасность крана в указанном выше смысле необходимо оценивать на разных стадиях жизненного цикла. Содержательные оценки безопасности можно получить только на основе расчета по предельным состояниям. Конечно, какое-то время краны еще будут рассчитывать методом допускаемых напряжений, но его следует рассматривать как переходное. Этот метод себя исчерпал, и на наш взгляд, его дальнейшее развитие бесперспективно. С учетом сказанного, ниже рассматриваются состояние и направления развития расчета кранов только по предельным состояниям.

В России метод расчета по предельным состояниям для башенных кранов был впервые применен И.Я. Коганом [3] в виде, заимствованном из практики расчета строительных конструкций. Как известно, применительно к строительству идеи расчета по предельным состояниям были впервые сформулированы и развиты Н.С. Стрелецким [4]. Большой вклад в развитие метода внесли также А.А. Гвоздев, И. И. Гольденблат, В.М. Келдыш, А.Р. Ржаницын и др.

В основу метода Н.С. Стрелецкий положил понятие неразрушимости как вероятности того, что предельное состояние не наступит. При этом вероятность разрушения (отказа) предлагалось определять исходя из статистически независимых кривых распределения плотности вероятности нагрузки и сопротивления. Принятый на практике метод расчета по предельным состояниям отличался от расчета по допускаемым напряжениям только тем, что коэффициент запаса был заменен тремя коэффициентами: перегрузки, однородности и ответственности. Это нововведение придало расчетам конструкций большую гибкость. Однако на практике все богатство предложенной идеи в полной мере не было использовано. Коэффициенты остались вполне детерминированными. Более того, их подбирали таким образом, чтобы результаты расчетов методом предельных состояний давали результат, приблизительно совпадающий с результатами расчета по допускаемым напряжениям. Иными словами, изменилась лишь форма расчета, а содержание осталось прежним. Необходимо отметить выдающуюся роль В.В. Болотина в развитии статистической динамики и разработке теории надежности механических систем, тесно связанных с полной реализацией идей Н.С. Стрелецкого. Однако до практически пригодных методик их также не удалось довести.

В 1971 г. группа европейских ассоциаций создала объединенный комитет по безопасности конструкций (JCSS, [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch)). За годы его деятельности до настоящего времени обсуждено более 200 научных статей по безопасности конструкций и связанных с этим проблем. Эти документы, посвященные вопросам надежности конструкций и их расчетам по предельным состояниям, в том числе в вероятностной постановке, послужили основой для подготовки руководящих документов по проектированию и строительству конструкций разных типов и материа-



лов, среди которых – международные стандарты ИСО, Еврокоды, модели кодов СЕВ и ЕССС. Эти работы, имеющие отношение к расчету кранов по предельным состояниям, будут рассмотрены позднее.

В работе А.А. Зарецкого [5] впервые обоснован вероятностный подход к расчету конструкций кранов, предложены приемлемые для практики методики. Они реализованы в стандартах [6], регламентирующих расчеты башенных кранов, и в некоторых руководящих материалах по расчетам прочности и устойчивости стреловых кранов [7, 8]. Использование этих материалов в течение многих лет (с 1975 г.) подтвердило справедливость принятых допущений и сформулированных положений.

В конце 1980-х г. в рамках ИСО ТК-96–Краны разработаны международные стандарты расчета кранов. Попытки ознакомить техническую общественность комитета ТК-96 с результатами работы [5] в целях их применения в новых международных стандартах успехом не увенчались. По мнению советской (впоследствии – российской) делегации, основная причина такого отношения – отсутствие готовности большинства членов ТК-96 к восприятию предложенных идей. Международный стандарт [9] и его части посвящены выбору нагрузок и их комбинаций для расчета различных кранов. Для определения расчетных значений нагрузок и сопротивлений методом предельных состояний предложены три группы частичных коэффициентов, аналогичных коэффициентам перегрузки, однородности и ответственности. В целом требования стандартов ИСО совпадают с предложениями И.Я. Когана [3], сделанными в России 25 лет назад.

По мере применения метода расчета кранов по предельным состояниям за рубежом углубилось понимание его сущности. Так, в Европейском стандарте [10] впервые признан факт, что расчет по предельным состояниям, в отличие от расчета по допускаемым напряжениям, учитывает случайную изменчивость нагрузок. Также впервые признана неравноценность методов расчета кранов по допускаемым напряжениям и по предельным состояниям. Применение метода допускаемых напряжений, рассматриваемого как частный случай расчета по предельным состояниям, ограничено кранами, конструкции которых являются линейно-упругими системами. Метод расчета кранов по предельным состояниям в соответствии со стандартом [10] не имеет ограничений. Однако изменения в методы расчета пока не внесены, и они остаются вполне детерминированными.

Наиболее полно и последовательно метод расчета по предельным состояниям реализован в международном стандарте ИСО 2394 [11], в котором определены общие принципы оценки и подтверждения надежности конструкций применительно к их работе в течение жизненного цикла. Стандарт представляет общую основу для разработки норм расчета

строительных и других несущих конструкций безотносительно природы или комбинации использованных материалов. Он имеет концептуальный характер и достаточно общую природу.

Подчеркивается, что надежность конструкции – общее понятие, включающее в себя модели для описания воздействий, нормы надежности элементов, характеристики реакций конструкции, сопротивление, изготовление, процедуры контроля качества и национальные требования (следует отметить, что все они взаимосвязаны). Изменение одного коэффициента может нарушить баланс надежности, поэтому оно должно сопровождаться изучением полной надежности.

В стандарте формализовано определение предельного состояния. В общем случае его находят с помощью некоторой функции  $g$  основных переменных  $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ . Функция  $g(X, t)$  делит пространство переменных  $X$  на две области, так что область «желательных» состояний  $g(X, t) > 0$  не содержит состояний, при которых происходит отказ, а область «нежелательных» состояний  $g(X, t) < 0$  содержит только состояния, при которых происходит отказ. Уравнение предельного состояния  $g(X, t) = 0$  описывает границу между областями «желательных» и «нежелательных» состояний.

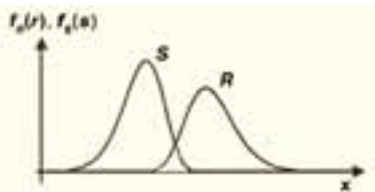
В рассматриваемом международном стандарте допускается два возможных формата расчета: вероятностный и частичных коэффициентов. Формат частичных коэффициентов используют при проведении расчетов в обычных случаях, вероятностный – может быть удобен при решении специальных проблем проектирования, а также для калибровки частичных коэффициентов.

Среди работ, помещенных на сайте JCSS, представляет интерес макет правил вероятностного расчета конструкций [12], который несколько дополняет и разъясняет положения ИСО 2394. Можно полагать, что со временем он заменит редакцию действующего международного стандарта ИСО 2394. Работа состоит из трех частей. В первой части подробно приведены общие положения вероятностного расчета конструкций, во второй – описание вероятностных моделей воздействия на сооружения, в третьей – описание моделей сопротивления для бетонов, железобетонов и сталей. В каждой из указанных частей содержатся данные, которые можно применять для расчета кранов. Однако цельного документа, регламентирующего правила вероятностного расчета, в макете [12] не содержится.

Подводя итоги сказанному, можно констатировать, что пока ни в России, ни в мире не существует норм и правил, позволяющих оценивать вероятность отказа кранов. На практике при необходимости можно применять результаты работ [5 и 11], но их следует уточнить с учетом требований закона [1] и проекта технического регламента [2]. Ниже кратко



рассмотрены основные направления развития нормативных документов, гармонизированных с проектом технического регламента [2].

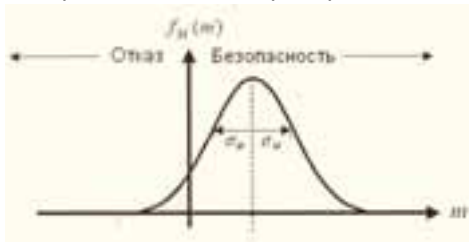


**Рис. 1. Кривые распределения нагрузки (S) и сопротивления материала элемента (R)**

элементы конструкции независимы и подчиняются нормальному закону (рис. 1). Как показывают данные работы [5], принимаемое допущение оправдано для кранов, так как последние, как правило, находятся под одновременным воздействием нескольких нагрузок. Принимая во внимание предельную теорему Ляпунова, можно ожидать, что распределение  $f(S)$  будет близким к нормальному закону, то же можно предполагать и для распределения  $f(R)$ , поскольку оно зависит от ряда физических и геометрических факторов. Поэтому получаемые зависимости допустимо использовать в практических расчетах.

В этом случае величина  $M=R-S$ , представляющая случайный резерв безопасности, также распределена по нормальному закону (рис. 2).

Среднее значение резерва  $\bar{M} = \bar{R} - \bar{S}$ , где  $\bar{R}, \bar{S}$  – соответственно средние значения  $R$  и  $S$ . Стандартное



**Рис. 2. Кривая распределения резерва безопасности (M)**

отклонение  $\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ , где  $\sigma_R, \sigma_S$  – соответственно стандартные отклонения для  $R$  и  $S$ .

Величину  $\beta = \frac{\bar{M}}{\sigma_M}$  называют индексом надежности, так как

она однозначно связана с  $[P]$  соотношением  $[P] = \Phi(-\beta)$ , где  $\Phi$  – интеграл вероятности. Имеются таблицы соответствия  $\beta$  и  $[P]$ .

Введем разделительную функцию  $\rho = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}{\sigma_R + \sigma_S}$ .

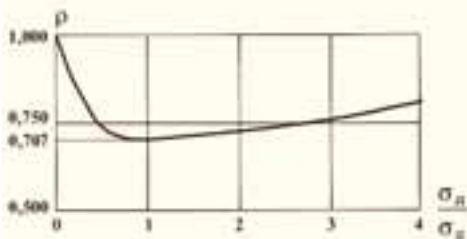


Рис. 3. График разделительной функции

С учетом этого после сложных преобразований получим соотношения для расчета по предельным состояниям в формате частичных коэффициентов:

$$\text{Условие прочности } S_p \leq R_p,$$

где  $S_p = \bar{S} \cdot \gamma_s$  – расчетная нагрузка;

$R_p = \frac{R_H}{\gamma_M}$  – расчетное сопротивление;

$\gamma_s = 1 + \beta \cdot \rho \cdot v_s$  – частичный коэффициент нагрузки;

$\gamma_M = \frac{1}{1 - \beta \cdot \rho \cdot v_R}$  – частичный коэффициент сопротивления.

На рис. 3 показан график разделительной функции. Как видно, в области, где  $\frac{\sigma_R}{\sigma_S} > 1$ ,  $\rho$  изменяется сравнительно медленно, и для имеющих смысл значений  $\frac{\sigma_R}{\sigma_S}$  можно принимать  $\rho = 0,75$ .

Полученные соотношения позволяют проверить кран на соответствие требованиям закона [1] и проекта технического регламента [2] по прочности при заданной вероятности отказа.

Приведенные соображения дают возможность наметить направления актуальных работ для формирования норм расчета кранов по предельным состояниям.

Поскольку распределение нагрузок признается близким к нормальному закону, можно записать  $\bar{S} = \sum \bar{S}_i$  и  $\sigma_s = \sqrt{\sum \sigma_i^2}$ , где  $\bar{S}_i$  и  $\sigma_i$  – средние и стандартные отклонения нагрузок, входящих в расчетную комбинацию. Эта информация необходима и достаточна для расчета. Средние значения нагрузок, одновременно являющиеся их нормативными значениями, определяют на основании характеристик крана, его механизмов, размеров и т.п. Мерой рассеяния нагрузок относительно нормативных является стандартное отклонение, необходимое для расчета каждой нагрузки. Поэтому можно констатировать, что для дальнейшего развития расчетов кранов по предельным состояниям особую актуальность приобретают работы, направленные на систематическое изучение и пос-



строение методов расчета стандартных (средних квадратических) отклонений отдельных составляющих нагрузок. Их можно находить путем математического или физического моделирования, либо путем испытания прототипа. Результаты этих исследований могут использоваться при разработке национальных стандартов, гармонизированных с проектом технического регламента [2].

### Выводы

➤ В Законе «О техническом регулировании» и технических регламентах (проектах), регламентирующих требования к кранам и другим подъемным сооружениям, устанавливаются значения допускаемых вероятностей отказов с учетом тяжести вреда (риски), являющиеся исходными данными при проектировании.

➤ Для подавляющей части подъемных сооружений, за исключением башенных и стреловых кранов, отсутствуют нормы расчета, основанные на вероятностных подходах. Таким образом, нет возможности при создании подъемных сооружений учитывать значения допустимых рисков и проверять значения рисков для существующих подъемных сооружений.

➤ Опыт создания норм расчета по предельным состояниям в России и развитие в последнее время за рубежом подходы (международный стандарт ИСО 2394 и работы объединенных комитетов по безопасности конструкций) позволяют восполнить отмеченный пробел в нормативной литературе для подъемных сооружений и разработать стандарты, гармонизированные с требованиями закона «О техническом регулировании» техническими регламентами.

➤ В статье приведена концепция построения гармонизированных стандартов и установлены направления научных работ с целью разработать методы получения конкретных технических данных для включения их в гармонизированные стандарты.

### Список литературы

1. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.02 N 184-ФЗ.



2. Технический регламент «О безопасности подъемно-транспортного оборудования и процессов его эксплуатации» (проект).
3. Коган И.Я. Строительные башенные краны. – М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1974.
4. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. – М.: Государственное изд-во по строительной литературе, 1947.
5. Зарецкий А.А. Развитие теории расчета грузоподъемных кранов по предельным состояниям: Дис... д-ра техн. наук. – М. 1982.
6. ГОСТ 13994–75 (81) Краны башенные строительные. Нормы расчета.
7. Краны башенные строительные. Нормы расчета. РД 22-166–86.
8. Краны стреловые самоходные. Нормы расчета устойчивости против опрокидывания. РД 22-145–85.
9. ISO 8686-1 Cranes-Design principles for loads and load combinations – Part 1: General.
10. BS EN 13001-1 Crane safety-General design – Part 1: General principles and requirements.
11. ISO 2394: 1998 (E) General principles on reliability for structures.
12. The JCSS Probabilistic Model Code 2001, [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch).