



Рис. 4. Зависимость уровня безопасности лифта E от срока эксплуатации T

качественные показатели уровня их безопасности.

Путем корректировки ресурсных показателей различных элементов лифта за назначенный срок можно обосновать модернизацию лифта после 15 лет эксплуатации и замену опасных с точки зрения безопасности его элементов.

Наличие такой информации и приведенный алгоритм действий способствует повышению безопасности перемещения пассажиров при эксплуатации лифтов.

## Литература

1. Зорин В.А., Даугелло В.А., Севрюгина Н.С. Требования безопасности к наземным транспортным системам: учеб. – Белгород: БелГТУ, 2009. –186 с.
2. Севрюгина Н.С. Теория формирования технической безопасности полного жизненного цикла транспорт-

ных и технологических машин: моногр. – Белгород: БГТУ, 2012. – 179 с.

3. Севрюгина Н.С., Степанов М.А., Мечиев А.В. Общеметодологический подход к оценке риска обеспечения конструктивной безопасности лифтов // Механизация строительства. – 2017. – Т. 78. – № 4. – С. 24-29.

4. Степанов М.А., Мечиев А.В. Моделирование системы технического обслуживания парка лифтов // Научное обозрение. – 2016. – №3. – С. 27-32.

5. Теличенко В.И., Завалишин С.И., Хлыстунов М.С. Глобальные риски и новые угрозы безопасности ответственных строительных объектов мегаполиса // Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан : сб. докладов тематической науч.-практ. конф. – М.: МГСУ, 2005. – С.211-218.

6. Baurova N.I., Zorin V.A., Prikhodko V.M. Manifestation of a synergistic effect in technological heredity. Polymer Science. Series D. – 2016. – Vol. 9. – No 2. – Pp. 209-211.

7. Volkov A.A., Roytman V.M., Shilova L.A. Model of stability of life support systems in emergency situations // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11. – No 3. – Pp. 1666-1669.

8. Севрюгина Н.С., Степанов М.А.

Vertical transport: resource by the criterion of safety. Вертикальный транспорт: корректировка ресурса по критерию безопасности // Инженерно-строительный журнал. – №7. – 2017. – С. 23-35 doi: 10.18720/МСЕ.75.3.

9. Веригин Ю.А., Толстенов С.В. Синергетические основы процессов и технологий: монография. – Барнаул: АлтГТУ, 2007. –158 с.

10. Поляков Ю.И. Теория проявления опасности: основные задачи стратегии технического регулирования безопасности техническими регламентами // Вестник научного центра. – 2008. – № 2. – С. 154-164.

11. Технический регламент таможенного союза «Безопасность лифтов» ТР ТС 011/2011.

12. Правила организации безопасного использования и содержание лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек) и экскаваторов, за исключением эскалаторов метрополитенов. Утв. постановлением Правительства России от 24 июня 2017 г. № 743.

М.А. Степанов.  
Тел. (phone) 909-913-65-26.  
E-mail: masmias@mail.ru  
Б.А. Кайтуков, А.В. Мечиев.  
Тел. (phone) 499-183 46-83.



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМ РАСЧЁТА БАШЕННЫХ КРАНОВ

Анатолий Абрамович ЗАРЕЦКИЙ, д-р техн. наук, профессор, эксперт по краностроению,

Николай Ильич ИВАШКОВ, канд. техн. наук, президент

Межрегиональная общественная организация «Подъемно-транспортное научно-техническое общество» (МРОО РОСПТО)

Виктор Леопольдович ЛИФШИЦ, канд. техн. наук, заместитель генерального директора,

Александр Викторович НАУМОВ, генеральный директор

ООО «КТБ Кран», г. Москва

Александр Игоревич СОКОЛОВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

ГНЦ РФ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», г. Москва

Рассмотрены методы расчета, регламентированные существующими нормативными документами, в сравнении с предлагаемым проектом нового стандарта. Показаны преимущества последнего.

Ключевые слова: башенные краны, металлоконструкции, нормы расчета, напряжения, деформации, приспособляемость, коэффициенты надежности, метод конечных элементов, упругопластический расчет.

Выполнение расчетов башенных кранов регламентировано выпущенными в последние годы стандартами [1-3], в которых изложены методы расчёта по допускаемым напряжениям и предельным состояниям, методы определения нагрузок [1, 2] и способы проверки прочности узлов металлоконструкций [3]. Однако на практике использование указанных документов для расчётов башенных кранов связано с целым рядом проблем. Для их устранения специалистами КТБ «Кран», МРОО РОСПТО и ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» разработана и представлена на обсуждение первая редакция проекта стандарта организации (СТО) МРОО РОСПТО «Краны башенные строительные. Нормы расчёта металлоконструкций. Нормы расчёта устойчивости» (далее – СТО РОСПТО) [4]. В данной статье рассмотрены, сопоставлены и проанализированы основные положения действующих стандартов [1-3] и названного проекта [4].

Согласно ГОСТ 32579.1-2013 (п. 5.3.5) [1] «значения коэффициентов надёжности, приведенные в данном стандарте, предназначены для расчётов, в которых действующие напряжения вычисляются с помощью теории сопротивления материалов при условии упругого деформирования элементов конструкций...». В соответствии с ГОСТ 33169-2014 (п. 5.1.2) [3] «расчётные напряжения в элементах конструкции вычисляются от действия внешних нагрузок по проектным размерам в предположении абсолютно упругой работы материала, без учёта концентрации напряжений, допусков на изготовление, остаточных напряжений и сварочных деформаций», то есть традиционными способами, без привлечения апробированной многолетней практикой известных методов, базирующихся на использовании современной вычислительной техники. Другими словами, упомянутые современные национальные стандарты рассматривают только «абсолютно упругие» конструкции и рекомендуют к

применению методы прочностных расчётов, относящиеся к работе крановых металлоконструкций исключительно в упругой области.

Попутно отметим, что расчеты по стандарту [3] ведут к завышению величины ветровой нагрузки рабочего состояния. В нем указано, что эта нагрузка  $p_w$  равна «сумме статической и динамической составляющих»:  $p_w = (1+3m_n x)Kp$ , где  $m_n$  и  $x$  – коэффициенты, соответственно, пульсации ветра и динамический,  $K = 1$  (для рабочего состояния) – коэффициент срока службы,  $p$  – статическая ветровая нагрузка. Коэффициенты  $m_n$  и  $x$  в [3] приняты по РД 22-16-86 [5], где величина  $pm_n x$  – случайная ветровая нагрузка (в терминах [5]). Из приведенной формулы видно, что динамическая составляющая по [3] равна утроенной случайной нагрузке по [5]. Из опыта расчёта башенных кранов по [5] известно, что  $m_n x = 0,12 \dots 0,15$ , то есть в рабочем состоянии динамический коэффициент по [3] равен  $p_w/p = 1,35 \dots 1,45$ . С учётом коэффициента надёжности по [3]  $\gamma_p = 1,22$  общий коэффициент увеличения нагрузки равен  $\gamma_p p_w/p = 1,65 \dots 1,77$ , в то время как величина суммарного коэффициента перегрузки при расчёте по [5] обычно не больше 1,4. Существенное завышение величины этой нагрузки в [3] подтверждается контрольными расчётами башенных кранов, выпускаемых много лет серийно. Сказанное заставляет с осторожностью относиться к рекомендациям [3], так как нормы расчета являются не только техническим, но и юридическим документом.

С учетом указаний [1-3], на практике нередко выполняют расчёты крановых конструкций в упругой стадии («упругий расчёт») с использованием программ метода конечных элементов (МКЭ). Обычно подобные расчёты обнаруживают в рассчитываемых конструкциях места со значительной концентрацией напряжений, в которых расчётные напряжения  $\sigma$  превышают предел теку-

чести  $\sigma_T$ . Поскольку расчёты входят в состав сопровождающих кран обязательных документов, и нарушение условий прочности в них недопустимо, авторы расчетов, подразумевая, что указанные превышения физически невозможны, вынуждены добиваться, чтобы в расчётах перенапряжения не указывались. С этой целью в зонах с концентрацией напряжений применяют увеличенные конечные элементы. В расчётах МКЭ без применения специальных средств получают средние значения напряжений для каждого конечного элемента. В увеличенных элементах перенапряжения не проявляются. Однако подобные расчёты лишены смысла, поскольку не выявляют наиболее опасных зон конструкции.

Согласно [1], если определение напряжений «произведено более точными методами (экспериментальными или численными), обеспечивающими учёт существенных видов концентрации напряжений, то... коэффициенты надёжности и запаса могут быть снижены». При этом в [1] не поясняется, что представляет собой «существенный вид концентрации напряжений». Аналогичное указание содержится в [3] (п.п. 5.1.3 и 5.1.4): «Для подтверждения работоспособности конструкций, кроме методов, представленных в данном стандарте, могут быть использованы иные методы, адекватность которых должна быть подтверждена опытом применения, испытаниями или сопоставлением с известными нормативными подходами... Для анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции допускается применять метод конечных элементов».

Очевидно, что при выявлении «упругим расчётом» большой концентрации напряжений, когда  $\sigma > \sigma_T$ , нужно переходить к расчёту с учётом пластичности металла – «упругопластическому расчёту». В этом случае вместо концентрации напряжений выявляют напряжения, равные  $\sigma_T$ , и пластические деформации. В стандартах [1, 3] воз-

возможность расчёта с учётом пластических деформаций даже не упоминается, содержатся лишь общие рекомендации о применении других методов расчёта, в том числе МКЭ, без конкретных указаний по их использованию.

Такие указания по выполнению «упругопластического расчёта» крановых конструкций предложены в проекте СТО РОСПТО [4], предназначенном для использования взамен стандартов [1-3] при расчётах башенных кранов. Разрабатываемый стандарт [4] является новой, основанной на современной технологии прочностных расчётов, версией РД 22-166-86 [5]. В редакции норм [5] полностью воспроизведен текст ГОСТ 13994-81, разработанного институтом ВНИИСтройдормаш на основе большого комплекса многолетних теоретических и экспериментальных исследований. Их результаты отражены в одной докторской [6] и нескольких кандидатских диссертациях, монографии [7], более чем в десяти научно-технических отчётах, сопоставительных расчётах башенных кранов по проекту ГОСТ 13994-81 и ряде стандартов европейских стран. РД 22-166-86 и ГОСТ 13994-81 стали первыми и в продолжение десяти лет оставались единственными в мире нормами расчёта кранов по предельным состояниям.

В течение четверти века на основе требований РД 22-166-86 и ГОСТ 13994-81 разрабатывались все строительные башенные краны в СССР и России. При регулярном обслуживании и выполнении плановых ремонтов срок эксплуатации кранов в домостроительных комбинатах составляет более 30 лет, их замена производится, в основном, из-за морального старения. Длительная эксплуатация огромного парка башенных кранов подтвердила обоснованность норм [5], расчёты с их использованием обеспечивают достаточную прочность крановых конструкций и устойчивость кранов против опрокидывания. Подтвержденные практическим опытом достоинства указанных

нормативных документов полностью сохранены в редакции проекта СТО РОСПТО [4].

В [4] проверку прочности металлоконструкций рекомендуется проводить по указаниям СНиП [8], в [4] лишь приведены формулы для расчёта решетчатых стержней типа стрел и башен на кручение, отсутствующие в [8]. РД 22-166-86 и ГОСТ13994-81 ориентированы на выполнение расчётов методами сопротивления материалов без использования компьютерной техники, поскольку в период создания этих документов соответствующие средства автоматизации расчетных работ еще не имели широкого распространения, а программных комплексов для расчетов не было вовсе. Это ограничивало возможности расчетов пространственных криволинейных конструкций листовых элементов рам, платформ опорно-поворотных устройств в зонах их опирания и др. Тензометрия сложных конструкций не давала полной картины их напряженного состояния. В подобных случаях разработчики выбирали заведомо завышенные толщины листов и оценивали принятые решения по результатам испытаний кранов, хотя было известно [7], что при стандартных испытаниях в некоторых элементах крановых конструкций напряжения меньше, чем при эксплуатации с расчетными нагрузками. Положение изменилось с началом использования сертифицированных расчетных комплексов. Применение компьютеров позволило при упругом расчёте найти многочисленные зоны концентрации напряжений, а при упругопластическом расчёте в этих местах, вместо концентрации напряжений, – зоны пластических деформаций. Это обусловило необходимость установления предельно допустимых величин пластических деформаций при одноосном напряженном состоянии или интенсивности пластических деформаций при плоском напряженном состоянии.

В общем виде будем рассматри-

вать интенсивность пластических деформаций  $\varepsilon$ . Достижение ее предельных значений  $[\varepsilon]$  при повторно-переменных нагружениях конструкций за пределами упругости возможно в трех характерных случаях:

- знакопеременная пластическая деформация, при которой в результате повторных нагружений возможна малоцикловая усталость. Опасность возникновения малоциклового усталости создается при значениях  $\varepsilon$ , близких к 0,01 [9];

- постоянная по знаку пластическая деформация, нарастание которой с каждым циклом при большом числе нагружений приводит к недопустимо большой пластической деформации, вызывающей разрушение конструкции;

- прекращение после одного или нескольких циклов роста пластической деформации и переход к чисто упругому поведению при деформировании – приспособляемость. Важнейшим фактором приспособляемости является наличие остаточных напряжений в опасных местах конструкции. Эти напряжения, например, сжатия, складываются с рабочими растягивающими напряжениями, и их сумма при любом значении заданной нагрузки всегда меньше предела текучести материала.

Наглядным примером приспособляемости может служить случай при приемочных испытаниях крана-путьеукладчика. После первого подъёма и опускания испытательного груза его стрела опустилась на 150 мм, но при последующих подъёмах этого и меньших по величине грузов она после разгрузки возвращалась в исходное положение, то есть при подъёме грузов происходили только упругие деформации.

Теория приспособляемости является разделом теории пластичности, ее основой служат статическая и кинематическая теоремы приспособляемости (обзор работ по приспособляемости приведен в [10]). Непосредственное применение этих теорем для проверки приспособляемости конструкции затру-

днительно из-за их сложности, но это и не требуется. Если в стержневых конструкциях можно специально сконструировать систему, в которой при разгрузке отсутствуют остаточные напряжения, то в конструкциях из пластин, оболочек или массивных тел они, практически, всегда присутствуют и, следовательно, всегда возникает приспособляемость. Возможность проверки приспособляемости конструкций после первого и второго нагружений прямыми расчётами обеспечивается использованием МКЭ.

Приспособляемость возникает также после вступления в работу прокатных профилей и сварных элементов, в которых после прокатки и сварки всегда присутствуют значительные внутренние напряжения, величины которых тем выше, чем больше и сложнее профили. Например, в крупных номерах двутавров они могут достигать 30-50% предела текучести стали [11]. Ни в одной из известных отечественных и зарубежных методик расчёта металлоконструкций остаточные напряжения после прокатки и сварки не учитываются. Расчёты конструкций из прокатных профилей и сварных деталей ведутся в предположении, что до первого нагружения они абсолютно не напряжены. Другими словами, существующие нормы расчета металлоконструкций подразумевают, что приспособляемость полностью компенсирует любые внутренние напряжения в их элементах.

Как отмечалось, для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций с пластическими деформациями необходимо установить предельно допустимую величину интенсивности пластических деформаций  $[\varepsilon]$ . Вопрос о назначении  $[\varepsilon]$  обсуждался в отечественной литературе еще в 80-е годы прошлого столетия [12-15]. В [13] конструкции делятся на четыре группы в зависимости от режима нагружения и вида напряженного состояния. В конструкциях первой группы, самой тяжелой, пластические деформации не

допускались. В эту группу входили подкрановые балки тяжелого режима работы и некоторые типы узлов. Для наиболее легкой, четвертой группы, принимали  $[\varepsilon] = 0,004$ . В период разработки [13] расчеты крановых металлоконструкций МКЭ еще не применяли, и определение интенсивности пластических деформаций оставалось трудоемкой задачей. По-видимому, этим объяснялся столь осторожный подход к назначению  $[\varepsilon]$  для самых малонагруженных конструкций.

За минувшие десятилетия накопился большой объем данных поверочных расчетов металлоконструкций из сталей 09Г2С и 10ХСНД, выполненных с использованием МКЭ и относящихся к кранам, разработанным без применения этого метода. При переходе к упругопластическому расчету МКЭ фиксировались зоны с пластическими деформациями и определялась интенсивность пластических деформаций  $\varepsilon$  в этих зонах. Выяснилось, что в ходовых рамах, поворотных платформах и других узлах многих успешно работающих башенных кранов очень часто встречаются зоны пластических деформаций с  $\varepsilon = 0,005-0,006$  и даже 0,008. Поэтому применяемую в некоторых заводских стандартах норму  $[\varepsilon] = 0,004$  можно считать достаточно обоснованной. Её можно применять для разрешенных к использованию в кранах сталей с пределом текучести  $\sigma_T \leq 400$  МПа. Она же предлагается и в проекте [4]. Вероятно, после проведения специальных исследований на основе упругопластического расчета элементов с построением соответствующих диаграмм деформирования указанное нормативное значение [4] можно будет увеличить.

Нужно отметить, что в некоторых крановых элементах, например, крюках, испытывающих давление звеньев стропов, проушинах в зонах смятия и др., пластические деформации возникают уже при первых нагружениях в местах контактирования деталей. При этом оценка их прочности не учитыва-

ет наличия пластических деформаций.

Иначе обстоит дело при подвижных нагрузках. В [13] для конструкций, воспринимающих подвижные нагрузки, предлагается  $[\varepsilon] = 0,001$ . Однако, известно, что в главных балках мостовых кранов остаточный прогиб за время эксплуатации может увеличиваться. Поэтому в элементах металлоконструкций, непосредственно воспринимающих подвижные нагрузки, рекомендуется не допускать появления пластических деформаций.

В [4] приведены подробные указания, формулы и расчётные схемы, не нашедшие отражения в стандартах [1, 2], но обязательные при выполнении расчетов башенных кранов. Так, согласно [4], при выполнении деформационных расчетов не требуется проверка общей устойчивости стрелы, гуська и башни; при выборе расчетных схем не учитываются усилия, возникающие вследствие деформаций и разгружающие рассчитываемые элементы металлических конструкций. В [4] даны формулы для определения: начального прогиба стрелы (гуська) в плоскости подвеса; моментов инерции поперечных сечений эквивалентных стержней, заменяющих решетчатые стрелы, гуськи и башни при изгибе; усилий в решетке стрел и башен, возникающих вследствие сжатия поясов; усилий в стреле и башне от кручения. Проект [4] учитывает эксцентриситеты в узлах решетки стрел, гуськов, башен, порталов и др. В нем содержатся методики: определения усилий в ездовом поясе балочной стрелы; проверки местной устойчивости листовых конструкций; определения реакций опор при 3- и 4-опорном контуре. Рассмотрены вопросы: предельных отклонений кранового пути от проектной схемы по высоте; податливости пути. Даны подробные указания по расчету устойчивости кранов против опрокидывания в рабочем и нерабочем состояниях, при монтаже, а также расчету стрел против запрокидывания – в [1, 2] эти вопросы лишь упоминаются.

При расчёте сопротивления усталости узлов башенных кранов по [3] используются нормативные пределы выносливости по нормальным и касательным напряжениям для рассматриваемого узла. Эти пределы выносливости, зависящие от коэффициента концентрации напряжений в рассматриваемом узле, устанавливаются в зависимости от конструктивных признаков узла по таблице, приведенной в приложении к стандарту [3], где содержатся данные для ограниченного числа узлов из множества их видов, встречающихся в башенных кранах. Для узлов, не включенных в таблицу, необходимые параметры, нормативные пределы выносливости, должны приниматься приближенно, по аналогии с узлами, приведенными в таблице. При такой методике, полученные результаты могут значительно отличаться от действительных значений. Точный расчёт по [3] возможен только для узлов, рассмотренных в упомянутом приложении.

Расчёт любых узлов металлоконструкций на усталость можно выполнить МКЭ по специальным программам, разработанным для специализированного вычислительного комплекса. При этом в процессе расчёта вычисляются характеристики напряженного состояния с учётом концентрации напряжений в любой опасной зоне расчётной геометрической модели. Для учёта концентрации напряжений в опасных зонах расчётная модель должна быть выполнена из пространственных элементов при любой толщине металла в рассматриваемой конструкции.

В сравнении с [1-3] расчёты металлоконструкций башенных кранов по [4] имеют следующие преимущества.

1. Даны указания применительно к любым узлам металлоконструкций, в том числе, требующим проведения как упругих, так и упругопластических расчётов с использованием МКЭ. [1-3] содержат расчёты, выполняемые исключительно традиционными методами сопротивления материалов.

2. Содержатся подробные указания по выполнению расчётов металлоконструкций, не нашедшие отражения в стандартах [1-3].

3. Даны указания по выполнению расчётов кранов на сопротивление усталости с использованием МКЭ.

4. В определении ветровой нагрузки устранены ошибки стандартов [1, 2].

Применение при проектировании современных методов расчёта, изложенных в проекте СТО РОСПТО [4], должно обеспечить высокие надёжность и конкурентоспособность отечественных башенных кранов.

## Литература

1. ГОСТ 32579.1-2013. Краны грузоподъёмные. Принципы формирования расчётных нагрузок и комбинаций нагрузок / Часть 1. Общие положения. – 31 с.

2. ГОСТ 32579.3-2013. Краны грузоподъёмные. Принципы формирования расчётных нагрузок и комбинаций нагрузок / Часть 3. Краны башенные. – 8 с.

3. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъёмные. Металлические конструкции / Подтверждение несущей способности. – 51 с.

4. Краны башенные строительные. Нормы расчёта металлоконструкций. Нормы расчёта устойчивости / Проект СТО РОСПТО. – Взамен РД 22-166-86. – М.: МРОО РОСПТО, 2018. – 29 с.

5. РД 22-166-86. Краны башенные строительные. Нормы расчёта. – 1986. – 62 с.

6. Зарецкий А.А. Развитие теории расчёта грузоподъёмных кранов по предельным состояниям : дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1982. – 440 с.

7. Невзоров Л.А., Зарецкий А.А., Волин Л.М., Лифшиц В.Л., Смородинский И.М. Башенные краны. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.

8. СП 16-13330-2011. Свод правил. Стальные конструкции / Актуализированная редакция СНиП II-23-81. – 2011. – 172 с.

9. Писаренко Г.С., Яковлев А.И., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 735 с.

10. Чернявский О.Ф. Теория приспособляемости и ее практическое применение: к 100-летию этого раздела механики и 50-летию его развития в ЧПИ-ЧГТУ-ЮУрГУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – Т. 13. – №2. – 2013. – С. 4-18.

11. Кацнельсон Г.М. Снижение металлоёмкости проката. – Киев: Техніка, 1983. – 152 с.

12. Стрелецкий Н.Н., Бельский Г.Е., Любаров Б.И., Чернов Н.Л. Расчёт элементов стальных конструкций по критерию ограниченных пластических деформаций (на прочность) // Промышленное строительство. – 1978. – № 5. – С. 16-18.

13. Рекомендации по расчёту стальных конструкций на прочность по критерию ограниченных пластических деформаций / ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова. – М., 1985. – 48 с.

14. Стрелецкий Н.Н., Чернов Н.Л. Реализация деформационного критерия предельного состояния по прочности стальных конструкций // Развитие металлических конструкций / Работы школы Н.С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 111-120.

15. Бельский Г.Е. Основы норм расчёта стальных конструкций за пределом упругости и пути их совершенствования // Развитие металлических конструкций / Работы школы Н.С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 125-135.

Н.И. Ивашков. Тел. (phone) 495-993-10-25; e-mail: ptd@npp-pts.ru  
В.Л. Лифшиц. Тел. (phone) 916-313-50-31; e-mail: v.lifshitz@mail.ru  
А. И. Соколов. Тел. (phone) 910-479-84-38; e-mail: falcon\_a@list.ru

