

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ НОРМ РАСЧЕТА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Дмитрий Григорьевич ШИМКОВИЧ, д-р техн. наук,
профессор, эксперт ISO, заместитель начальника
отдела
ООО «Кудесник», г. Москва

Производится сравнительный анализ отечественных и зарубежных (международных ISO, европейских EN) норм расчета нагрузок на грузоподъемные краны, методов их расчета на прочность и устойчивость от опрокидывания, в котором основное внимание уделяется различиям в указанных нормах. Приводятся рекомендации по гармонизации отечественных норм.

Ключевые слова: краны грузоподъемные, нормы расчета, стандарты, нагрузки, прочность.

В основе проектирования грузоподъемных кранов находится определение действующих нагрузок и выполнение необходимых критериев работоспособности – прочности, упругой устойчивости, усталостной долговечности, устойчивости от опрокидывания и др. Высокая степень ответственности конструкций грузоподъемных машин и имеющих рисков при их эксплуатации требуют решать проблемы обеспечения надежной, безопасной работы кранов с реализацией конкурентоспособных характеристик их конструкций по грузоподъемности, массе и т.д. на основе четко определенных норм расчета.

Существующие в Российской Федерации (РФ) нормы расчета кранов – стандарты, руководящие документы (РД) и др. разрабатывались, как правило, в 80-х годах прошлого столетия и на протяжении последних более 20 лет практически не обновлялись. Напротив, международные (ISO), европейские (EN) и др. стандарты и нормативные документы систематически пересматриваются, имеют во многих случаях отличные от отечественных подходы к решению указанных выше проблем. В связи с этим, а также определенной интеграцией РФ в мировую экономику, расширением рынков сбыта и импорта продукции возникает задача сравнительного анализа отечественных и зарубежных норм с целью оценки их взаимного соответствия и использования накопленного полезного опыта при новом проектировании отечественных грузоподъемных кранов.

В целом данная проблема очень широка. В статье этот анализ проведен с использованием основополагающих для определения нагрузок и расчета критериев работоспособности грузоподъемных кранов зарубежных стандартов ISO

8686 [1], EN 13001 [2, 3] и отечественных документов РД [4, 5] и др., относящихся преимущественно к стреловым самоходным кранам, в расчетах которых автор имеет многолетний опыт.

В последней редакции 2012 г. стандарт ISO 8686 перенял очень многое от европейского стандарта EN 13001, что позволяет рассматривать их в значительной степени как идентичные. При этом основные принципы расчета и определения нагрузок сформулированы в общей части стандартов для всех типов кранов с учетом их специфических особенностей, рассматриваемых в специальных частях.

Отечественные нормы, хотя и выпускались для отдельных типов кранов (стреловые самоходные, башенные и др.), во многом имеют общую научную и методическую основы. Поэтому использование указанных выше РД для стреловых самоходных кранов не нарушает общность подхода к анализу и основных выводов.

Методы расчета

В отечественных нормах расчета металлических конструкций кранов [4, 6] используется только метод предельных состояний, который формулируется для отдельных внутренних силовых факторов (усилий, моментов) в элементах конструкции или компонент тензора напряжений (нормальных или касательных) в следующем виде (на примере напряжений)

$$K \cdot \sigma^H \leq m_0 \cdot R^P, \quad (1)$$

где K – общий коэффициент нагрузки, $K = 1 + K_1 K_2$,

K_1 – коэффициент надежности,

$K_2 = \sigma^c / \sigma^H$ – коэффициент изменчивости нагрузки,

$\sigma^H = \sum \sigma_i^H$ – суммарное напряжение (нормальное или касательное) от нормативных составляющих нагрузок,

σ_i^H – напряжение от i -ой нормативной нагрузки,

$\sigma^c = \sqrt{\sum (\sigma_i^c)^2}$ – суммарное напряжение от среднеквадратичных отклонений (СКО) случайных составляющих нагрузок,

σ_i^c – напряжение от СКО i -ой случайной нагрузки,

$m_0 = m_1 m_2$ – коэффициент условий работы,

m_1 – коэффициент ответственности,

m_2 – коэффициент, учитывающий особенности работы элемента или части металлической конструкции,

R^P – расчетное сопротивление материала.

Формула (1) соответствует положениям теории вероятностей при рассмотрении нагрузок, действующих на элементы конструкции крана, как совокупности нормативных (основных, детерминированных) и случайных составляю-

щих, оцениваемых по их СКО. Однако при ее использовании возникают следующие проблемы.

1. Оценка прочности конструкции по отдельным компонентам тензора напряжений (или внутренних силовых факторов) не является корректной с позиций механики деформируемых сред, хотя такой подход принят в ряде инженерных расчетов. Оценка прочности должна производиться на основе наиболее подходящей для используемого материала теории прочности и величины соответствующего эквивалентного напряжения.

2. Ввиду наличия квадратного корня в выражении для суммарного напряжения от СКО составляющих нагрузок любая система «конструкция – нагрузки» сразу становится нелинейной. При этом нарушается принцип суперпозиции для систем, которые с высокой степенью точности можно считать линейными.

3. Отсутствует разделение случайных составляющих нагрузок на динамические факторы (нет коэффициентов динамичности) и прочие причины. Это затрудняет учет динамических составляющих нагрузок, которые могут быть оценены с помощью уточняющих расчетных моделей.

4. Становится практически невозможным использование современных пакетов компьютерного моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ), которые в настоящее время являются фактическими стандартами в прочностных расчетах (см. например, [7]). Процедура анализа, если строго следовать идеологии соотношения (1), будет следующей: необходимо рассчитывать поля напряжений в конструкции от нормативных нагрузок и отдельно для СКО каждой случайной составляющей, определять суммы их квадратов, извлекать квадратный корень и т.д., что потребует от пользователя создания специальной процедуры в любом пакете конечно-элементного анализа. Такой путь не является оправданным, поскольку в пакетах МКЭ стандартным для оценки напряженного состояния является поле эквивалентных напряжений.

5. Не регламентировано использование метода допускаемых напряжений, который во многих случаях является более надежным и ясным для расчетчика при оценке напряженно-деформированного состояния конструкции.

По этим причинам в практике расчета крановых конструкций последних десятилетий с применением пакетов МКЭ соотношения типа (1) фактически не используются, хотя они регламентированы нормативно. Для строительных конструкций в РФ и в зарубежных нормах расчета (см. ниже) подобные соотношения не применяются. Таким образом, отечественное краностроение осталось единственным «островком», где «прописано» их использование.

В зарубежных нормах (ISO 8686, EN 13001) расчет может проводиться по методам как предельных состояний, так и допускаемых напряжений. Условия прочности при

этом формулируются в следующем виде:

– для метода предельных состояний

$$\sigma(\gamma_n F_j) \leq \lim \sigma = \frac{R}{\gamma_m}, \quad (2)$$

– для метода допускаемых напряжений

$$\sigma(F_j) \leq adm \sigma = \frac{R}{\gamma_n \gamma_f}, \quad (2')$$

где σ – напряжение в конструкции;

$F_j = \sum \lambda_i f_i$ – j -я комбинация нагрузок от внешних воздействий (сил, моментов и т.д.) f_i , вычисляемых с учетом динамических эффектов (коэффициентов динамичности) $f_i = \varphi_i \cdot f_i^{ном}$, в которых φ_i – коэффициент динамичности, $f_i^{ном}$ – номинальное значение нагрузки; λ_i – коэффициент надежности по i -й нагрузке, учитывающий вероятную возможность превышения нагрузок f_i , при расчете по методу допускаемых напряжений и на усталостную прочность полагают все $\lambda_i = 1$;

$\lim \sigma, adm \sigma$ – предельное и допускаемое напряжения;

R – предельная характеристика материала или элемента конструкции – предел текучести, критическое напряжение упругой потери устойчивости, предел усталости и т.д. в зависимости от вида расчета;

γ_m – коэффициент надежности по материалу при расчете по методу предельных состояний;

γ_f – коэффициент запаса при расчете по методу допускаемых напряжений;

γ_n – коэффициент риска, учитывающий степень ответственности конструкции.

В данной структуре соотношений (2 - 2') исчезают отмеченные выше недостатки: оценка прочности может производиться по эквивалентному напряжению, в линейной системе не нарушается принцип суперпозиции, явно выделены динамические составляющие (коэффициенты динамичности φ_i), удобные для уточнения при использовании современных компьютерных пакетов программ и прочие причины (погрешности модели, неучтенные факторы и т.д. – параметры λ_i), могут использоваться методы как предельных состояний, так и допускаемых напряжений.

В связи с этим указанные соотношения получили повсеместное распространение, в том числе и при расчете строительных конструкций в РФ. В краностроении также следует использовать данные подходы в силу отмеченных их достоинств.

Нагрузки

Вопрос о нагрузках на краны объемный и многогранный, поэтому здесь ограничимся рассмотрением нагрузок, по которым имеются наиболее существенные расхождения в отечественных и зарубежных нормах расчета кранов.

Инерционные нагрузки при подъеме груза с поверх-

ности. Расчетный случай подъема груза с поверхности, когда привод разгоняется до того, как грузовой канат окажется под нагрузкой (подъем «с подхватом») является одним из основных при анализе нагруженности конструкции крана.

В отечественных нормах (на примере РД [4]) СКО возникающей при этом случайной (динамической) составляющей вертикальной нагрузки, которую обозначим как f_h^c , определяется по соотношению

$$f_h^c = K_5 \cdot G, \quad (3)$$

где $K_5 = 0,1 \cdot V_h$, $K_4 \leq K_5 \leq 0,15$, K_4 – коэффициент случайной составляющей СКО силы тяжести груза (см. [4]), V_h – скорость подъема груза, м/с, $G = Q \cdot g$ – нормативная составляющая силы тяжести груза, Q – масса груза (грузоподъемность), g – ускорение свободного падения.

При этом формула (3) используется вне зависимости от типа привода механизма подъема, группы режима его работы (опосредовано учитывается через коэффициент K_4), податливости конструкции крана. Она получена, по-видимому, на основе экспериментальных данных и теоретических оценок 70...80-х годов прошлого века и не учитывает имеющиеся в настоящее время различия в типах приводов и их систем управления.

В зарубежных нормах ISO 8686 (EN 13001) нагрузка при подъеме груза с земли (рис. 1), которую обозначим как f_h , вычисляется по соотношению

$$f_h = \varphi_2 \cdot G, \quad (4)$$

где $\varphi_2 = \varphi_{2min} + \beta_2 \cdot V_h$ – коэффициент динамичности, φ_{2min} , β_2 – коэффициенты, назначаемые в зависимости от выбранного класса подъема, обозначаемого как HC1, HC2, HC3, HC4 и класса привода (см. [1]).

Использование понятий класса подъема и класса привода оправдано, поскольку позволяет классифицировать динамику подъема груза, более дифференцированно учесть особенности проектируемого крана, его приводов и точнее, чем в отечественных нормах, оценить коэффициент динамичности на начальных стадиях проектирования. При проверочных расчетах можно использовать более полные динамические модели.

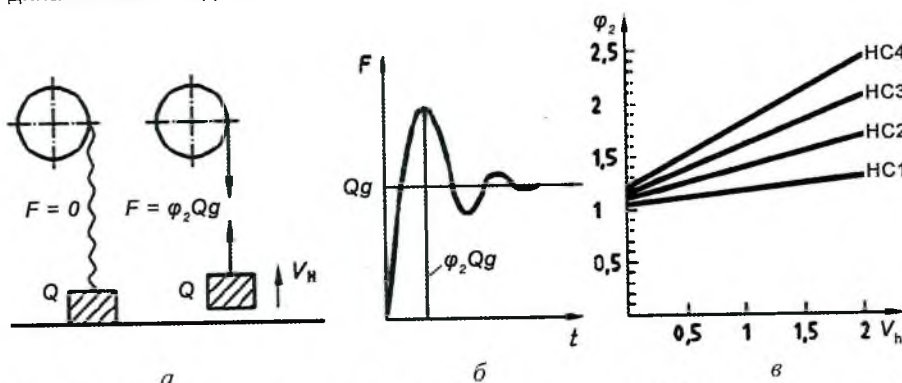


Рис. 1. Определение нагрузки при подъеме груза с земли (а), ее зависимость от времени (б) и зависимость коэффициента динамичности от скорости подъема при различных классах подъема (в)

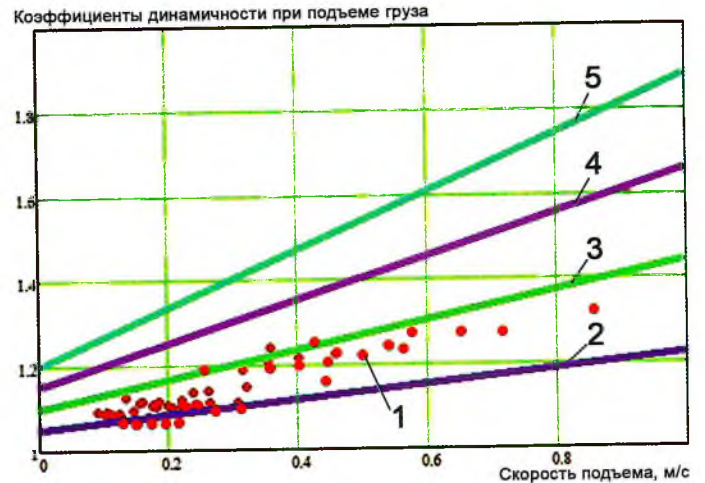


Рис. 2. Значения коэффициентов динамичности при подъеме груза в зависимости от скорости подъема: 1 – расчетные; 2, 3, 4, 5 – для классов подъема HC1, HC2, HC3, HC4 по EN соответственно

В качестве примера на рис. 2 представлены расчетные значения коэффициентов динамичности, полученные нами на основе анализа динамической упругой модели реального стрелового самоходного крана при различных массах груза, длинах стрел и вылетах в зависимости от скорости подъема груза и получаемые по (4) в зависимости от класса подъема. Видно, что для данного крана можно назначить класс подъема HC2.

В ISO 8686 [1] при оценке коэффициента динамичности по соотношению (4) вводится также дополнительный показатель – прогиб конца стрелы или другой характерной точки, позволяющий учесть податливость конструкции крана. Данный показатель, во-первых, существенно усложняет определение коэффициента динамичности на начальных стадиях проектирования, поскольку требуется определение прогибов еще не спроектированного крана и, во-вторых, не всегда дает удовлетворительные результаты. Здесь необходимы дополнительные апробации и корректировки.

Ветровые нагрузки. По ветровым нагрузкам в отечественных и зарубежных нормах имеются весьма существенные различия. Они касаются определения ветровой нагрузки

на груз, учета пульсаций ветра, изменения давления ветра по высоте.

В ISO 8686 в редакции как 1986 г., так и 2012 г., приводится только ссылка на стандарт ISO 4302 [8] по определению ветровых нагрузок. В ISO 4302 допускаются различные формы представления ветровой нагрузки на груз.

В EN 13001 детально описывается расчет ветровых нагрузок в рабочем и нерабочем состояниях.

Если сравнивать последние стан-



Параметры	Нормируемые различными стандартами значения параметров			
	ГОСТ 1451-77 ¹⁾	DIN 15018:1984	ISO 8686:2012 (ISO 4302:1981) ³⁾	EN 13001:2004
Коэффициент аэродинамической силы	1,2	1,2	-	2,4
Площадь груза, м ² (Q – грузоподъемность, т)	$3,6 \cdot \sqrt{Q}$ ²⁾	$1 \cdot Q$	-	$0,5 \cdot Q$
Коэффициент надежности по ветровой нагрузке	1	1,2	1,16...1,22	1,22

Примечания:

- 1) в [4] требуется учет пульсаций ветровых нагрузок,
- 2) формула получена аппроксимацией таблицы в ГОСТ 1451,
- 3) в ISO 4302 указывается нагрузка на груз $0,15Q$.

дарты с ГОСТ 1451 [9] и DIN 15018 [10], можно отметить следующие особенности.

Ветровая нагрузка на груз. Основные данные для определения ветровой нагрузки на груз по различным нормам приведены в таблице. Наиболее существенные различия между данными стандартами заключаются в определении расчетной площади груза (рис. 3).

Ветровая нагрузка на груз при расчете по нормам EN 13001 для кранов грузоподъемностью 60...100 т и более может в 2...3 раза превышать таковую, определенную по ГОСТ 1451 (рис. 4). В последнем стандарте не определена нагрузка на груз с массой более 100 т.

Изменение ветровой нагрузки рабочего состояния



Рис. 3. Зависимость площади груза от его массы, определяемая различными нормативными документами: 1 – ГОСТ 1451-77; 2 – EN 13001:2004; 3 – DIN 15018:1984

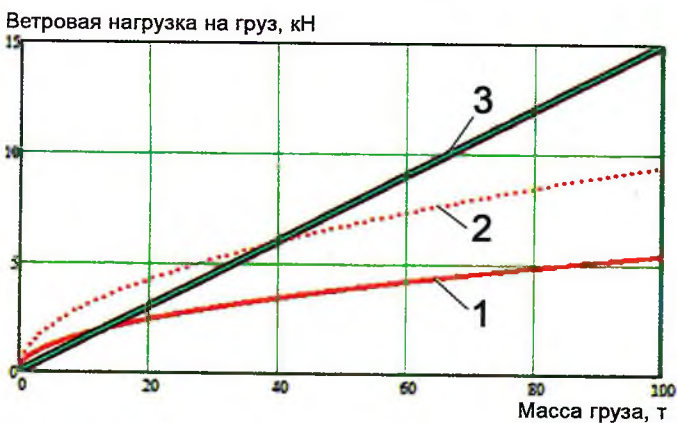


Рис. 4. Зависимость ветровой нагрузки на груз от его массы по различным нормативным документам: 1 – ГОСТ 1451-77; 2 – РД НИИКр-08-07 с учетом пульсаций; 3 – EN 13001:2004, DIN 15018:1984, ISO 4302:1981

по высоте. В ГОСТ 1451 изменение динамического давления ветра по высоте учитывается с помощью множителя – коэффициента ветровой нагрузки в зависимости от высоты, график изменения которого представлен на рис. 5.

В ISO 4302 (ISO 8686) допускается учитывать изменение динамического давления ветра по высоте (способ не указывается) или, как альтернативный вариант, считать его постоянным и равным ветровому давлению в верхней точке крана.

В EN 13001 ветровая нагрузка рабочего состояния считается постоянной по высоте при условии, что скорость ветра контролируется в наиболее высокой точке крана с помощью датчика. Такой подход представляется логичным при наличии датчика и упрощает расчет ветровых нагрузок без снижения уровня безопасности крана.

В результате указанных различий ветровая нагрузка, принимаемая при проектировании крана по отечественным и зарубежным нормам, может различаться в несколько раз, особенно при большой грузоподъемности.

Изменение ветровой нагрузки нерабочего состояния по высоте. При расчете ветровой нагрузки нерабочего состояния по ГОСТ 1451 и по EN 13001 также имеется ощутимая разница в учете изменения динамического давления ветра в зависимости от высоты расположения элемента конструкции крана. На рис. 6 показаны значения функции учета высоты.

В EN 13001 имеется параметр f_{rec} (интервал рекурсии – повторяемости), представленный на рис. 6 и учитывающий продолжительность эксплуатации крана T (лет) в рассматриваемом регионе. С увеличением продолжительности эксплуатации возрастает вероятность появления большой скорости ветра. При этом ветровая нагрузка по EN 13001

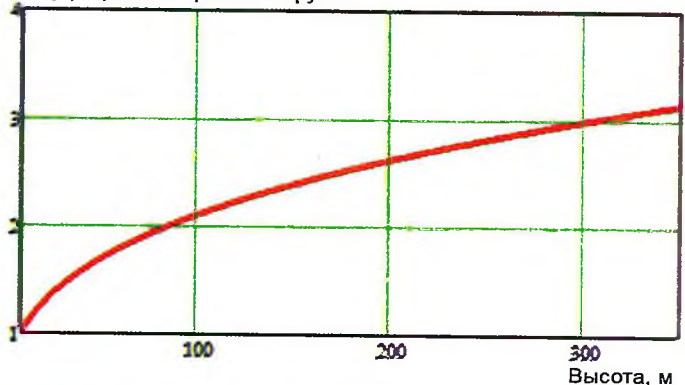


Рис. 5. Зависимость коэффициента ветровой нагрузки от высоты

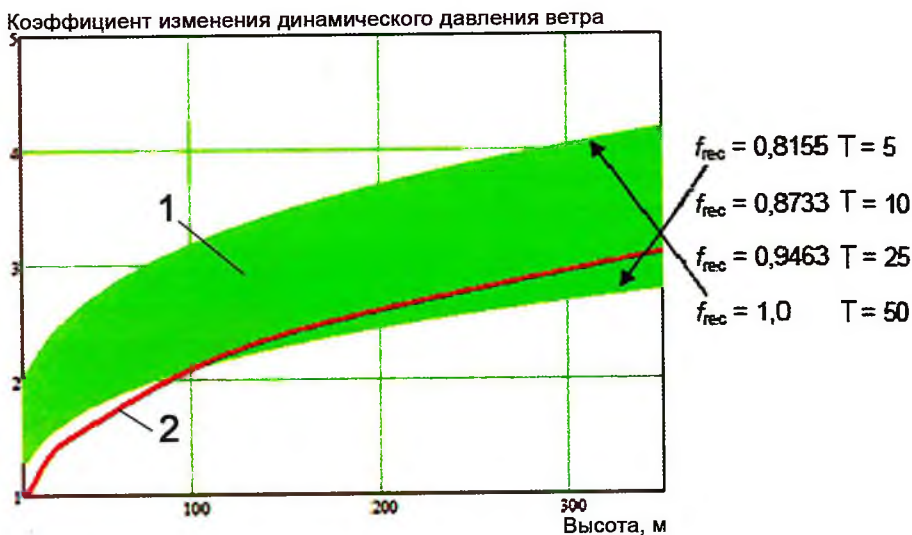


Рис. 6. Коэффициент изменения динамического давления ветра в зависимости от высоты с учетом интервала рекурсии f_{rec} при различной продолжительности эксплуатации крана T (лет): 1 – по EN 13001:2004; 2 – по ГОСТ 1451-77

может быть в 1,5...2 раза больше, чем по ГОСТ 1451.

В ISO 8686 (ISO 4302) допускается учитывать изменение динамического давления ветра по высоте или считать его постоянным.

В зарубежных нормах также отсутствует учет влияния колебаний конструкции крана на значения ветровых нагрузок.

Как резюме из данного рассмотрения ветровых нагрузок можно отметить следующее. Поскольку ГОСТ 1451 широко распространен в практике проектирования кранов в РФ, нет смысла отказываться от него до пересмотра. При необходимости гармонизации данного стандарта с зарубежными следует придерживаться принципа постепенности внесения изменений с необходимым интервалом их практической апробации.

Комбинации нагрузок

В отечественных нормах [4 - 6] нагрузки подразделяются на нормативные и случайные составляющие. Такое разделение соответствует структуре соотношений для условий прочности в форме (1). При этом выделяются 5...8 расчетных случаев нагружения (комбинаций нагрузок).

В зарубежных нормах ISO 8686 [1], EN 13001 [2, 3] нагрузки подразделяются на регулярные – всегда присутствующие при работе крана (от масс груза и элементов конструкции, от работы приводов), нерегулярные (ветровые, климатические воздействия) и исключительные (нерабочее состояние, испытания, монтаж и др.). Соответственно данной структуре нагрузок выделяются три группы их комбинаций – при воздействиях регулярных (Load combinations A с повышенными значениями коэффициентов надежности по нагрузкам λ_i), регулярных и нерегулярных (Load combinations B с нормальными значениями коэффициентов надежности),

с учетом необходимых регулярных, нерегулярных и исключительных воздействий (Load combinations C с минимальными значениями коэффициентов надежности). Такое разделение внешних воздействий на группы комбинаций нагрузок логично и должно быть сохранено в случае принятия условий работоспособности в форме (2, 2'). Всего в данных нормах 18...20 расчетных случаев нагружения для указанных комбинаций нагрузок.

Устойчивость кранов от опрокидывания

Отечественные нормы расчета устойчивости кранов от опрокидывания базируются на соотношениях,

подобных (1), и излагаются в РД для разных типов кранов [5, 6]. При этом имеют место проблемы, аналогичные отмеченным выше при анализе формулы (1).

В зарубежных нормах ISO 8686, EN 13001 устойчивость кранов от опрокидывания оценивается по методу предельных состояний на основе соотношений типа (2). Коэффициенты надежности при расчете на устойчивость от опрокидывания и на прочность различны, особенно для масс крана. При расчете на устойчивость от опрокидывания они устанавливаются равными 1,05...1,1 для опрокидывающих (unfavorable) и 0,95...1,0 для удерживающих (favorable) масс в зависимости от класса устойчивости: S1 – обычные условия для всех типов кранов или S2 – при надежной рабочей площадке, наличии системы индикации приближения неустойчивости, определении масс с погрешностью не более 2,5% и квалифицированном управлении краном.

Практика анализа устойчивости по разным нормам, например, по ISO 4305 [11], а также по DIN 15019-2 [12] со ссылкой на DIN 15018 [9] по определению нагрузок рабочего состояния, показывает, что вследствие изложения норм по устойчивости в различных документах могут возникать разночтения. Поэтому, на наш взгляд, объединение норм расчета всех типов кранов на прочность и устойчивость от опрокидывания оправдано с позиций общности подхода и единства методики анализа.

Заключение

В дополнение к частным выводам и рекомендациям, отмеченным выше по отдельным рассмотренным вопросам, можно сделать следующее общее заключение – отечественные нормы расчета грузоподъемных кранов не отра-

