

РАСЧЕТ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КРАНОВ ГРУППЫ «Б», ДЕЙСТВУЮЩИХ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ (АЭС)

© Ю.И. Пимшин *, В.А. Наугольников *, Г.А. Науменко **, И.Ю. Пимшин **

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

** Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия

В работе рассмотрена оценка сейсмостойкости кранов группы «Б», эксплуатируемых на блоках атомных станций (АЭС). Приведен пример расчета подвесного пятитонного крана. Сделан вывод о его соответствии сейсмостойкости региона.

Ключевые слова: техническое состояние, краны мостового типа, сейсмостойкость, расчет параметров, напряжение.

Поступила в редакцию: 15.06.2018

Согласно действующих НП-043-11 «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правил аустройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии». утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 ноября 2011 г. N 672, в разделе «...II. Общие требования к кранам для объектов использования атомной энергии...» [1] даны группы классификации «...6. Краны ОИАЭ по влиянию на обеспечение ядерной и радиационной безопасности ОИАЭ классифицируются на специальные краны и общепромышленные краны.

К специальным кранам относятся:

– краны группы А – краны, перемещающие облученное ядерное топливо, высокообогащенный уран, трансурановые материалы и (или) высокоактивные радиоактивные отходы;

– краны группы Б – краны, не вошедшие в группу А и перемещающие ядерные материалы и радиоактивные вещества (в том числе радиоактивные отходы), выход которых за установленные проектом ОИАЭ границы при нарушениях нормальной эксплуатации ОИАЭ, включая проектные аварии на ОИАЭ, превышает пределы, установленные в соответствии с Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009, СП 2.6.1.2523-09), утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. N 47 (зарегистрировано в Минюсте России 14 августа 2009 г., регистрационный номер 14534, опубликовано в "Российской газете", N 171/1, 11 сентября 2009 г.) ...». Далее в разделе «...III. Требования к специальным кранам группы Б...» приведены требования «...16. Специальные краны и их элементы при наличии максимального груза на крюке, соответствующего условиям эксплуатации крана в технологическом процессе ОИАЭ, должны быть устойчивы к внешним воздействиям природного и техногенного происхождения на ОИАЭ (включая сейсмические и ветровые нагрузки)...» [1].

«...Расчет на сейсмостойкость специального крана должен выполняться линейно-спектральным методом с использованием сейсмических спектров ответа и сейсмических коэффициентов динамичности или методом динамического анализа.

Расчет на сейсмостойкость специальных кранов группы Б с электрическими таями (однобалочных мостовых опорных и подвесных, козловых, консольных) допускается проводить статическим методом...» [1].

Для практических расчетов кранов группы Б действует «Руководящий технический

материал. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии. Ртм 108.020.37-81» утвержден и введен в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.06.81 № ЮК-002/4365 [2]. В документе сказано, что «...статический метод расчета на сейсмостойкость – упрощенный метод, согласно которому распределение сейсмических нагрузок, действующих на конструкцию, принимается подобным распределению массы, а величины этих нагрузок определяются при помощи набора коэффициентов...» [2].

ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ

«2.1 Исходными данными для расчета на сейсмостойкость оборудования ... АЭУ являются: балльности DE и MDE и максимальные уровни ускорений расчетных акселерограмм; воздействия от DE и MDE в виде поэтажных акселерограмм и (или) обобщенных спектров ответа для мест закрепления оборудования по трем взаимно перпендикулярным направлениям (вертикального и двух горизонтальных); нагрузки или внутренние усилия при нормальных условиях эксплуатации, а в необходимых случаях при нарушении нормальных условий эксплуатации и в аварийных ситуациях.

(Здесь сокращения: MDE (MPЗ) – максимальное расчетное землетрясение; DE (ПЗ) – проектное землетрясение).

2.2 Расчет на сейсмостойкость необходимо проводить с учетом одновременного сейсмического воздействия во всех учитываемых направлениях.

2.3 Расчет на сейсмостойкость оборудования ... АЭУ проводится статическим, линейно-спектральными методами, а также методом динамического анализа ...» [3-10].

Примеры расчета оборудования АЭУ на сейсмостойкость приведены в настоящей статье ниже.

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Оценку сейсмостойкости оборудования АЭУ следует выполнять по допускаемым напряжениям, допускаемым перемещениям, допускаемым нагрузкам, критериям циклической прочности и устойчивости.

При оценке сейсмостойкости по допускаемым напряжениям должны учитываться только те эксплуатационные нагрузки или внутренние усилия, которые не релаксируются при возникновении в элементах местной или общей пластической деформации (весовые нагрузки, внутреннее и наружное давление, нагрузки от присоединенных коммуникаций).

Приведенные напряжения, сопоставляемые с допускаемыми, следует определять по теории наибольших касательных напряжений.

Оценку прочности элементов оборудования АЭУ следует выполнять по допускаемым напряжениям, приведенным в таблице 1.

(ss)1 – группа приведенных общих мембранных напряжений с учетом сейсмических воздействий, МПа (кгс/мм²);

[s] – номинальное допускаемое напряжение, МПа (кгс/мм²).

При расчете оборудования на устойчивость допускаемые напряжения должны приниматься следующими:

$$[sF] = 0,7 \cdot skr \text{ при } skr < Rp_{0,2}; \quad (1)$$

$$[sF] = 0,7 \cdot Rp_{0,2} \text{ при } skr > Rp_{0,2} \quad (2)$$

где [sF] – допускаемое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм²);

$Rp_{0,2}$ – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа (кгс/мм²);

skr – критическое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм²).

Таблица 1 – Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для оборудования [Load combinations and allowable voltages for equipment]

Категория оборудования	Сочетание нагрузок	Расчетная группа категории напряжений	Допускаемое напряжение
I	NOC + MDE	(ss)1	1,4[s]
		(ss)1	1,8[s]
I	NOC + DE	(ss)1	1,2[s]
		(ss)1	1,6[s]
II	NOC + DE	(ss)1	1,5[s]
		(ss)1	1,9[s]

Величины допускаемых перемещений (прогиб, сдвиг, смещение и т.п.) следует определять в зависимости от условий эксплуатации и требований к жесткости элементов конструкции (предотвращение выбора зазора и соударения элементов, недопустимые перекосы, разуплотнение герметичных стыков и т.п.).

РАСЧЕТ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

При использовании статического метода расчетные сейсмические нагрузки на конструкцию распределяются подобно распределению массы и прикладываются независимо в двух горизонтальных и вертикальном направлениях.

Величины сосредоточенной Q_c или распределенной (q_c) сейсмических нагрузок определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} Q_c &= Q \cdot k_{\delta} \cdot k_g \cdot k_n, \\ q_c &= q \cdot k_{\delta} \cdot k_g \cdot k_n, \end{aligned} \quad (3)$$

где Q и q – соответственно сосредоточенная и распределенная весовые нагрузки на оборудование;

k_{δ} – коэффициент балльности принимается по таблице 2;

k_g – коэффициент высоты размещения конструкции в здании или сооружении, который определяется по формуле:

$$k_g = 1 + 0,05H, \quad (4)$$

где H – отметка установки оборудования в здании АЭУ или наивысшая отметка крепления трубопровода (в метрах);

k_n – коэффициент интенсивности нагрузки определяется в зависимости от низшей собственной частоты конструкции f_1 (Гц) по следующим условиям:

$k_n = f_1$, если $f_1 < 2$;

$k_n = 2$, если $10 > f_1 > 2$;

$$k_n = \left(\frac{20}{f_1} \right), \quad \text{если } 40 > f_1 > 10;$$

$$k_n = 0,5, \quad \text{если } f_1 > 40.$$

Таблица 2 – Значение коэффициента балльности [Value of the score coefficient]

Сейсмичность площадки (в баллах)	9	8	7	6	5
Коэффициент балльности k_{δ}	1,0	0,5	0,25	0,125	0,06

Если собственная частота конструкции не определяется, то $k_n = 2$.
Значение низшей частоты f_1 может быть приближенно определено по формуле:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{\lambda_{\max}}}, \quad (5)$$

где λ_{\max} – максимальная абсолютная величина перемещения (прогиба) конструкции при действии весовых нагрузок Q и q в рассматриваемом направлении сейсмического воздействия;
 g – ускорение свободного падения.

При определении вертикальной сейсмической нагрузки значение коэффициента k_b при заданной балльности уменьшается в 2 раза, а коэффициент k_e принимается равным 1.

Приведенные напряжения, получаемые из расчета на действие сейсмических нагрузок отдельно по каждому из учитываемых направлений, суммируются по среднеквадратичной зависимости, а затем алгебраически складываются с приведенными напряжениями от эксплуатационных нагрузок.

Статический метод расчета на сейсмостойкость применим для линейно-упругих систем. Метод дает оценку сейсмостойкости с погрешностью, идущей в сторону повышения запаса прочности и устойчивости.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Расчет на прочность при сейсмических воздействиях на кране мостовом электрическом КМ-5, Зав. №xxx, Рег. № xxx.

Оценка на прочность при сейсмических воздействиях выполняется с целью определения возможности дальнейшей безопасной эксплуатации подъемного сооружения в данном регионе его использования.

Оценка сейсмостойкости оборудования на прочность выполняется по допустимым напряжениям:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (6)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в металлоконструкциях возникаемое при сейсмовоздействии;

$[\sigma]$ – предельное допустимое напряжение.

Допускаемые напряжения $[\sigma]$ для кранового оборудования определяются в зависимости от сочетания нагрузок, в том числе нормальных условий эксплуатации и максимально расчетного землетрясения. Как говорилось выше, согласно НП-043-11 п.55 [1] «...Расчет на сейсмостойкость специальных кранов группы Б с электрическими талями (однобалочных мостовых опорных и подвесных, козловых, консольных) допускается проводить статическим методом» [2].

$$[\sigma] = [sF];$$

$$[sF] = 0,7 \cdot Rp0,2,$$

где $Rp0,2$ – предел текучести стали из которой изготовлена пролетная балка, сталь СтЗсп5 – 245000 кН/м².

В таблице 3 приведены общие характеристики крана.

Для крана КМ-5, Рег. № xxx $[\sigma] = (1/1,4) \cdot 245000 = 175000 \text{ кН/м}^2$.

При использовании статического метода расчетные сейсмические нагрузки на конструкцию распределяются подобно распределению массы и прикладываются независимо в двух горизонтальных $Y_{(prod)}$, $X_{(non)}$ и вертикальном $Z_{(z)}$ направлениях.

Величины сосредоточенной Q_c или распределенной (q_c) сейсмических нагрузок определяются по (3):

k_b – коэффициент балльности принимается по таблице 2. Для крана КМ-5, Рег. № xxx $k_b = 0,25$;

k_g – коэффициент высоты размещения конструкции в здании или сооружении, который определяется по формуле $k_g = 1 + 0,05H$. Здесь H – отметка установки оборудования в зданиях АЭС (в метрах); $H = +12,0 \text{ м}$.
 $k_g = 1 + 0,05 \cdot 12,0 = 1,6$;

k_u – коэффициент интенсивности нагрузки определяется в зависимости от низшей собственной частоты конструкции $f_1(\text{Гц})$. В данном случае собственная частота f_1 конструкции не определена, то $k_u = 2$.

$$Q_{c(x)} = 23,242 \cdot 0,25 \cdot 1,6 \cdot 2,0 = 18,593 \text{ кН}$$

$$\sigma_{x \max} = \frac{M_{x \max}}{W_x},$$

$$\text{где } M_{x \max} = \frac{Q \cdot l_n}{4}.$$

$$M_{x \max} = \frac{18,593 \cdot 9,0}{4} = 41,835 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\sigma_{x \max} = 41,835 / 0,000472 = 88633,832 \text{ кН/м}^2.$$

При определении вертикальной сейсмической нагрузки значение коэффициента k_b при заданной балльности уменьшается в 2 раза, а коэффициент k_g принимается равным 1.

$$Q_{c(z)} = 23,242 \cdot 0,125 \cdot 1,0 \cdot 2,0 = 5,810 \text{ кН},$$

$$\sigma_{z \max} = \frac{M_{z \max}}{W_z}.$$

где W_z – момент сопротивления, определяется по ГОСТ 8239-89 (табл.1);

$$M_{z \max} = \frac{Q_{c(z)} \cdot l_n}{4}.$$

$$M_{z \max} = (5,810 \cdot 9,0) / 4 = 13,074 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\sigma_{z \max} = 13,074 / 0,000472 = 27698,358 \text{ кН/м}^2$$

Таблица 3 – Технические характеристики крана и территории его размещения [Technical characteristics of the crane and its location]

1	Тип крана	Кран мостовой подвесной электрический, КМ-5
2	Заводской номер	1979
3	Регистрационный номер	48А
4	Пролет крана, (l_n), м	9,0
5	База крана, (l_0), м	1,5
6	Грузоподъемность, т	5
7	Высота подъема груза м.	12,0
8	Масса крана в рабочем состоянии, Q , т	2,370
9	Максимальная нагрузка колеса на подкрановый путь, кН	
10	Тип металлоконструкции крана (коробчатого сечения, сварная, ферменная, клепаная и т.д.)	горячекатанная, двутаврового сечения
11	Скорости механизмов, м/с.:	
12	передвижения крана	
	– максимальная м/мин	32
	– минимальная м/мин	-
13	передвижения тележки	
	– максимальная м/мин	20
	– минимальная м/мин	-
14	Скорость подъема м/мин	8
15	Направляющие	Двутавровая балка, М-30
16	Паспортные данные о нижнем и верхнем пределах температур рабочего состояния крана	-20 ⁰ С +40 ⁰ С
17	Предельная сейсмоактивность района по шкале MSK-64, бал.	7
18	Предельная ветровая нагрузка, бал.	-

Приведенные напряжения, получаемые из расчета на действие сейсмических нагрузок отдельно по каждому из учитываемых направлений, суммируются по среднеквадратичной зависимости,

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{z\max}^2 + \sigma_{x\max}^2 + \sigma_{y\max}^2},$$

$$\sigma_n = 92860,946 \text{ кН/м}^2,$$

а затем алгебраически складываются с приведенными напряжениями $\sigma_{э/н}$ от эксплуатационных нагрузок:

$$\sigma_{\max} = \sigma_n + \sigma_{э/н},$$

где $\sigma_{э/н} = \frac{M}{W}$.

$$M = \frac{Q \cdot l_n}{4}.$$

$$M = (23,242 \cdot 9,0) / 4 = 52,295 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\sigma_{э/н} = 52,295 / 0,000472 = 110793,432 \text{ кН/м}^2$$

$$\sigma_{\max} = 27698,358 + 110793,432 = 138491,790 \text{ кН/м}^2$$

Условие приведенное (6) выполняется, следовательно, устойчивость крана КМ-5 Рег. № xxx при 7 бальном сейсмическом воздействии по шкале MSK-64 обеспечивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии. НП-043-11. В редакции Приказа Ростехнадзора от 19.11.2013 N 549. – URL : <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293780/4293780109.htm> (дата обращения: 17.05.2018).
2. Руководящий технический материал. Оборудование атомных энергетических установок. Расчет на прочность при сейсмическом воздействии. РТМ 108.020.37-81. Утвержден и введен в действие указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.06.81 N ЮК-002/4365. – URL : <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293828/4293828641.htm> (дата обращения: 21.05.2018).
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. Введены в действие с 1 января 2002 г. – URL : <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815342.htm> (дата обращения: 21.05.2018).
4. *Васютинский, И.Ю.* Геодезические приборы при стороительно-монтажных работах [Текст] / И.Ю. Васютинский, Г.Е. Рязанцев, Х.К. Ямбаев. – Москва : Недра, 1982. – 167 с.
5. *Ганьшин, В.Н.* Геодезические работы при строительстве и эксплуатации подкрановых путей [Текст] / В.Н. Ганьшин, И.М. Репалов. – Москва : Недра, 1980. – 120 с.
6. *Григоровский, П.Е.* Совершенствование технологии возведения высотных сооружений и зданий из монолитного железобетона с применением лазерных систем [Текст] / П.Е. Григоровский // Автореф. на соиск. уч. степ. к.т.н. по спец. 05.24.01. – Киев : КИСИ, 1991. – 24 с.
7. *Головень, Г.Е.* Совершенствование приборов и способов переноса осей по высоте в геодезическом обеспечении строительства [Текст] / Г.Е. Головень // Автореф. на соиск. уч. степ. к.т.н. по спец. 05.24.01. – Москва : И-т им. Плеханова, 1982. – 22 с.
8. *Карасев, В.И.* Методы оптических измерений при монтаже турбоагрегатов [Текст] / В.И. Карасев, Д.С. Монес. – Москва : Энергия, 1973. – 168 с.
9. *Корн, Г.* Справочник по математике [Текст] / Г. Корн., Т.М. Корн. – Москва : Наука, 1979. – 678 с.
10. *Маркузе, Ю.И.* Геодезия. Вычисления и уравнивание [Текст] / Ю.И. Маркузе, Е.Г. Бойко, В.В. Голубев. – Москва : Геодезиздат, 1994. – 431 с.

REFERENCES

- [1] Federal'ny'e normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e`nergii. Pravila ustrojstva i bezopasnoj e`kspluatacii gruzopod`emny`x kranov dlya ob`ektov ispol'zovaniya atomnoj e`nergii. [Federal Rules and Regulations in the Field of Atomic Energy Use «Rules of Arrangement and Safe Operation of Cranes for Objects of Atomic Energy Use»]. NP-043-11. V redakcii Prikaza Rostexnadzora ot 19.11.2013 No. 549 [NP-043-11. Amended by the Order of Rostechnadzor dated 19.11.2013 No. 549]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293780/4293780109.htm> (in Russian).
- [2] Rukovodyashchij tehničeskij material. Oborudovanie atomnyh energetičeskijh ustanovok raschet na prochnost pri sejsmičeskom vozdejstvii [Equipment of Nuclear Power Installations, Strength Calculation under Seismic Excitation]. RTM 108.020.37-81. Utverzhden i vveden v dejstvие ukazaniem Ministerstva e`nergetičeskogo mashinostroeniya ot 04.06.81 N YuK-002/4365 [RTM 108.020.37-81. Approved and put into effect the instruction of the Ministry of Power Engineering, 04.06.81 N Yuk-002/4365]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293828/4293828641.htm> (in Russian).
- [3] Normy proektirovaniya sejsmostojkijh atomnyh stancij [Norms of Designing Earthquake-Resistant Nuclear Power Stations]. NP-031-01. Vvedeny` v dejstvие s 1 yanvarya 2002 g. [NP-031-01. Put into effect since 1 January 2002]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815342.htm> (in Russian).
- [4] Vasyutinsky I.Yu., Ryazantsev G.E., Yambaev H.K. Geodezicheskie pribory pri storoitelno-montazhnyh rabotah [Geodetic Devices at Construction Works]. Moskva, Nedra [Moscow, Subsoil]. 1982. 167 p. (in Russian).
- [5] Ganshin V.N., Repalov I.M. Geodezicheskie raboty pri stroitelstve i ekspluatacii podkranovyh putej [Geodetic Works at Construction and Operation of Crane Tracks]. Moskva. Nedra [Moscow. Subsoil]. 1980. 120 p. (in Russian).
- [6] Grigorovskij, E.P. Sovershenstvovanie tekhnologii vozvedeniya vysotnyh sooruzhenij i zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona s primeneniem lazernyh sistem [Improvement of the Technology of High-Rise Construction Structures and Buildings Made of Reinforced Concrete with the Use of Laser Systems.]. Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. [Thesis Abstract of Ph. D. in Engineering]. 05.24.01. Kiev. KISI. 1991. 24 p. (in Russian).
- [7] Goloven G. E. Sovershenstvovanie priborov i sposobov perenosа осей по высоте в геодезическом обеспечении строitelstva [Improvement of Devices and Methods of Transfer of Axes in Height in

- Geodetic Support of Construction]. Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. [Thesis Abstract of Ph. D. in Engineering]. 05.24.01. Plekhanov Institute. 1982. 22 p. (in Russian).
- [8] Karasev V.I., Mones D.S. Metody opticheskikh izmerenij pri montazhe turboagregatov [Methods of Optical Measurements during Installation Turbosets]. Moscow. Energy. 1973. 168 p. (in Russian).
- [9] Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike [Handbook of Mathematics]. Moskva. Nauka [Moscow. Science]. 1979. 678 p. (in Russian).
- [10] Marcuse, Y.I., Boyko E.G., Golubev V.V. Geodeziya. Vychisleniya i uravniwanie [Geodesy. Calculations and Equalization]. Moskva. Geodezizdat [Moscow. Geodesic]. 1994. 431 p. (in Russian).

Calculation of Seismic Resistance of Group «B» Cranes Operating at Nuclear Power Plants (NPP)

Y.I. Pimshin ^{*1}, V.A. Naugolnov^{*2}, G.A. Naumenko^{3}, I.U. Pimshin^{**4}**

** Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*** Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

¹ *ORCID iD: 0000-0001-6610-8725*

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: YIPimshin@mephi.ru

² *e-mail: VANaugolnov@mephi.ru*

³ *ORCID iD: 0000-0002-7512-4687*

WoS Researcher ID: J-7170-2017

e-mail: geodez@aanet.ru

⁴ *ORCID iD: 0000-0002-8267-3617*

WoS Researcher ID: O-8809-2018

e-mail: geodez@aanet.ru

Abstract – The paper considers the assessment of seismic resistance of cranes of group "B" operated at nuclear power plants (NPP). The example of calculation of the suspended five-ton crane is given. The conclusion about its compliance with seismic resistance of the region is made.

Keywords: technical condition, bridge type cranes, seismic resistance, parameter calculation, voltage.