

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В данной статье представлены результаты расчёта сейсмических нагрузок, возникающих в новой конструкции базовой станции сотовой связи, которая ранее рассматривалась и анализировалась в Санкт-Петербургском горном университете на кафедре промышленного и гражданского строительства. Анализ производился относительно сейсмической обстановки в Архангельской области, расположенной на Восточно-Европейской плите, с целью расширения территориального использования вышеуказанного сооружения. Результаты исследования представлены как в графическом, так и в табличном виде.

Ключевые слова: сейсмическая обстановка; усилия; крутящий момент; вышка сотовой связи; сотовый узел; металлическая конструкция; сейсмические нагрузки

Различные предприятия и некоторые институты с каждым годом представляют новые разработки конструкций, которые с помощью специального программного обеспечения необходимо проанализировать, помещая в различные геологические и сейсмические условия с целью расширения их территориального использования. В данной статье будет произведён анализ сейсмических нагрузок, возникающих в конструкции сотового узла, ранее рассматриваемая в Санкт-Петербургском горном университете на кафедре промышленного и гражданского строительства. Раскосы данного сооружения представляют из себя сварные стальные трубы с толщиной стенок 3 мм и диаметрами 108, 105 мм, распорки – трубы такой же конфигурации, но с внешним диаметром 89 мм и толщиной стенок 3 мм, а пояс – характеризуется толщиной стенок в 7 мм и внутренним диаметром 120 мм. Согласно статье 48.1 Градостроительного Кодекса Российской Федерации (ГрК РФ) сооружения связи относятся к сооружениям повышенного уровня ответственности [1]. В виду вышеуказанного условия необходимо подобрать район, который по картам ОСР (общего сейсмического районирования) категории С (повешенного уровня ответственности) (рис.1) из СП 14.13330.2018 будет характеризоваться интенсивностью землетрясений равной 7 баллам [2].

Для сейсмического анализа была выбрана Архангельская область, расположенная на Восточно-Европейской платформе. Площадь рассматриваемого района составляет 587, 4 тыс. км² и включает не только Ненецкий автономный округ, но и архипелаг Земля Франца-Иосифа и ряд островов [3]. На территории Русской платформы редко наблюдаются сейсмические явления, однако присутствие на данном полигоне экологически опасных производственных объектов определяет необходимость контроля вышеупомянутых процессов. Так 28 марта 2013 года произошло тектоническое землетрясение, эпицентр которого находится в пределах разлома, ограничивающий Архангельский выступ и Онежско-Кандалакшский палеорифт (рис. 1) [4].

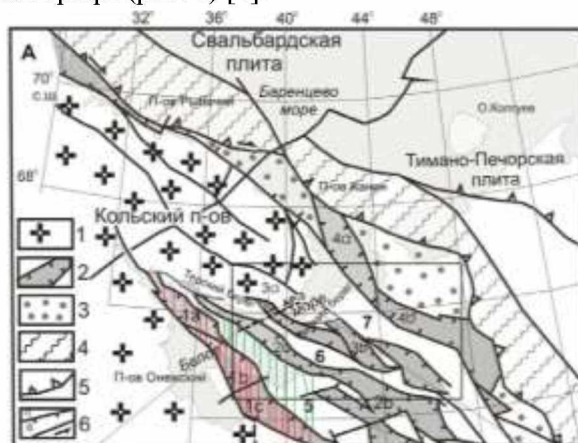


Рис.1. Тектоническая карта Белого моря. 1 – Балтийский щит, 2 – Онежско-Кандалакшский палеорифт, 3 – Притиманский прогиб, 4 – Тимано-Варангерский пояс байкалитид, 5 – конвергентный шов (Архангельский выступ), 6 – сбросы и сдвиги [5]

Следствием подобных проявлений является возмущение земной коры и колебание основания, на котором установлена конструкция, что в свою очередь, приводит к появлению дополнительных усилий в отдельных элементах сооружения. В рассматриваемом случае результатом являются конечные усилия, которые возникают в раскосах разработанной конструкции вышки сотовой связи (рис.2) и их приращение при приложении сейсмических нагрузок.



Рис.2. Модель конструкции вышки сотовой связи, состоящей из 20 секций, 180 элементов, представленных сварными стальными трубами, и 63 узлов

Перед тем, как задавать сейсмические нагрузки, необходимо учесть все статические нагрузки с целью проведения модального анализа и определения форм колебаний. Согласно СП 14.13330.2018, требуется определить такое количество форм колебаний, при котором суммарная модальная масса будет превышать 90%, а учитываться при дальнейшем расчёте будут те, модальная масса которых, то есть доля массы конструкции, участвующая в динамической реакции по определённой форме колебаний, равна или превышает 5%.

По результатам вышеописанного расчёта, программой была составлена таблица данных, фрагмент которой представлен в таблице №1.

Таблица №1 – Фрагмент таблицы частоты собственных колебаний конструкции сотового узла

№ формы	Собственные значения	Круговая частота (рад/с)	Частота (Гц)	Период (с)	Коэффициент распределения	Модальная масса (%)	Сумма модальных масс (%)
1	0,128675	7,771519	1,236876	0,808489	-1,93169	18,84755	18,84755
2	0,128675	7,77154	1,236879	0,808487	1,606865	13,04117	31,88872
3	0,048522	20,60931	3,280074	0,304871	-0,00687	0,000589	31,88931
4	0,034229	29,21525	4,649751	0,215065	1,450319	12,12734	44,01665
5	0,034229	29,21535	4,649767	0,215065	0,919337	4,869647	48,8863
6	0,020445	48,91242	7,784652	0,128458	0,008297	0,00064	48,88694
...
22	0,004573	218,6731	34,8029	0,028733	0,759101	4,423866	90,94191

В рассматриваемом случае понадобилось всего 22 формы колебаний, чтобы собрать сумму модальных масс более 90%.

Далее необходимо определить те формы колебаний, которые будут учитываться при дальнейшем расчёте на сейсмостойкость (таблица №2).

Таблица №2 – Фрагмент таблицы частот собственных колебаний, отражающая те формы колебаний, при которых модальная масса превышает 5%

№ формы	Собственные значения	Круговая частота (рад/с)	Частота (Гц)	Период (с)	Коэффициент распределения	Модальная масса (%)	Сумма модальных масс (%)
1	0,128675	7,771519	1,236876	0,808489	-1,93169	18,84755	18,84755
2	0,128675	7,77154	1,236879	0,808487	1,606865	13,04117	31,88872
4	0,034229	29,21525	4,649751	0,215065	1,450319	12,12734	44,01665
7	0,015835	63,15244	10,05102	0,099492	-0,85784	6,585029	55,47197
10	0,009659	103,5286	16,47708	0,06069	1,617936	21,22805	78,22881

Анализируя полученные данные, следует с помощью используемой программы составить таблицу «Формы колебаний», которая отражает значение перемещений каждого узла. В рассматриваемом случае будут учитываться перемещения для 1, 2, 4, 7, 10 формы колебаний.

Из полученных таблиц необходимо вычислить средние значения перемещений конструкций по каждой оси и определить направляющие косинусы, которые должны удовлетворять условию (1). Все результаты расчёта представлены в таблице №3.

$$C_x \cdot C_x + C_y \cdot C_y + C_z \cdot C_z = 1 \quad (1)$$

Направляющие косинусы можно рассчитать по следующей формуле:

$$\cos \alpha = \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|} = \frac{x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + z_1 \cdot z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad (2)$$

Таблица №3 – Расчет направляющих косинусов по направлениям осей X, Y, Z

№ формы колебаний	Перемещение по X	Перемещение по Y	Перемещение по Z	Длина направляющего вектора XYZ	Направляющий косинус CX	Направляющий косинус CY	Направляющий косинус CZ
1	0,23983	0,28919	-0,00014	0,37570	0,6384	0,769746	-0,00038
2	0,28919	-0,23983	0,00014	0,37570	0,769746259	-0,63835	0,00038
4	-0,06217	-0,09767	-0,00005	0,11578	-0,53701738	-0,84357	-0,00041
7	0,03944	0,08071	-0,00005	0,08984	0,439067462	0,898454	-0,00053
10	-0,00035	0,00054	0,49902	0,49902	-0,00069979	0,001081	0,9999

Определив все необходимые расчётные параметры зададим 5 сейсмических нагрузок и согласно нормам СП 14.13330.2018 подберем необходимые табличные параметры.

Расчётная сейсмическая нагрузка S_{ik} в выбранном направлении, приложенная к некоторой точке рассчитывается по выражению (3).

$$S_{ik} = K_0 K_1 S_{0ik}, \quad (3)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность, принимаемый равным 1,2; K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, согласно нормам, принимается равным 1; S_{0ik} – значение сейсмической нагрузки для i -го тона собственных колебаний здания и сооружения, определяемое в предположении упругого деформирования конструкций по формуле (4).

$$S_{0ik} = Q_k A \beta_i K_\psi \eta_{ik}, \quad (4)$$

где Q_k – вес здания или сооружения, определяемый с учётом расчётных нагрузок на конструкцию, A – значение ускорения в уровне основания, принимаемое равным 1, 0; 2,0; 4,0 м/с² для расчётной сейсмичности 7, 8, 9 баллов соответственно; β_i – коэффициент динамичности, соответствующий i -й форме собственных колебаний или сооружений, в данном случае принимаемый относительно характеристик грунтов II категории; K_ψ – коэффициент, принимаемый в зависимости от характеристик зданий и сооружений по таблице 5.3 СП 14.13330.2018 равным 1,5; η_{ik} – коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -му тону и от места расположения нагрузки.

После определения всех параметров проводится расчёт с пятью сейсмическими нагружениями, которые возникают в раскосах анализируемой конструкции базовой станции сотовой связи (таблица №4).

Таблица №4 – Фрагмент таблицы с данными о возникающих усилиях от заданных сейсмических нагрузок в раскосах конструкции вышки сотовой связи

Загружение	№ элемента	Сечение	Усилие N, т
7 - S1	101	1	0,857646
7 - S1	101	2	0,857646
7 - S1	102	1	-0,87485
7 - S1	102	2	-0,87485
7 - S1	103	1	0,798391
7 - S1	103	2	0,798391
7 - S1	104	1	-0,81995
...

Рассчитывая по СП 16.13330.2017 раскосы, представляющие из себя стальные трубы, соответствующие ГОСТ Р 58064-2018, получаем, что максимальная нагрузка, которую смогут выдержать данные элементы равна 21,167 т [6]. Ни одно полученное значение, не превышает данного расчётного значения. Анализируя приращение Δ к усилиям при сейсмических нагрузках относительно статики при 7 нагружении составляет 0,41 т, при 8 – 0,76 т, при 9 – 0,75 т, при 10 – 0,61 т, 11 – 0,032 т.

По результатам расчёта можно сделать следующие выводы:

Каждый элемент разработанной конструкции вышки сотовой связи был проверен на дополнительные усилия, возникающие при воздействии сейсмических нагрузок. Усилия, возникающие в раскосах при приложении сейсмических нагрузок, не превышают максимальных усилий, которые могут возникать в трубах подобных параметров.

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что подобную систему взаимодействия труб допускается использовать на территориях, сейсмическая активность которых равна семи баллам, согласно картам ОСР 2015-С.

Так как вышка сотовой связи относится к сооружениям КС-3, необходимо дополнительно считать сейсмическое воздействие с использованием акселерограммы землетрясений и прямым интегрированием уравнения движения.

Данную методику оценки усилий в элементах башни сотовой связи при нахождении в сейсмически активном районе предполагается использовать при чтении лекций и проведении лабораторных работ по дисциплине «Металлические конструкции».

Список литературы:

1. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» 2009.
2. СП 14.13330.2018 «СТРОИТЕЛЬСТВО В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ» 2018.
3. Morozov A. N. [и др.]. The present-day seismicity of the White Sea region // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 36–51.
4. Antonovskaya G. [и др.]. ARKHANGELSK REGION // Zemletriaseniia Severnoi Evrazii [Earthquakes in Northern Eurasia]. 2019. № 22. С. 247–255.
5. А.С. Балуев, Е.С. Пржиялговский Е. Н. Т. Тектоника палеорифтовой системы Белого моря // Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2009. С. 148–152.
6. СП 16.13330.2017 «СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ» 2017.

A. V. Alekseev, E. I. Movchan

Methodology for assessing the stability of a metal structure under seismic impact within the Arkhangelsk region

*St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II
St. Petersburg, Russia*

Abstract. This article presents the results of the calculation of seismic loads arising in the new design of the cellular base station, which was previously considered and analyzed at the St. Petersburg Mining University at the Department of Industrial and Civil Engineering. The analysis was carried out regarding the seismic situation in the Arkhangelsk region, located on the East European Plate, in order to expand the territorial use of the above-mentioned structure. The results of the study are presented both graphically and in tabular form.

Keywords: seismic conditions, forces, torque, cell tower, cell node, metal structure, seismic loads