

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ КАБЕЛЕЙ В ОТКРЫТОЙ ПРОКЛАДКЕ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ КВАЛИФИКАЦИИ

к.т.н. <sup>1</sup>Водка А.А., <sup>2</sup>Келин А.А., <sup>2</sup>Нарыжная Р.Н., <sup>1</sup>Трубаев А.И.

<sup>1</sup> *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина*

<sup>2</sup> *Инженерно-технический центр «КОРО», Харьков, Украина*

**Введение.** При проектировании ответственных конструкций и оборудования одним из обязательных этапов является анализ их сейсмостойкости. Основные методы анализа и типовые примеры расчета различных конструкций на сейсмостойкость представлены в работе [1]. Одним из элементов оборудования атомных электростанций (АЭС), для которых необходимо проведение сейсмической квалификации являются кабельные конструкции. Такая квалификация выполняется методом проведения расчетов на сейсмостойкость с целью определения напряженно-деформированного состояния кабельных конструкций.

Анализируя кабели в открытой прокладке АЭС можно выделить две группы кабелей: отдельные кабели и кабели, собранные в жгуты. Вопросы статической прочности рассматриваются в работах [2, 3], а основные требования к безопасности ответственных кабельных систем сформулированы в [4]. В работе [5] рассмотрены вопросы анализа сейсмостойкости кабельных лотков, однако во всех перечисленных работах уделено недостаточное внимание построению математических моделей для оценки прочности и сейсмостойкости кабельных конструкций.

Таким образом, проведение исследований напряженного состояния кабельных конструкций при сейсмических воздействиях с использованием различных моделей является важной практической и научной задачей.

**Постановка задачи.** Силовой кабель имеет достаточно сложную внутреннюю структуру и состоит из изоляции и жил (рис. 1). Для моделирования его механического поведения при сейсмических воздействиях в работе предлагаются трехмерные (3D) и балочные конечно-элементные (КЭ) модели. На основе этих моделей проведен расчет статического напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего под действием собственного веса и сейсмической нагрузки на примере кабеля АВВГ–3х6+1х4, а также выполнен сравнительный анализ полученных результатов.

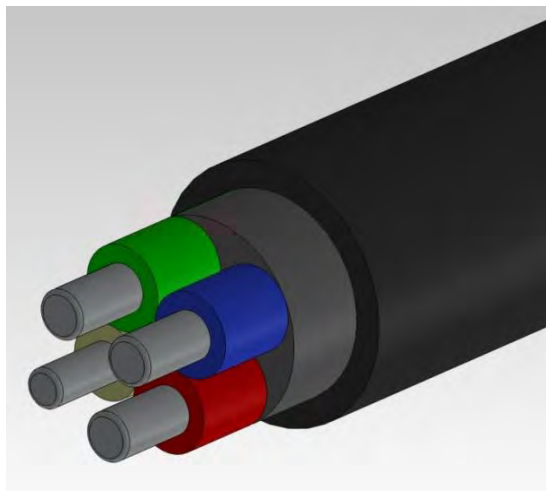


Рис. 1. Внутренне строение кабеля АВВГ-3х6+1х4

**Построение моделей.** Моделирование проводилось с использованием эскиза провиса кабеля (рис. 2а) и с учетом внутренней структуры кабеля (рис. 1). На основе этой информации были построены трехмерные геометрические модели (рис. 2б).

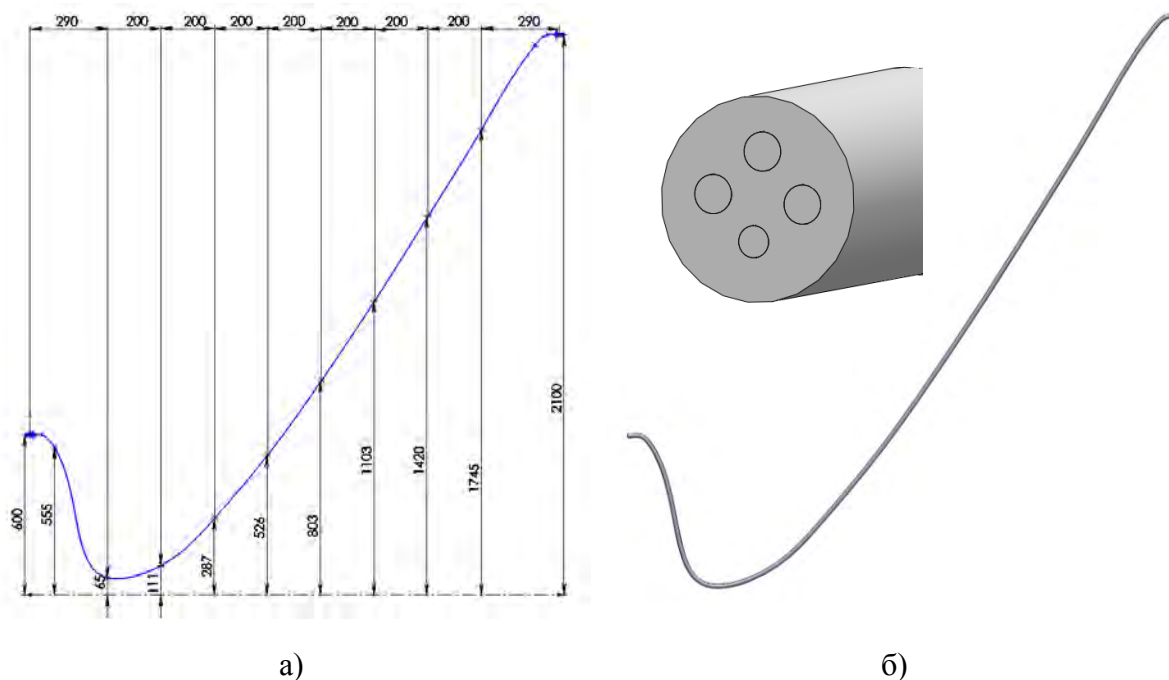


Рис. 2. Эскиз провиса кабеля и геометрическая модель кабеля АВВГ-3х6+1х4:  
а) эскиз; б) геометрическая модель

При построении расчетной модели кабеля задавались заделка на торцах кабеля по краю изоляции, а также объемная сила – сила тяжести. Указанный способ закрепления соответствует прижиму кабеля к полке с помощью хомута или заделке в стене. Расчетная модель строилась с учетом контактного взаимодействия между жилами и изоляцией кабеля. Для этого использовалась модель связанного (bonded) контакта. Конечно-элементная сетка представлена на рис. 3. (Моделирование проводилось на примере кабеля АВВГ-3х6+1х4). Масса одного метра кабеля составляет 0,2 кг, длина рассматриваемого кабеля – 3,385 м. Механические параметры материалов кабеля приведены в табл. 1.

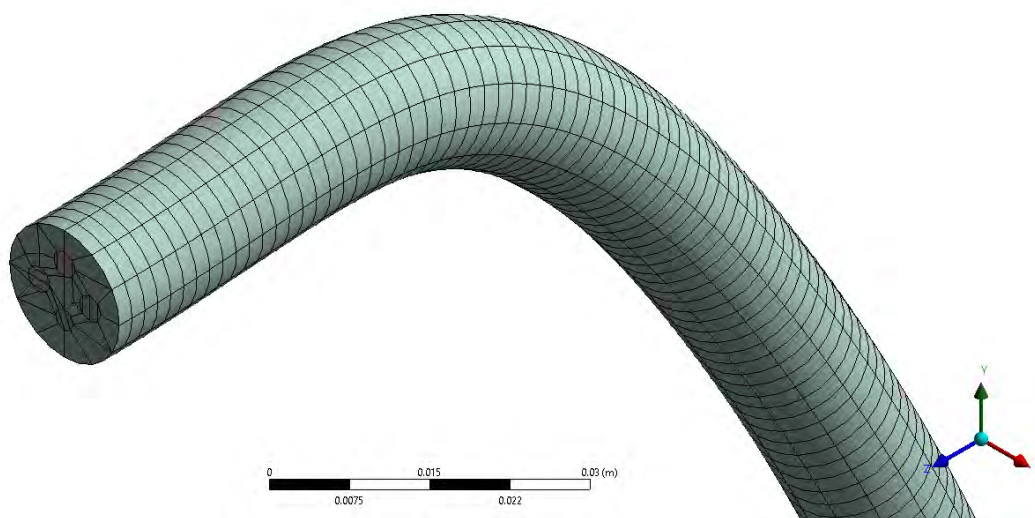


Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной сетки

Таблица 1 – Механические параметры материалов кабеля

Обозначение	$E$ , Па	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_t$ , Па	$\sigma_b$ , Па
Описание	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	плотность	Предел текучести Отожжен./ Обычный	Предел врем. проч. Отожжен./ Обычный
Алюминий	$7,1 \times 10^{10}$	0,34	2700	$64 \times 10^6$ / $167 \times 10^6$	$93,5 \times 10^6$ / $197 \times 10^6$
ПВХ	$3 \times 10^9$	0,385	979,6	-	$40 \times 10^6$

Построение трехмерных КЭ моделей кабельных систем является трудоемкой задачей, а проведение расчетных исследований на основе таких моделей требует значительных вычислительных ресурсов. Так рассмотренная 3D КЭ модель состоит из 225 тысяч узлов, которые образуют 36,8 тысяч конечных элементов, а время счета составляет около двух часов на компьютере с 4х ядерным процессором и тактовой частотой 3.0 ГГц. При увеличении протяженности кабеля системы или жгута кабелей размерность задачи в значительной мере будут увеличиваться, что приводит к еще большим требованиям к вычислительным ресурсам. Поэтому для уменьшения размерности задачи необходимо перейти к моделированию кабеля как трехмерной балки кольцевого поперечного сечения. Параметры кольца предлагается выбрать из условия равенства моментов инерции и площади сечения жил кабеля. (требуется обоснование) Так площадь сечения всех жил кабеля АВВГ-3х6+1х4 составляет  $A = 2,2 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>, а средний момент инерции  $I = 1,28 \times 10^{-10}$  м<sup>4</sup>. Таким образом, параметры сечения эквивалентного кольца могут быть найдены исходя из следующих соотношений:

$$D = \sqrt{\frac{2A^2 + 8\pi I}{\pi A}}, \quad (1)$$

$$d = \sqrt{\frac{-2A^2 + 8\pi I}{\pi A}}, \quad (2)$$

где  $D$ ,  $d$  – внешний и внутренний диаметр кольца соответственно. Выполнив соответствующие подсчеты, можно вычислить, что  $D = 7,781 \times 10^{-3}$  м, а  $d = 5,704 \times 10^{-3}$  м.

**Результаты численного моделирования.** Для оценки статического и динамического напряженного состояния использовался современный комплекс конечно-элементного моделирования. На первом этапе был проведен расчет статического НДС (рис. 4). На рисунке напряжения в изоляции кабеля не приведены по причине того, что они значительно ниже напряжений в жилах. Как видно из рисунка максимальные напряжения для 3D модели составляет 18,6 МПа, а для балочной модели – 25,4 МПа. Оба значения меньше предела текучести материала. А различие между полученными результатами составляет 36,5%.

На следующем этапе были определены собственные частоты и формы конструкции (табл. 2, рис. 5). Как видно из рис. 5, первой собственной формой колебаний является маятниковая форма – кабель совершает колебания наподобие физического маятника вокруг опор. Вторая и последующие формы – это комбинации изгибных и маятниковых форм.

Как видно из табл. 2 значения собственных частот для двух моделей в значительной мере отличаются друг от друга. Это, по всей видимости, связано с недостаточной точностью моделей при определении изгибной/крутильной жесткости кабеля у балочных моделей.

Для определения динамического НДС, вызванного сейсмическим воздействием, расчет проводился линейно-спектральным методом. Типовой спектр ускорений представлен на рис. 6. Результаты расчета приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, максимальные напряжения в случае 3D модели составляет 42,0 МПа, а в случае балочной модели – 54,6 МПа (расхождение составляет 30%). Полученные напряжения были добавлены к напряжениям, полученным вследствие статического расчета (рис. 8). После сложения полей напряжений максимальные напряжения для 3D модели составили 47,2 МПа, а в случае балочной – 76,7 МПа. Все результаты расчетов сведены в табл. 3. Оба полученных значения напряжений меньше предела текучести для отожженного алюминия, однако, различие между результатами расчетов превышает 100%. Это свидетельствует о необходимости уточнения параметров балочных моделей. Также величина расхождения порядка 30% свидетельствует о системном характере погрешности. Однако стоит отметить, что напряжения, полученные по балочной модели, превышают напряжения по 3D модели. А проведение расчетов по балочным моделям приведет к созданию дополнительного запаса прочности конструкции.

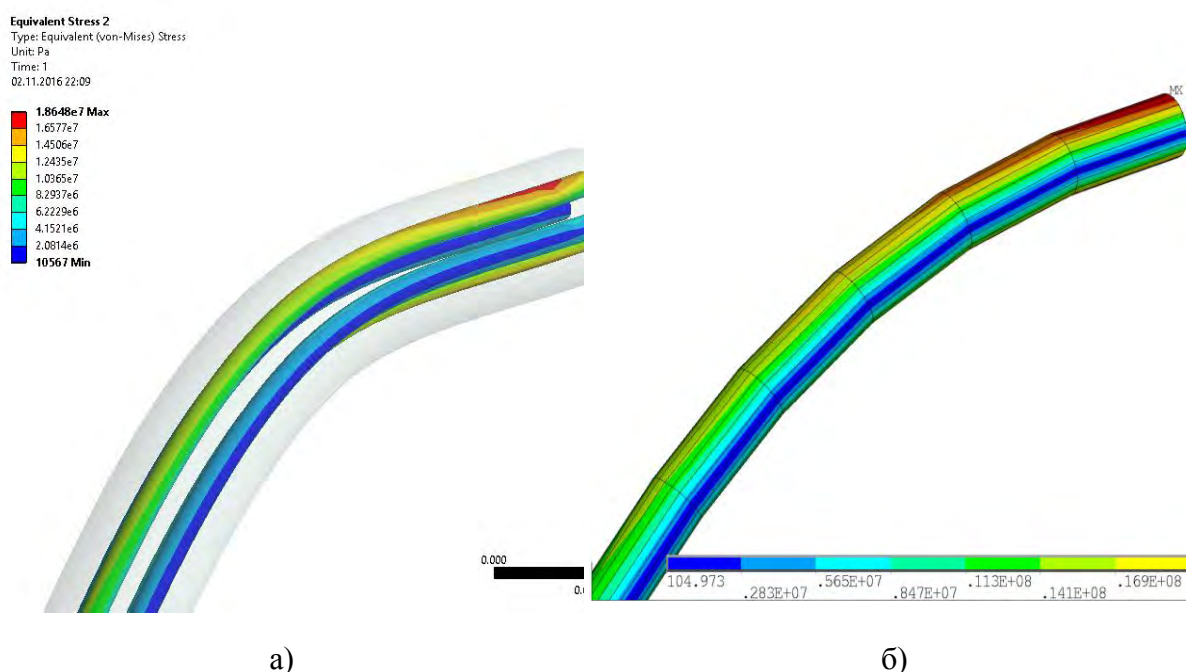


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в жилах кабеля, Па:  
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

Таблица 2 – Результаты расчета частот собственных колебаний кабеля

№ частоты	$f$ , Гц 3D модель	$f$ , Гц балочная модель	Расхождение, %
1	3,4163	2,222	34,9
2	4,1571	3,293	20,7
3	7,3045	4,755	34,9
4	10,466	8,425	19,5
5	13,197	9,375	28,9
6	19,828	16,141	18,5
7	22,681	16,864	25,6

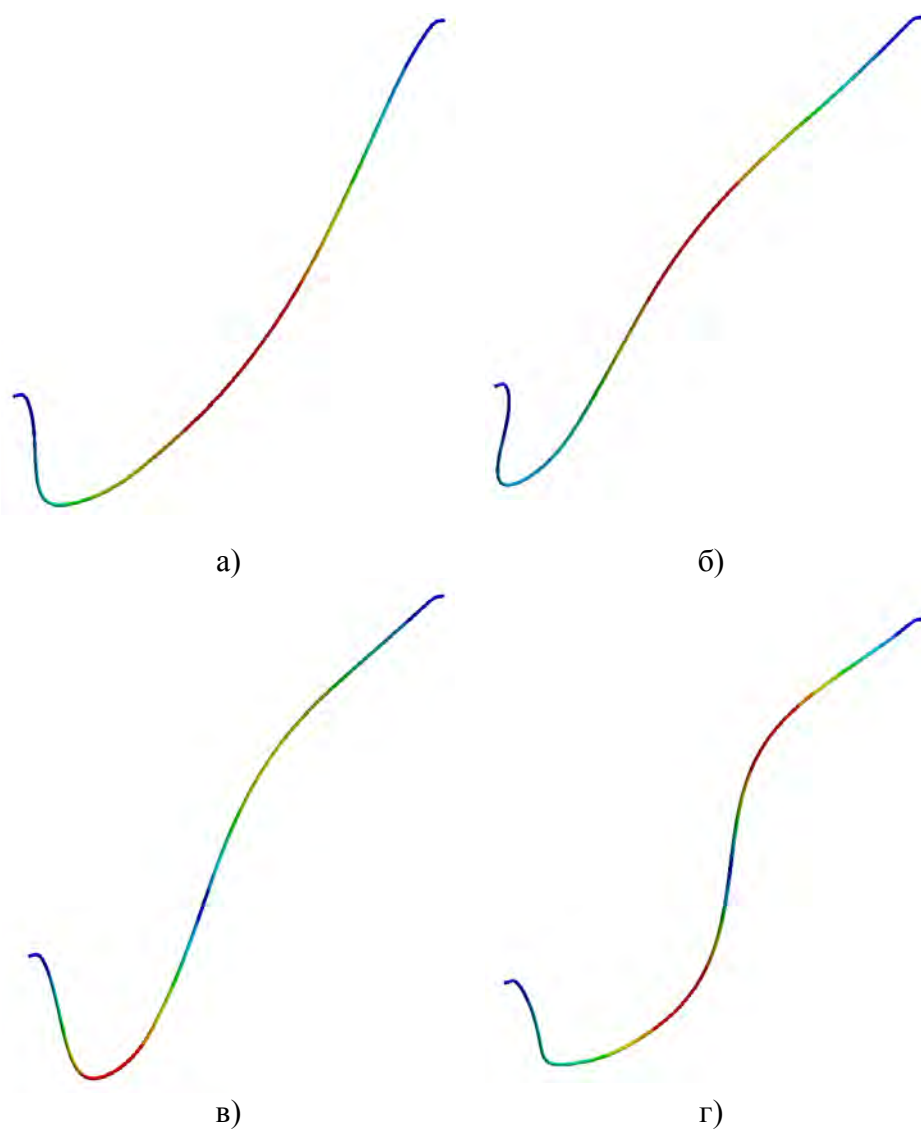


Рис. 5. Формы собственных колебаний для первых четырех частот (согласно табл. 2)

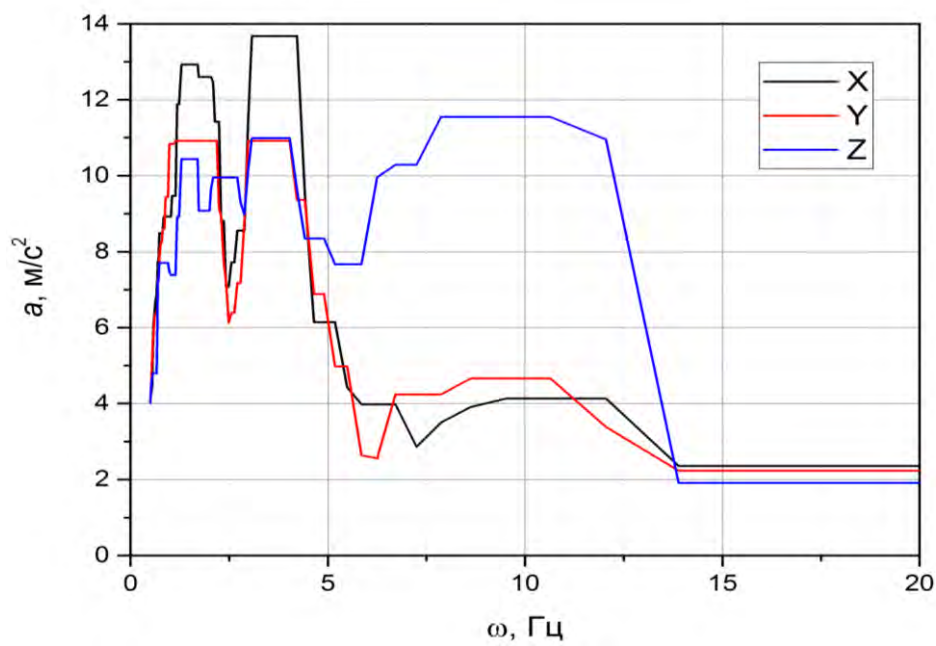


Рис. 6. Спектры ответа опор кабеля

Equivalent Stress 2  
 Type: Equivalent Stress  
 Units: Pa  
 Time: 0  
 02.11.2016 22:47

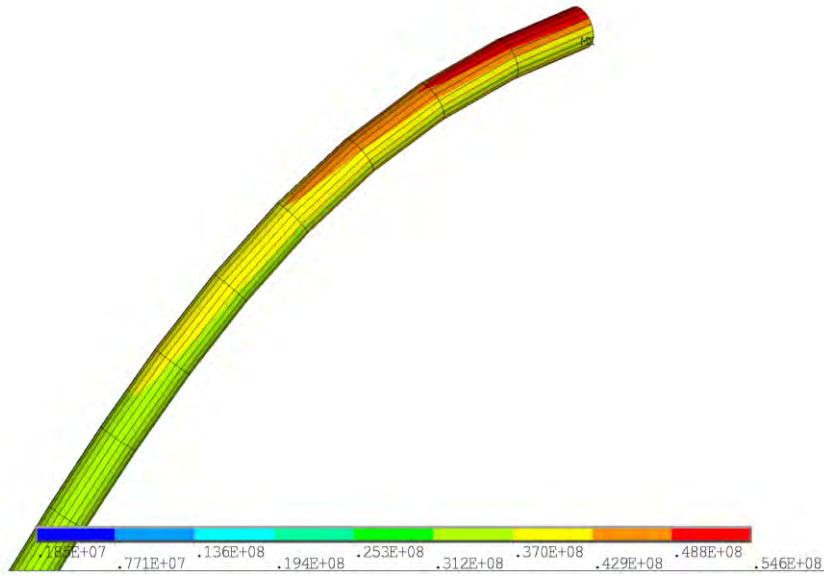
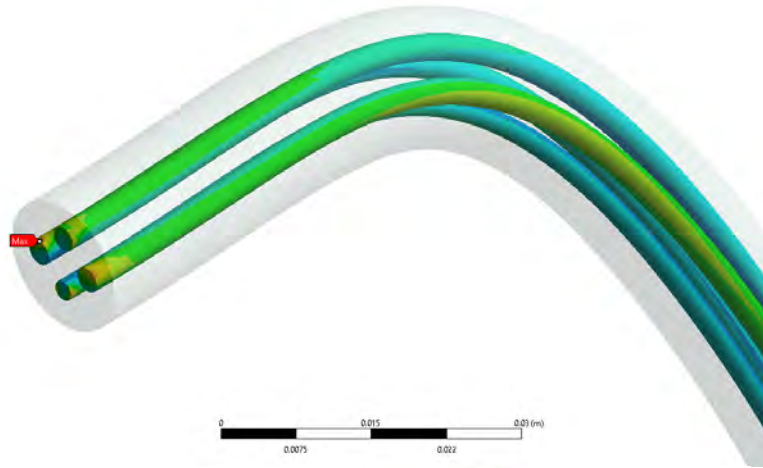
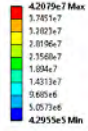
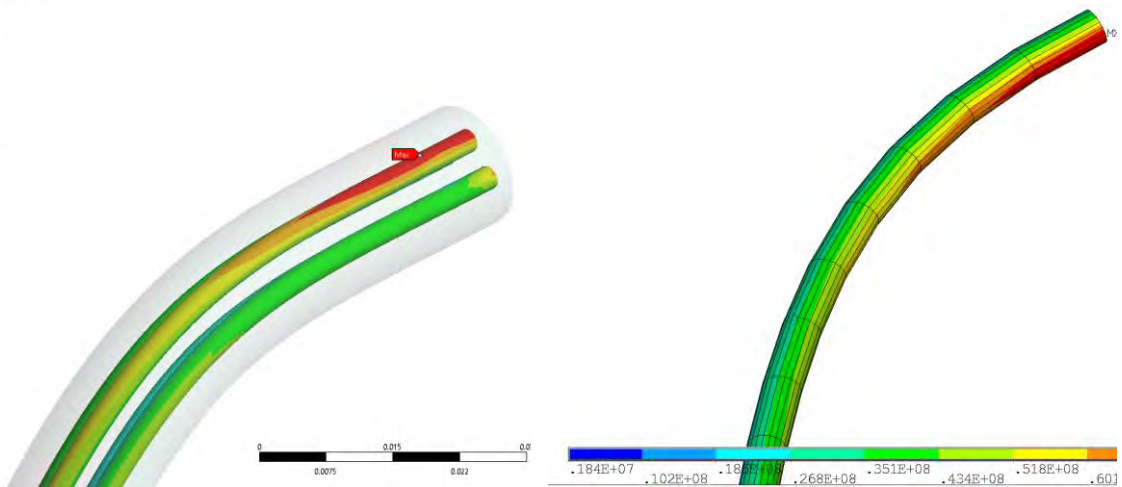
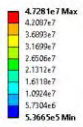


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу, Па:  
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

static\_stress + seism\_stress  
 Expression: static\_stress + seism\_stress  
 Units: Pa  
 Time: 0  
 02.11.2016 23:01



а) б)  
 Рис. 8. Суммарные эквивалентные напряжения по Мизесу, Па:  
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

Таблица 3 – сведенные результаты расчетов

Напряжение, МПа	3D модель	балочная модель	Расхождение, %
Статические	18,6	25,4	-36,5
Динамические	42,0	54,6	-30,0
Сумма	47,2	76,7	-62,5

### Выводы

В работе рассмотрены вопросы построения конечно-элементных моделей силовых кабелей в открытой прокладке. Построены модели, которые выполнены на основе трехмерных и балочных моделей. Проведен анализ НДС кабеля, возникающего в результате статических и сейсмических нагрузок. В результате проведенных расчетов установлено:

- балочные модели дают завышенные на 30% параметры НДС и собственные частоты кабеля;
- в рассмотренном кабеле АВВГ–3х6+1х4 эквивалентные напряжения меньше допускаемых, что свидетельствует о достаточной сейсмостойкости кабеля при условиях максимального расчетного землетрясения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. — наука СПб., 1998.
2. Исмаилов Г. М. Оценка силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при изгибе / Г. М. Исмаилов, В. М. Мусалимов, В. Д. Шиянов, С. В. Лутовинов // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Vol. 318, No. 2. — P. 44–48.
3. Исмаилов Г. М. Оценка сдвигающих усилий элементов многожильного кабеля при деформациях изгиба / Г. М. Исмаилов, М. С. Павлов, А. Е. Тюрин // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — P. 1–4.
4. Ефимова К. М. Основные требования к кабельным изделиям систем, важных для безопасности аэс / К. М. Ефимова, В. В. Левакин // Ядерна та радіаційна безпека. — 2015. — Vol. 1, No. 65. — P. 49–53.
5. Ito T. Study on the seismic response of cable tray considering sliding motion of cable / T. Ito, Y. Azuma, A. Shintani, C. Nakagawa. — ASME, 2014.

E-mail: [a\\_vodka@mail.ru](mailto:a_vodka@mail.ru)

Поступила в редакцию 07.10.2016