

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

А.А. Водка¹, А.А. Келин², Р.Н. Нарыжная², А.И. Трубаев¹

¹ *Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина*

² *Инженерно-технический центр «КОРО», г. 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.

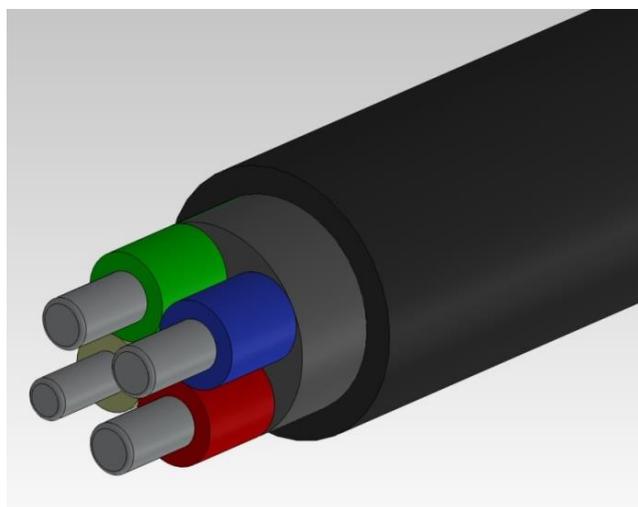


Рис. 1 – Внутренне строение кабеля АВВГ-3х6+1х4

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).

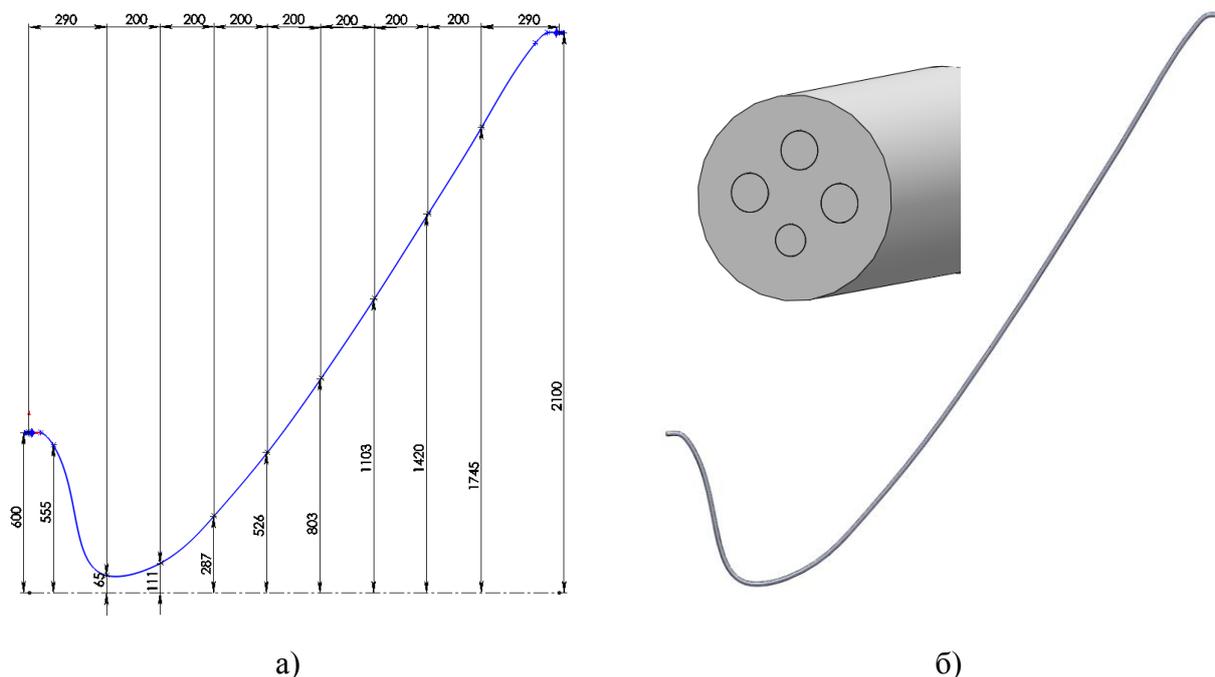


Рис. 2 – Эскиз провиса кабеля и геометрическая модель кабеля АВВГ-3х6+1х4:
а) – эскиз; б) – геометрическая модель

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.

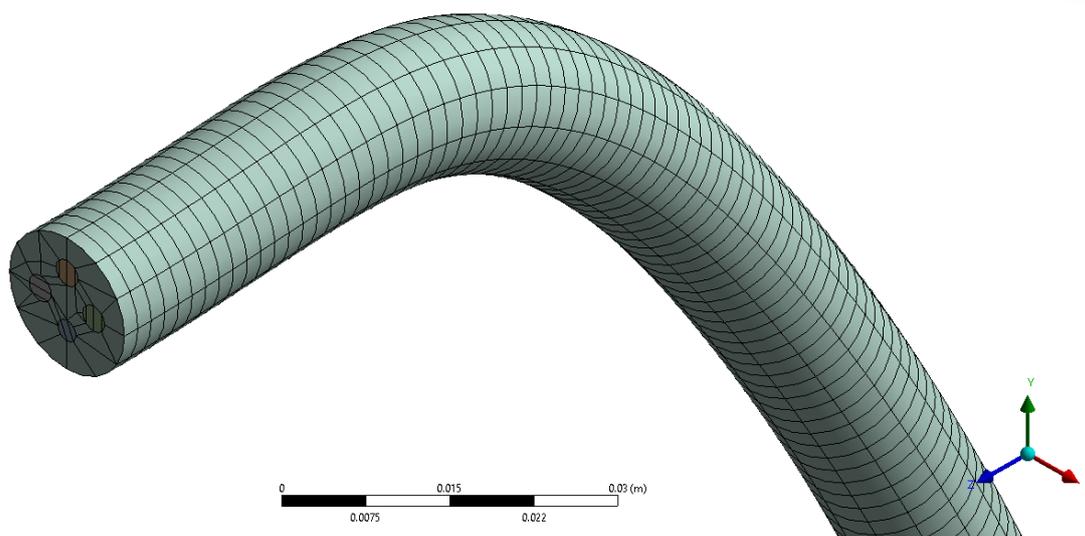


Рис. 3 – Фрагмент конечно-элементной сетки

Таблица 1 – Механические параметры материалов кабеля

Обозначение	E , Па	ν	ρ , кг/м ³	σ_t , Па	σ_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	64×10^6 / 167×10^6	$93,5 \times 10^6$ / 197×10^6
ПВХ	3×10^9	0,385	979,6	-	40×10^6

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 $A = 2,2 \times 10^{-5}$ м², а средний момент инерции $I = 1,28 \times 10^{-10}$ м⁴. 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.

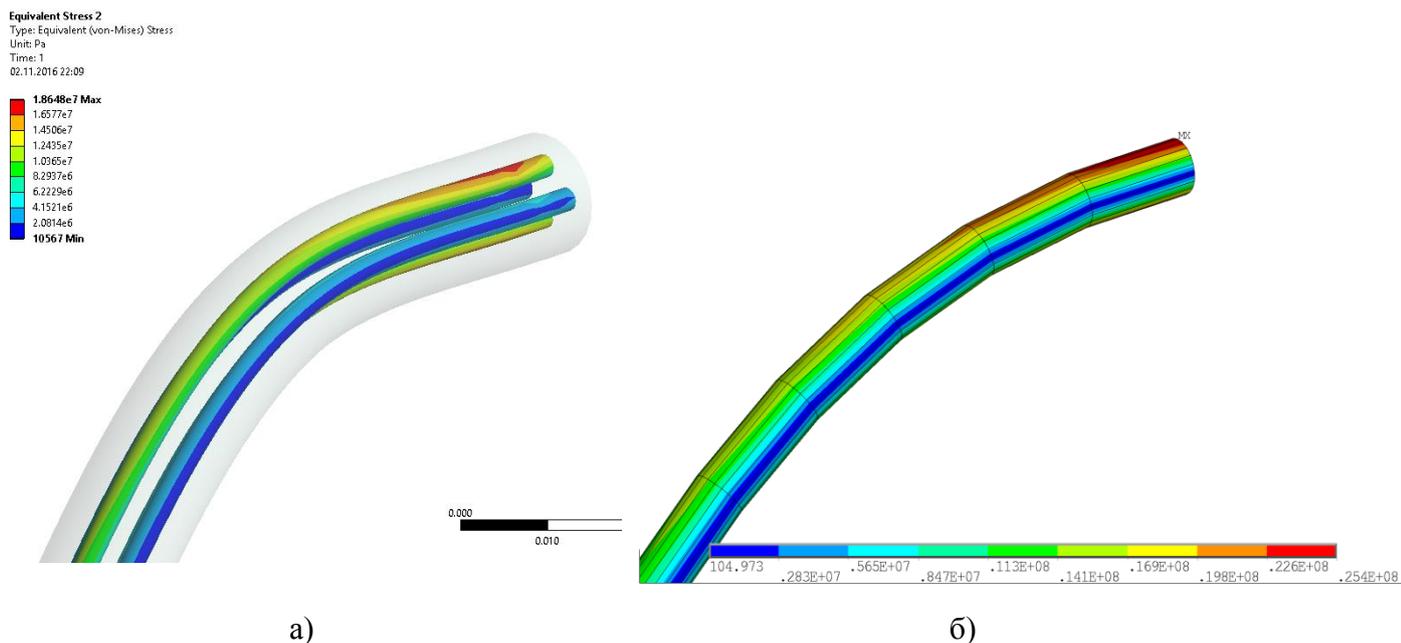


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в жилах кабеля, Па:
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

Таблица 2 – Результаты расчета частот собственных колебаний кабеля

№ частоты	f , Гц		Расхождение, %
	3D модель	балочная модель	
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

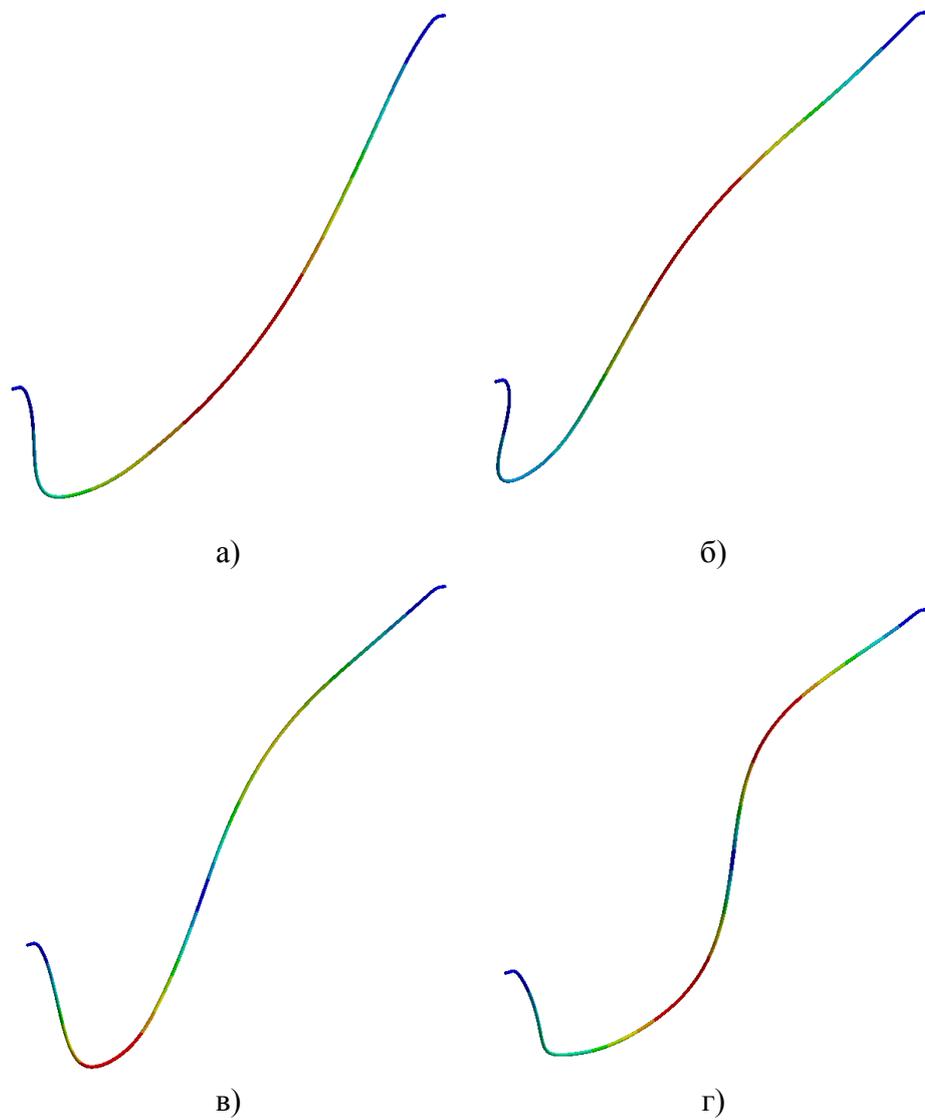


Рис. 5 – Формы собственных колебаний для первых четырех частот (согласно табл. 2):

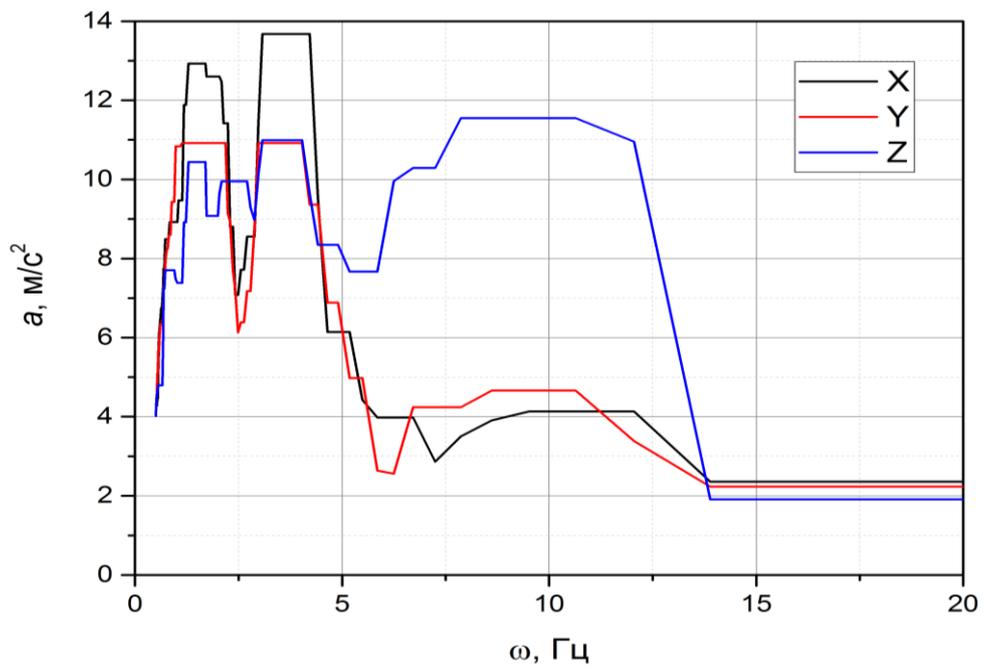


Рисунок 6 – Спектры ответа опор кабеля

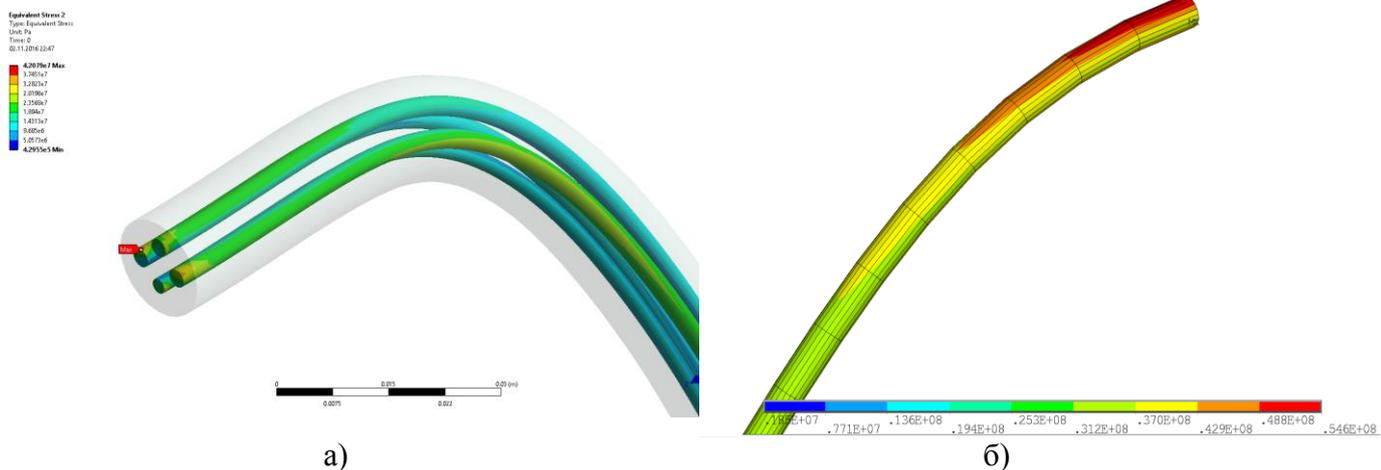


Рисунок 7 – Эквивалентные напряжения по Мизесу, Па:
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

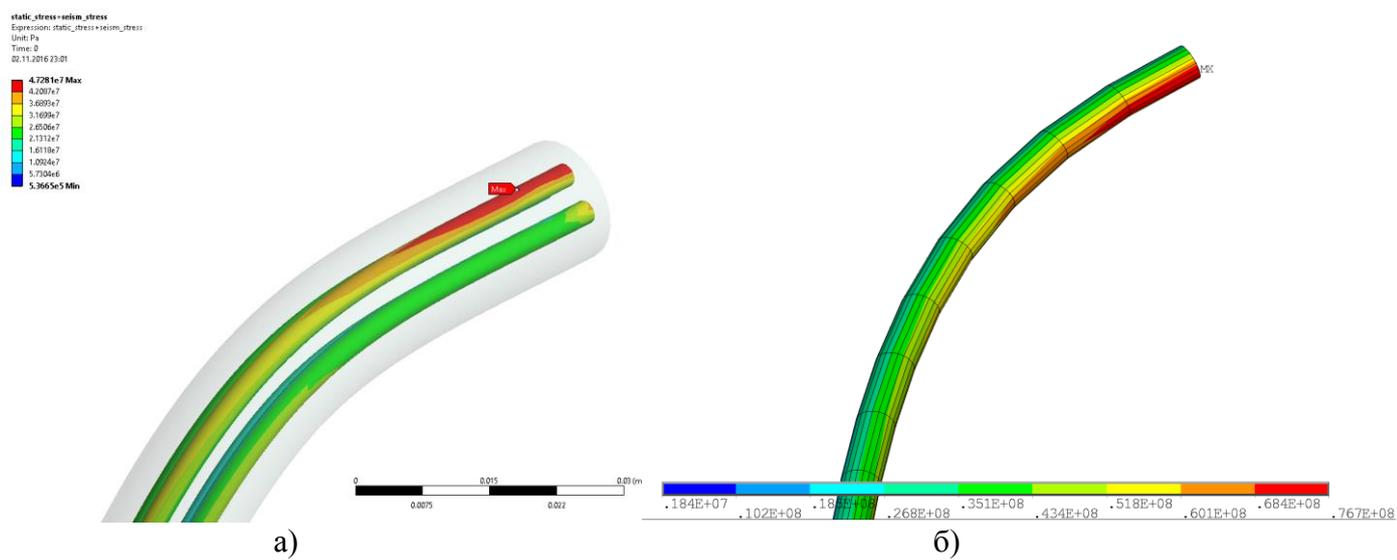


Рисунок 8 – Суммарные эквивалентные напряжения по Мизесу, Па:
 а) – 3D модель; б) – балочная модель

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:

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

SUMMARY

Cable structures are an integral part of the nuclear power plants. This paper deals with the construction of three-dimensional and beam finite element models of the cable. Numerical determination of the parameters of the cable stress-strain state under the action of static and seismic loads is performed. A comparative analysis of the results obtained by the models is made. The estimation of the cable resistance to seismic loading is estimated.

РЕЗЮМЕ

Кабельные конструкции являются неотъемлемой частью оборудования АЭС. В работе рассматривается построение трехмерных и балочных конечно-элементных моделей кабеля в открытой прокладке. Проведено численное определение параметров-напряженно-деформированного состояния кабеля, возникающего под действием статических и сейсмических нагрузок. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных по построенным моделям. Дана оценка прочности кабеля.

РЕФЕРАТ

Водка А.А., Келин А.А., Нарыжная Р.Н., Трубаев А.И. Особенности расчетов кабелей в открытой прокладке на прочность при проведении их сейсмической квалификации // Международный научно-технический журнал «Теоретическая и прикладная механика», Минск, 2017г, вып.32. В работе построены конечно-элементные модели кабеля и с их помощью проведен расчет напряженного состояния и проведена оценка напряжений при действии сейсмических нагрузок. – Ил. 8. Табл. 3. Библ. 5.

ABSTRACT

Vodka O.O., Kelin A.O., Naryzhna R.N., Trubayev O.I. Features of calculation seismic resistance of cable structures NPP during their qualification // International scientific-technical journal "Theoretical and Applied Mechanics", Minsk, 2017, #32. In this paper we construct a finite-element model of the cable and use them to held state of stress calculation and evaluated the stress of action of seismic loads. - Fig. 8. Refs. 5.

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.