

УДК 621.039

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-28-35

Выбор границ расчетной схемы при экспериментально-расчетном подтверждении сейсмостойкости разветвленных трубопроводов атомных электростанций

А.В. Щугорев, П.С. Казновский, К.Г. Касьянов, А.А. Мухрыгин, С.И. Рясный

Необходимость расчетно-экспериментального подтверждения сейсмостойкости оборудования атомных электростанций (АЭС) с определением его собственных динамических характеристик определяется неизбежными отступлениями от первоначального проекта в процессе монтажа.

При расчетно-экспериментальном подтверждении сейсмостойкости наиболее трудоемким этапом является расчет на сейсмостойкость с верификацией расчетной схемы по результатам экспериментального определения собственных частот оборудования.

Продемонстрирован способ снижения трудозатрат на проведение расчета посредством сокращения и упрощения расчетной схемы с последующей коррекцией с использованием экспериментальных значений собственных частот. Упрощение расчетной схемы достигается путем обоснованного исключения некоторых участков трубопровода и замены их действия на оставшуюся часть упругими связями, жесткость которых уточняется экспериментально с использованием экспериментальных значений частот затухающих колебаний оборудования.

Рассмотрена фильтр-ловушка паров натрия совместно с прилегающими протяженными участками трубопровода, моделирование которых — весьма трудоемкая задача. Ограничивать сокращенную расчетную схему целесообразно в точках расположения скользящих опор, поскольку это позволит минимизировать количество упругих связей, моделирующих воздействие отброшенных участков. Экспериментальные частоты сопоставлены с расчетными. В рассмотренном примере выявлено несоответствие низших расчетных частот экспериментальным при явном соответствии частот с более высоким номером, которое объясняется локальным характером воздействий при проведении испытаний.

В процессе упрощения схемы отброшены участки трубопровода за скользящими опорами, их действие заменено упругими связями, жесткость которых подобрана исходя из критерия совпадения низших экспериментальных собственных частот с расчетными.

Для полной и упрощенной схемы проведены расчеты на сейсмостойкость. Вычислены механические напряжения в опорной раме фильтра-ловушки. Напряжения, полученные при расчете по упрощенной схеме, оказались выше напряжений, полученных с использованием полной схемы. Разность максимумов значений напряжений при сопоставлении результатов расчета по полной и упрощенной схемам составляет не более 8 %.

Ключевые слова: сейсмостойкость, динамические характеристики, собственные частоты, декременты колебаний, расчетно-экспериментальный метод.

Для цитирования: Щугорев А.В., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Мухрыгин А.А., Рясный С.И. Выбор границ расчетной схемы при экспериментально-расчетном подтверждении сейсмостойкости разветвленных трубопроводов атомных электростанций // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 28—35. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-28-35.

Selecting the Computation Model Boundaries in Performing Combined Experimental and Numerical Confirmation of NPP Branched Pipework Seismic Stability

A.V. Shchugorev, P.S. Kaznovsky, K.G. Kasyanov, A.A. Mukhrygin, S.I. Ryasny

Unavoidable deviations from the initial design solutions that are made in the course of installation work during NPP construction generate the need to perform combined numerical and experimental confirmation of plant equipment seismic stability with determining its natural dynamic characteristics.

The most labor-consuming stage of activities aimed at performing combined experimental and numerical confirmation of NPP equipment seismic stability includes seismic stability numerical analysis with verifying the computation model against the experimentally determined values of equipment natural frequencies.

A way in which the effort taken to carry out the calculation can be decreased by reducing and simplifying the computation model with subsequently adjusting it using the experimentally obtained natural frequencies is demonstrated. Simplification of the computation model is achieved by excluding, with the necessary substantiation, some of pipeline sectors with replacing their effect on the remaining portion by elastic constraints, the stiffness of which is refined based on the experimental values of the equipment natural damped vibration frequencies.

A sodium vapor trap jointly with the adjacent extended pipeline segments (the modeling of which is a very labor consuming task) is considered. It is advisable to limit the reduced computation model at the sliding support location points, because this will make it possible to minimize the number of elastic constraints modeling the effect of truncated fragments.

The experimentally obtained frequencies are compared with their calculated values. In the considered example, it is found that there is a mismatch between the experimental and calculated values of the lowest frequencies, whereas the higher frequencies are found to be in good agreement with each other, which is attributed to a local nature of disturbances applied in the tests.

In the course of simplifying the computation model, the pipeline parts behind the sliding supports were truncated. The effect of the truncated parts was replaced by elastic constraints the stiffness of which was selected proceeding from the criterion of coincidence between the experimental and calculated values of the lowest frequencies.

Seismic stability calculations were carried out for the full and simplified computation models. The mechanical stresses arising in the trap filter supporting frame are calculated. The stress values obtained using the simplified model were found to be higher than those obtained using the full model. The maximal stresses estimated from the full and reduced models differ from each other by no more than 8%.

Key words: seismic stability, dynamic characteristics, natural frequencies, vibration decrements, combined calculation and experimental method.

For citation: Shchugorev A.V., Kaznovsky P.S., Kasyanov K.G., Mukhrygin A.A., Ryasny S.I. Selecting the Computation Model Boundaries in Performing Combined Experimental and Numerical Confirmation of NPP Branched Pipework Seismic Stability. MPEI Vestnik. 2018;4:28—35. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-28-35.

В связи с возможными отступлениями от первоначального проекта в процессе монтажа систем и оборудования энергоблоков АЭС (изменениями трассировки трубопроводов, отличиями массовых и геометрических характеристик поставленного оборудования от проектных, вариацией условий раскрепления), а также особенностями работы опорно-подвесной системы, собственные динамические характеристики оборудования и, как следствие, воспринимаемые оборудованием сейсмические нагрузки после ввода в эксплуатацию могут отличаться от расчетных, заложенных в проекте [1]. Этим определяется необходимость изучения динамических характеристик систем и элементов оборудования АЭС при экспериментально-расчетном подтверждении сейсмостойкости на этапе ввода в эксплуатацию, включающем проведение экспериментов по определению собственных динамических характеристик оборудования и расчеты на сейсмостойкость, учитывающие результаты эксперимента [2, 3]. Однако в случае протяженных и разветвленных систем трубопроводов расчет весьма трудоемок [4 — 11].

Рассмотрен вариант снижения трудозатрат на проведение расчета с учетом экспериментально полученных собственных динамических характеристик оборудования. Проанализирована фильтр-ловушка паров натрия, а также прилегающие участки трубопровода примени-

тельно к энергоблоку № 4 Белоярской АЭС с реактором БН-800. Оборудование заполнено натриевым теплоносителем с температурой 150 °С. В качестве границ расчетной схемы приняты неподвижные опоры, жесткие заделки и места присоединения к массивному оборудованию. В расчете установлены такие критерии сейсмостойкости, как прочности опорной рамы, прилегающих участков трубопровода, болтов крепления ловушки к раме и крепления рамы к закладным.

Методика [3] предусматривает экспериментальное определение собственных частот оборудования методом свободных затухающих колебаний. Полученные частоты помимо верификации полной схемы делают возможным ее упрощение путем определения новых границ с последующей коррекцией по экспериментально определенным частотам. Упрощенная расчетная схема получается путем исключения некоторых участков трубопровода из расчетной схемы и замены их действия на оставшуюся часть упругими связями. Ограничение схемы целесообразно в точках расположения скользящих опор, поскольку такой подход позволит минимизировать количество упругих связей, моделирующих воздействие отброшенных участков.

Расчетная схема (рис. 1) состоит из протяженных участков трубопроводов и ее моделирование является весьма затратной задачей.

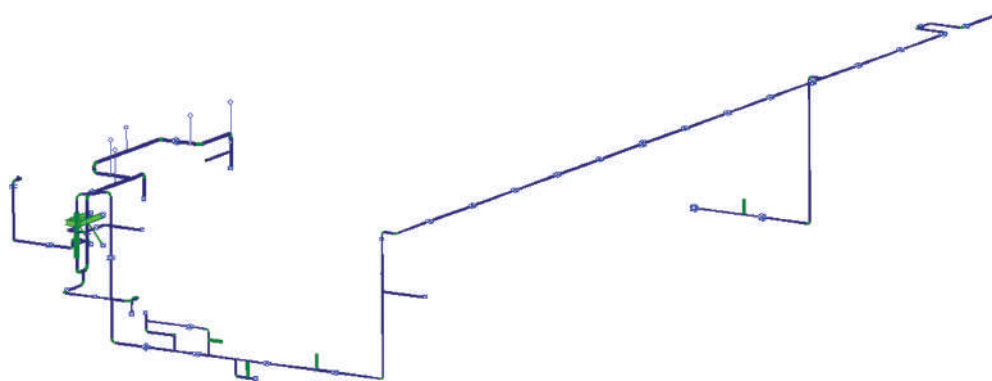


Рис. 1. Полная расчетная схема

Собственные частоты ловушки паров натрия, полученные экспериментальным путем, приведены в первом столбце табл. 1, а во втором столбце указаны собственные частоты полной расчетной схемы (рис. 2). В результате сопоставления экспериментально полученных частот с расчетными выявлено явное соответствие частот: 21; 30,5; 34,5; 37,5; 40,5; 58,7 Гц. Несоответствие низших расчетных частот экспериментальным объясняется локальным характером воздействий возбуждающих колебаний при проведении испытаний. Максимальные амплитуды низших собственных форм реализуются на значительном удалении от фильтр-ловушки (рис. 3). Собственные формы расчетной схемы, соответствующие экспериментально полученным частотам, являются формами колебаний опорной рамы и прилегающих участков трубопровода.

Рассмотрим упрощенную расчетную схему. В процессе упрощения участки трубопровода в точках скользящих опор отброшены и заменены упругими связями, жесткость которых подобрана, исходя из собственных частот колебаний фильтр-ловушки, полученных экспериментальным путем. Сопоставление четырех собственных форм колебаний полной и упрощенной расчетных схем дано на рис. 4 — 6, где продемонстрировано удовлетворительное совпадение форм колебаний. Формы колебаний, удаленные от фильтр-ловушки, соответствующие низшим собственным частотам полной расчетной схемы, в упрощенной схеме не отражены.

Рассмотрим результаты расчета и проверим критерии сейсмостойкости. В качестве нагрузки примем

спектры ответа для высотной отметки +16 здания реактора. Сравнение напряжений в опорной раме для полной и упрощенной расчетных схем показано на рис. 7.

Напряжения, полученные при расчете по упрощенной схеме, выше напряжений, полученных при расчете по полной схеме, следовательно, в настоящем случае

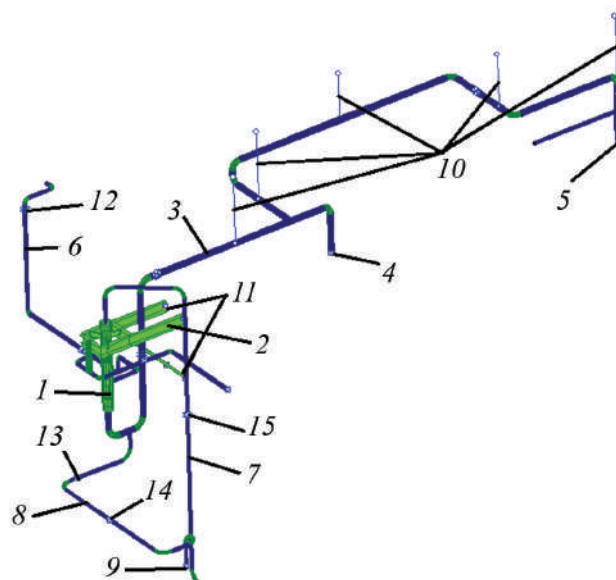


Рис. 2. Фрагмент расчетной модели:

1 — фильтр-ловушка паров натрия; 2 — опорная рама; 3 — трубопроводы раздачи «чистого» аргона после ловушек паров натрия; 4, 5 — баки; 6 — трубопровод сжатого воздуха от ловушек; 7 — трубопроводы раздачи «чистого» аргона к ловушкам паров натрия; 8 — трубопровод сжатого воздуха до ловушек; 9 — бак; 10 — пружинные подвески; 11 — закладные; 12 — 15 — неподвижная опора

Таблица 1

Сопоставление экспериментальных и расчетных собственных частот

Собственные частоты, полученные экспериментально, Гц	Номер форм колебаний	Собственные частоты полной схемы, Гц	Номер форм колебаний	Собственные частоты упрощенной схемы, Гц
—	30	9,370	1	9,370
—	31	9,490	2	9,720
—	40	13,38	3	13,41
—	45	16,52	4	16,31
—	47	17,37	5	17,73
21,0	55	21,06	6	21,12
—	61	24,79	7	24,77
—	66	27,10	8	26,38
30,5	70	29,94	9	29,65
34,5	76	35,32	11	35,40
37,5	79	37,97	12	38,04
41,0	83	42,56	13	43,52
—	84	44,27	14	43,97
—	85	46,83	15	46,58

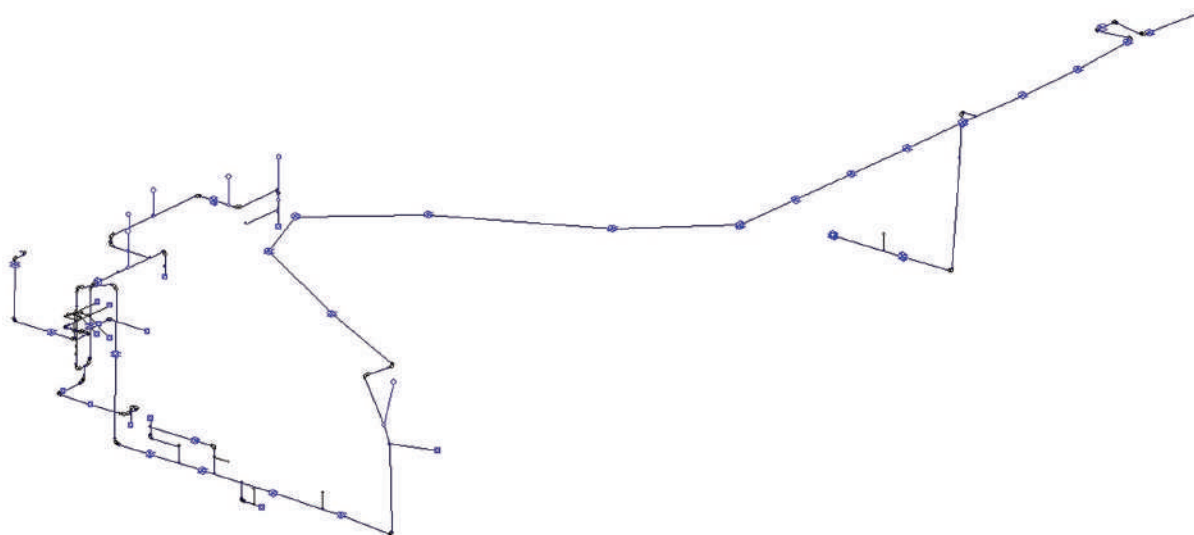


Рис. 3. Форма колебаний, соответствующая низшей расчетной частоте

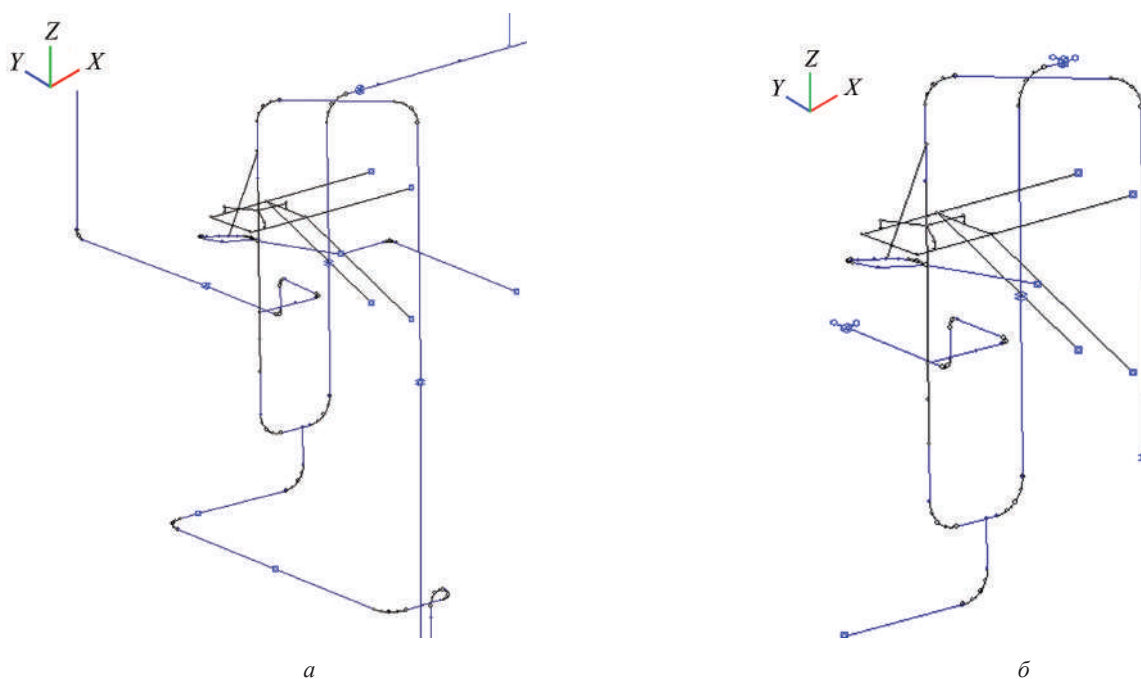


Рис. 4. Собственные формы колебаний с частотой 13,4 Гц для полной (а) и упрощенной (б) расчетных схем

оценка напряжений с применением упрощенной схемы является консервативной.

Сравнение напряжений в прилегающих участках трубопровода для полной и упрощенной расчетных схем приведено на рис. 8, а численные значения интенсивности напряжений — в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что напряжения, полученные при расчете по упрощенной схеме, незначительно отличаются от данных, полученных при расчете по полной схеме.

Рассмотрим усилия в узлах крепления фильтровальщи к опорной раме (табл. 3) и в узлах крепления опорной рамы к закладным (табл. 4).

Исходя из представленного сопоставления собственных форм, частот, напряжений и усилий можно сделать вывод, что предложенное упрощение расчетной схемы путем определения новых границ в точках скользящих опор с добавлением упругих связей, жесткость которых определяется при помощи экспериментально полученных собственных частот, является корректным. Рассматриваемый метод пространственного сокращения расчетной схемы при условии предварительного проведения динамических испытаний по определению собственных частот существенно сокращает трудозатраты на ее составление и моделирование при расчетах на сейсмостойкость.

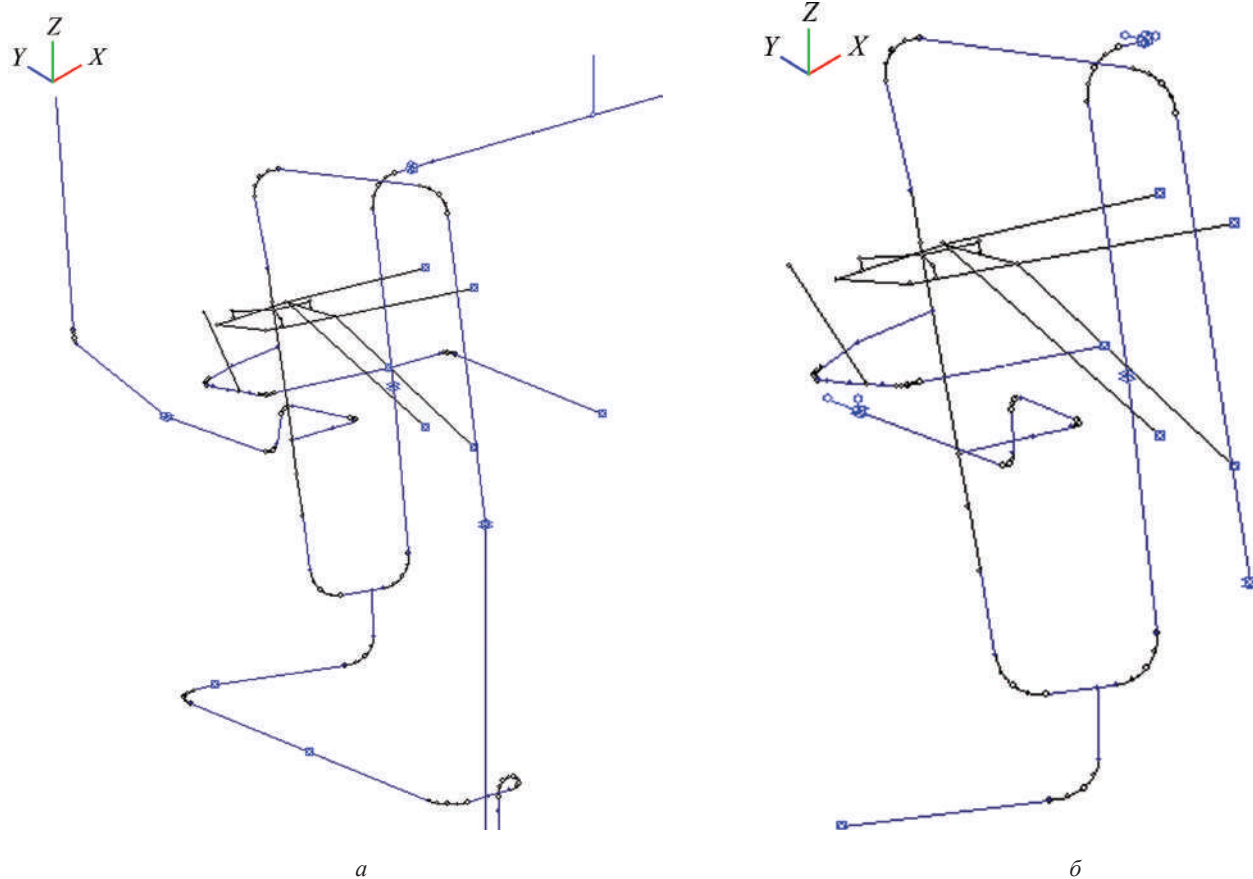


Рис. 5. Собственные формы колебаний с частотой 16,5 Гц для полной (а) и упрощенной (б) расчетных схем

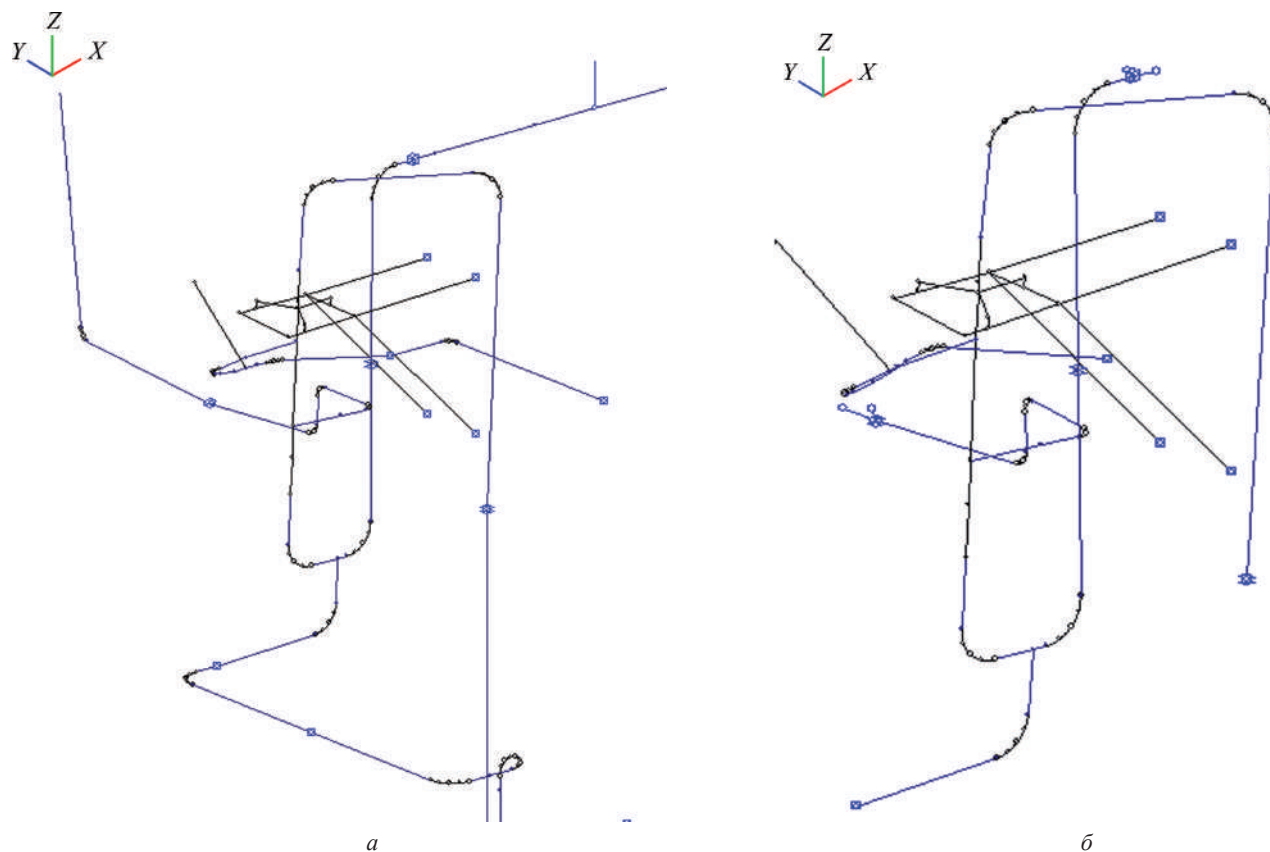


Рис. 6. Собственные формы колебаний с частотой 21,1 Гц для полной (а) и упрощенной (б) расчетных схем

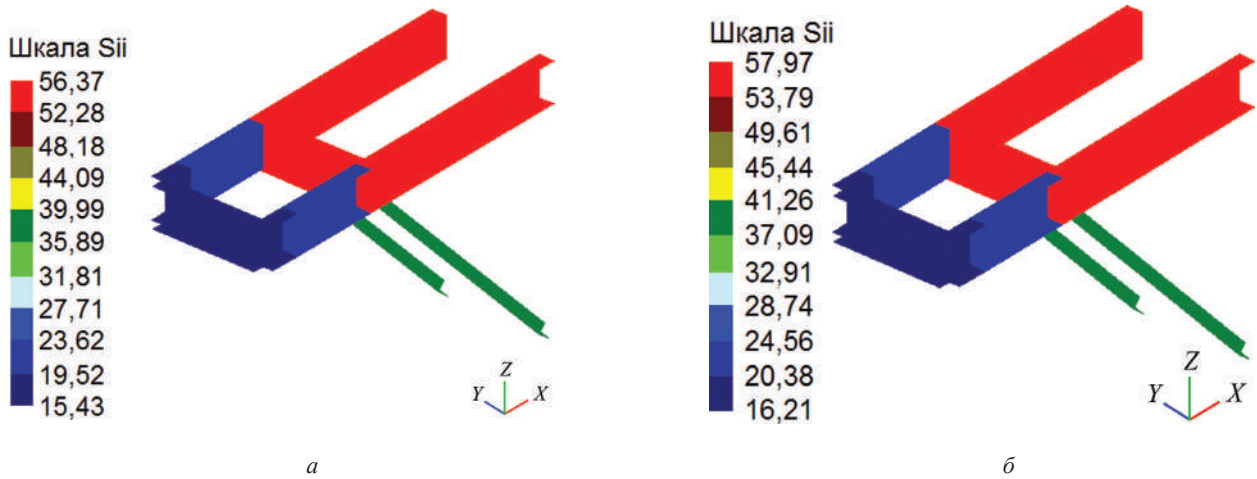


Рис. 7. Интенсивность напряжений в расчетной раме для полной (а) и упрощенной (б) расчетных схем

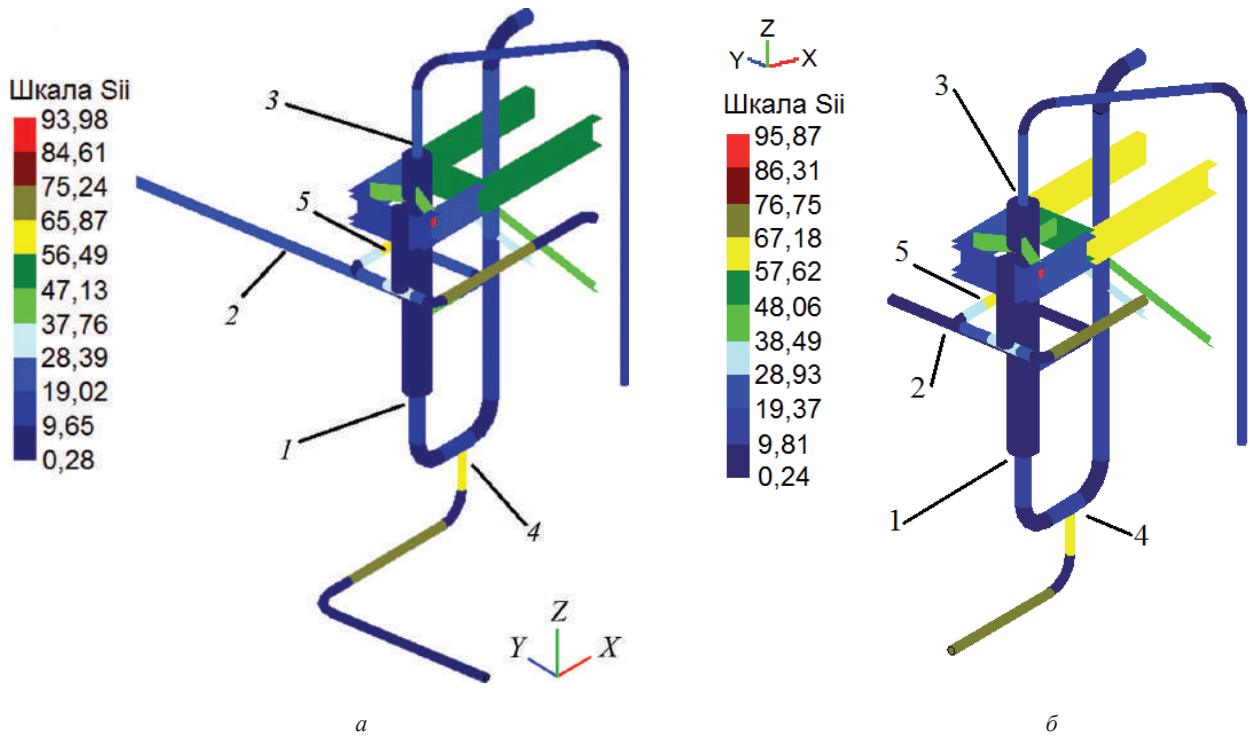


Рис. 8. Интенсивность напряжений в прилегающих участках трубопровода для полной (а) и упрощенной (б) расчетных схем: 1 — 5 — номера трубопроводов

Таблица 2

Интенсивности напряжений для полной и упрощенной расчетных схем

Номер трубопровода	Максимальные напряжения, МПа	
	Полная схема	Упрощенная схема
1	14,6	15,4
2	19,3	20,7
3	21,6	21,8
4	66,7	69,1
5	73,9	74,7

Таблица 3

Усилия в узлах крепления фильтр-ловушки к опорной раме

Направление	Полная схема	Сокращенная схема
X	3716 Н	3631 Н
Y	1504 Н	1568 Н
Z	1147 Н	1054 Н

Таблица 4

Усилия в узлах крепления опорной рамы к закладным

Направление	Полная схема	Сокращенная схема
Узел 47		
<i>PX</i>	9387,64	9596,8
<i>PY</i>	1485,25	1530,14
<i>PZ</i>	726,74	743,55
Узел 48		
<i>PX</i>	9480,35	9723,62
<i>PY</i>	1502,99	1548,71
<i>PZ</i>	794,82	804,301
Узел 58		
<i>PX</i>	5413,7	5481,87
<i>PY</i>	49,1831	50,3026
<i>PZ</i>	5574,28	5643,94
Узел 59		
<i>PX</i>	5333,84	5461,62
<i>PY</i>	49,794	50,9175
<i>PZ</i>	5492,21	5623,03

Литература

1. Казновский П.С., Казновский А.П., Сааков Э.С., Рясный С.И. Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа // Электрические станции. 2012. № 12. С. 2—6.
2. НП-064—17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.
3. МТ 1.2.2.04.0069—2012. Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности.
4. Казновский П.С. и др. Экспериментально-расчетное подтверждение сейсмостойкости разветвленных трубопроводных систем АЭС // Электрические станции. 2016. № 12. С. 32—35.
5. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.
6. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998.
7. Прочность. Устойчивость. Колебания / под общ. ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968.
8. Fundamental Safety Principles. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2006. No. SF 1.
9. Seismic Design and Qualification For Nuclear Power Plants. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2003. No. NS-G-1.6.

10. Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2009. No. NS-G-2.13.

11. Earthquake Experience and Seismic Qualification by Indirect Methods in Nuclear Installations. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.

References

1. Kaznovskiy P.S., Kaznovskiy A.P., Saakov E.S., Ryasnyy S.I. Podtverzhenie Seysmostoykosti Oborudovaniya AES Posle Montazha. Elektricheskie Stantsii. 2012;2:2—6. (in Russian).
2. NP-064—17. Uchet Vneshnih Vozdeystviy Prirodnogo i Tekhnogenogo Proiskhozhdeniya na Ob'ekty Ispol'zovaniya Atomnoy Energii. (in Russian).
3. МТ 1.2.2.04.0069—2012. Metodika Podtverzhdeniya Dinamicheskikh Harakteristik Sistem i Elementov Energoblokov AES, Vazhnyh dlya Bezopasnosti. (in Russian).
4. Kaznovskiy P.S. i dr. Eksperimental'no-raschetnoe Podtverzhenie Seysmostoykosti Razvetvlennykh Truboprovodnykh Sistem AES. Elektricheskie Stantsii. 2016;12:32—35. (in Russian).
5. NP-031-01. Normy Proektirovaniya Seysmostoykikh Atomnykh Stantsiy. (in Russian).
6. Birbraer A.N. Raschet Konstruktsiy na Seysmostoykost'. SPb.: Nauka, 1998. (in Russian).
7. Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya / pod obshch. red. I.A. Birgera, Ya.G. Panovko. M.: Mashinostroenie, 1968. (in Russian).
8. Fundamental Safety Principles. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2006;SF 1.
9. Seismic Design and Qualification For Nuclear Power Plants. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2003;NS-G-1.6.
10. Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2009;NS-G-2.13.
11. Earthquake Experience and Seismic Qualification by Indirect Methods in Nuclear Installations. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003.

Сведения об авторах

Щугорев Алексей Владимирович — кандидат технических наук, ассистент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ», e-mail: Schugorev@atech.ru

Казновский Павел Станиславович — кандидат технических наук, начальник отдела сейсмической безопасности АО «Атомтехэнерго», e-mail: Kaznovskyps@atech.ru

Касьянов Константин Геннадьевич — кандидат технических наук, главный специалист отдела сейс-

мической безопасности АО «Атомтехэнерго», e-mail: kasyanov@atech.ru

Мухрыгин Алексей Алексеевич — инженер отдела сейсмической безопасности АО «Атомтехэнерго», e-mail: Mukhrygin@atech.ru

Рясный Сергей Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: Ryasny@atech.ru

Information about authors

Shchugorev Aleksey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant of Robotics, Mechatronics and Machines Dynamic and Strengt Dept., NRU MPEI, e-mail: Schugorev@atech.ru

Kaznovsky Pavel S. — Ph.D. (Techn.), Head of Seismic Safety Dept., JSC «Atomtechenergo», e-mail: Kaznovskyps@atech.ru

Kasyanov Konstantin G. — Ph.D. (Techn.), Leading Specialist of Seismic Safety Dept., JSC «Atomtechenergo», e-mail: Kasyanov@atech.ru

Mukhrygin Aleksey A. — Engineer of Seismic Safety Dept., JSC «Atomtechenergo», e-mail: Mukhrygin@atech.ru

Ryasny Sergey I. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: Ryasny@atech.ru

Статья поступила в редакцию 02.10.2017