

Анализ собственных динамических характеристик трубопроводной арматуры АЭС при оценке её сейсмостойкости с учётом влияния параметров жёсткости

- Казновский А. П.¹, канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Казновский П. С., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Дерий В. П., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Сааков Э. С., доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи
- Рясный С. И., доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”, Московская обл., Мытищи

Выполнен анализ экспериментально полученных собственных частот и декрементов колебаний для включённых в базу данных 766 единиц трубопроводной арматуры АЭС с вынесенным ручным или электрическим приводом. Показано, что при расчётном обосновании сейсмостойкости арматуры необходимо учитывать несколько декрементов, соответствующих различным направлениям воздействий, а также условный проход D_y стыкуемого трубопровода и значения собственных частот. Приведены графические зависимости для определения консервативных значений декрементов колебаний трубопроводной арматуры с различными параметрами, которые свидетельствуют о необходимости уточнения нормативных требований, действующих по отношению к трубопроводной арматуре. Предложено в случае отсутствия прямых экспериментальных данных принимать значения декрементов в соответствии с эмпирически полученными графическими зависимостями, связанными с набором параметров трубопроводной арматуры, условно характеризующих её жёсткость (диаметр стыкуемой трубы, наличие опор, направление воздействия и собственные частоты колебаний). Это заметно повысит надёжность предварительных оценок сейсмостойкости арматуры на стадиях её разработки и проектирования.

Ключевые слова: сейсмостойкость, трубопроводная арматура, динамические характеристики, собственные частоты, декременты колебаний, жёсткость.

К существенной особенности применяемой в России методологии оценки сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов оборудования АЭС, отражённой в российской нормативной документации, относится требование обязательного изучения динамических характеристик (собственных частот и декрементов колебаний) важных для безопасности систем и элементов (кроме зданий и сооружений) методом динамических испытаний в реальных натуральных условиях раскрепления и обвязки непосредственно на АЭС [1]. Необходимость определения собственных динамических характеристик в реальных натуральных условиях (после монтажа оборудования) определяется резонансным характером сейсмических воздействий, когда в зависимости от значений собственных динамических характеристик оборудования нагрузки на него могут изменяться на порядки и более.

Расчётно-экспериментальный метод поэлементной проверки на сейсмостойкость важных для безопасности систем энергоблоков АЭС [2]

включает экспериментальное определение динамических характеристик в реальных условиях раскрепления и обвязки. Получаемые экспериментальные данные позволяют уточнить или определить проектные нагрузки на оборудование и арматуру от сейсмических воздействий и оценить фактическую сейсмостойкость оборудования в составе технологических систем АЭС. При необходимости разрабатываются и внедряются компенсирующие мероприятия. В результате применение метода может гарантировать целостность важных для безопасности систем и выполнение их элементами своих функций при учитываемых проектом сейсмических воздействиях.

Запорно-регулирующая арматура как единица оборудования входит в состав всех технологических систем атомной станции с энергоблоками любого типа. На блоке АЭС эксплуатируется более 10 000 единиц арматуры, из них свыше 80% приходится на высокоответственную запорную и запорно-регулирующую арматуру и около 35% – на электроприводную. При этом, по данным международной группы экспертов по повышению технического уровня и совершенствованию арматуры

¹ Казновский Арсений Павлович: kaznovskyap@atech.ru

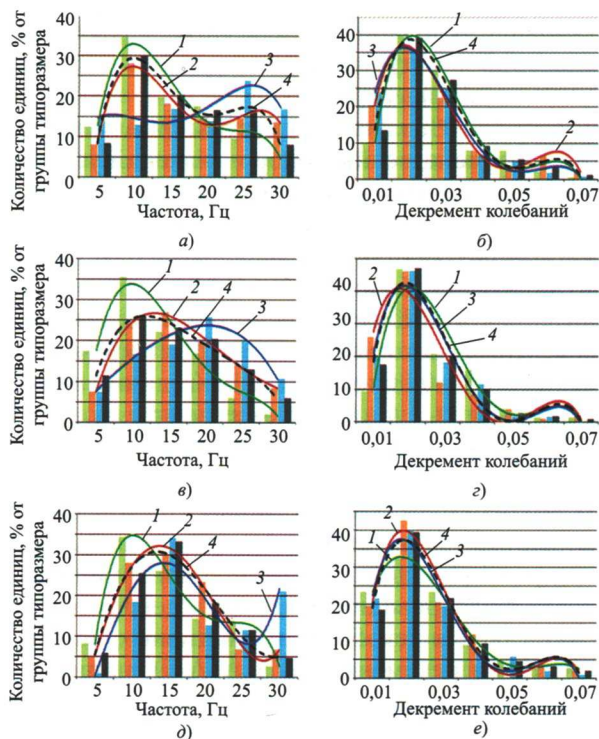


Рис. 1. Распределение трубопроводной арматуры без собственных опор с различными условными проходами трубопроводов D_y в зависимости от резонансных частот и декрементов колебаний:

а, б – распределение вдоль трубопровода (ось X); *в, г* – поперёк трубопровода (ось Y); *д, е* – вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – 4 полиномиальные кривые для различных условных проходов D_y ; 1 – D_y 10 – 50; 2 – D_y 65 – 125; 3 – D_y 150 – 600; 4 – D_y 10 – 600

АЭС, она занимает первое место по влиянию на надёжность и безопасность АЭС в целом [3].

В [4] был представлен анализ накопленного банка данных по результатам натурных динамических испытаний тепломеханического оборудования при его аттестации на сейсмостойкость, включающего значения низших собственных частот и соответствующих декрементов колебаний, определённых для выбранных 1684 единиц ответственного за безопасность оборудования АЭС, а также динамических испытаний механически автономного (не имеющего внешних обвязок) оборудования, предназначенного для поставок на АЭС, выполненных на предприятиях-изготовителях.

В составе рассмотренного банка данных была представлена трубопроводная арматура с вынесенным ручным или электрическим приводом без собственных опорных конструкций (группа K) и с опорной конструкцией непосредственно под арматурой (группа L). Для группы K были проанализированы 464 единицы оборудования, для группы L – 302 единицы. Следует обратить внимание на то, что по результатам статистического анализа около 50% всей обследованной арматуры имеют резонансные частоты меньше 33 Гц в сочетании с декрементами колебаний меньше 0,02, а в норма-

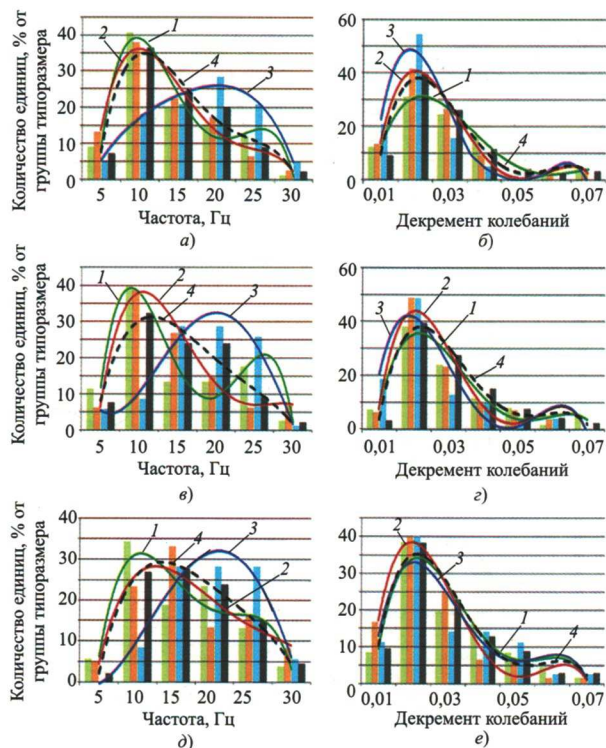


Рис. 2. Распределение трубопроводной арматуры с собственными опорами с различными условными проходами трубопроводов D_y в зависимости от резонансных частот и декрементов колебаний:

а, б – распределение вдоль трубопровода (ось X); *в, г* – поперёк трубопровода (ось Y); *д, е* – вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – D_y 10 – 15; 2 – D_y 20 – 80; 3 – D_y 100 – 600; 4 – D_y 10 – 600

тивном документе [5] регламентируются значения декрементов колебаний для оборудования и трубопроводов больших ($D_y > 300$ мм) и малых ($D_y < 300$ мм) диаметров в диапазоне от 0,01 до 0,03.

В настоящей статье приведены результаты исследования влияния на значения собственных динамических характеристик трубопроводной арматуры параметров, условно характеризующих ее жёсткость: наличия опор непосредственно под арматурой, условного прохода стыкуемого трубопровода (D_y), а также направлений динамических воздействий.

На рис. 1 и 2 приводятся диаграммы и графики распределения количества единиц арматуры без собственных опор (отсутствует закрепление непосредственно под арматурой или вблизи арматуры) и с собственными опорами соответственно в зависимости от резонансных частот и декрементов колебаний, а также условных проходов трубопроводов D_y и направлений воздействий.

В данном случае анализ выполнялся для диапазонов частот 0 – 30 Гц и декрементов колебаний 0,005 – 0,07. Было проанализировано 325 единиц арматуры без собственных опор для направления по оси X , 377 – для направления по оси Y , 351 –

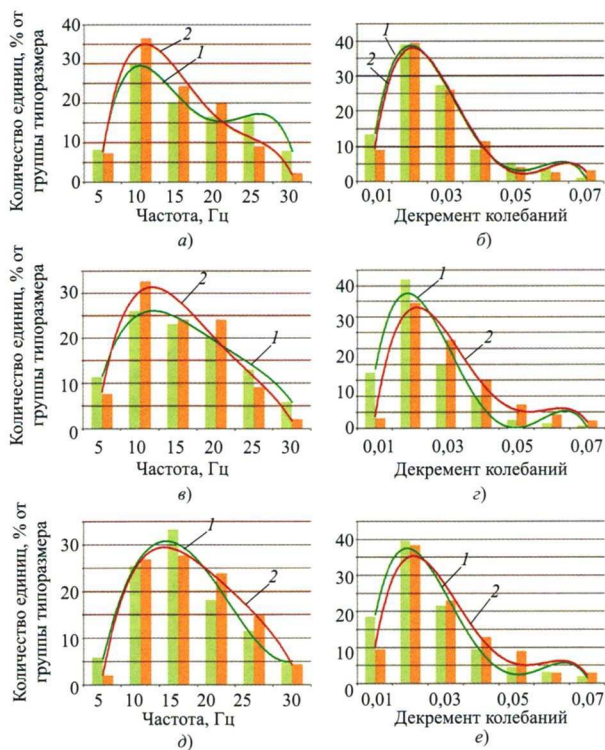


Рис. 3. Сопоставление распределений трубопроводной арматуры с собственными опорами и без собственных опор в зависимости от резонансной частоты и декрементов колебаний для условного прохода D_y 10 – 600:

а, б – распределение вдоль трубопровода (ось X); в, г – поперёк трубопровода (ось Y); д, е – вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – полиномиальная кривая для арматуры без собственных опор; 2 – с собственной опорой

для направления по оси Z. Количество рассмотренных единиц арматуры с собственными опорами для направлений по оси X, Y и Z составило соответственно 219, 263 и 201. Для статистического анализа арматура была распределена по трём приблизительно равным подгруппам в зависимости от условных проходов трубопроводов D_y следующим образом: арматура с собственными опорами в подгруппы с D_y 10 – 15, 20 – 80, 100 – 600; без собственных опор в подгруппы с D_y 10 – 50, 65 – 125, 150 – 600.

Проведённый анализ полученных распределений, представленных на рис. 1 и 2, показал следующее:

условный проход трубопроводов D_y оказывает определённое влияние на распределения по частотам, более заметное для горизонтальных направлений X и Y. Максимумы кривых распределения арматуры для этих направлений с увеличением D_y от области 10 – 15(50) до 100(150) – 600 смещаются по частотам от 10 – 12 Гц до 20 – 25 Гц. Для вертикального направления Z такое же смещение наблюдается только для арматуры с собственными опорами;

влияние условного прохода D_y на характер распределений арматуры в зависимости от декрементов колебаний значительно слабее;

от 30 до 50% единиц арматуры (в зависимости от наличия собственных опор и значений условного прохода D_y) имеют декремент колебаний, близкий к 0,02. Декремент колебаний 10 – 15% единиц арматуры без собственных опор равен 0,01. Декремент колебаний более 0,05 в горизонтальных направлениях X и Y имеют единичные экземпляры. Для вертикального направления Z декременты колебаний 0,05 – 0,06 имеют 5 – 10% единиц арматуры, 0,07 – лишь единичные экземпляры.

Эти результаты не подтверждают рекомендации [5], предлагаемые для случаев отсутствия прямых экспериментальных данных. Одновременно полученные данные подтверждают неприменимость рекомендаций [6] об использовании во всех случаях фиксированного значения декремента колебаний 0,02 и тем более нормативных документов США и рекомендаций МАГАТЭ, принявших регламентное значение декремента 0,05.

Поскольку влияние диаметров трубопроводов на распределения собственных динамических характеристик арматуры неоднозначно, а на декременты колебаний вообще относительно невелико, был выполнен анализ распределения арматуры в зависимости от значений частот и декрементов колебаний арматуры с собственными опорами и без них без дифференциации по условным проходам D_y во всём анализируемом диапазоне их изменения от 10 до 600 мм. Результаты представлены на рис. 3.

Наличие опоры под арматурой относительно слабо влияет на характер распределения арматуры в зависимости от частоты и декрементов колебаний. Распределения по частотам вдоль оси Z (вдоль штока арматуры) практически совпадают. Также совпадают распределения по декрементам колебаний вдоль оси X трубопроводов. Наиболее распространённая частота колебаний арматуры для всех направлений составляет 10 – 12 Гц (от 25 до 35%), самый распространённый декремент колебаний – в районе 0,02 (от 35 до 40%).

Наличие опоры оказывает влияние на распределение арматуры по декрементам колебаний в направлениях Y и Z. Распределения для арматуры с собственными опорами смещаются в сторону увеличения декремента колебаний примерно на 0,003 относительно распределений для арматуры без опор. Кроме того, при наличии опоры существенно уменьшается количество единиц с декрементами 0,01 (на 15% для направления Y и на 10% для направления Z) и 0,02 (на 7% для направления Y и на 2% для направления Z).

Помимо этих исследований был выполнен подробный анализ минимальных значений декрементов колебаний и тенденции изменения средних значений декрементов в зависимости от условных

проходов трубопроводов D_y , направлений динамических воздействий и наличия или отсутствия опоры непосредственно под арматурой.

На рис. 4 приводятся зависимости средних значений декрементов колебаний от диаметров стыкуемых труб. Зависимости построены следующим образом: рассматривается диапазон декрементов от 0,005 до 0,1 в трёх частотных диапазонах 0 – 10, 10 – 20 и 20 – 30 Гц; значения декрементов для диаграмм определялись как средние арифметические для рассматриваемых частотных диапазонов и диапазонов условных проходов трубопроводов D_y ; по полученным точкам (D_y , $D_{\text{сред}}$) строились зависимости в виде линейных аппроксимаций. Полученные диаграммы позволяют определить тенденцию к возрастанию или убыванию декрементов колебаний трубопроводной арматуры, соответствующих резонансным частотам, с ростом диаметра условного прохода D_y стыкуемой трубы.

Из рис. 4 можно сделать следующие выводы:

для арматуры без собственных опор более высокие средние значения декрементов колебаний соответствуют более низким частотным диапазонам, т.е. значения декрементов колебаний арматуры, соответствующие частотам колебаний в диапазоне 0 – 10 Гц, в среднем выше значений, соответствующих частотам в диапазоне 10 – 20 Гц, которые в свою очередь выше значений, соответствующих частотам в диапазоне 20 – 30 Гц. Для арматуры с собственными опорами такая закономерность чётко просматривается только для направления по оси Z;

зависимости средних значений декрементов колебаний от условных проходов D_y для арматуры без собственных опор неоднозначны, но из-за слабого влияния условных проходов D_y на декременты им можно пренебречь;

для арматуры с собственными опорами для горизонтальных направлений по осям X и Y просматривается явная тенденция к снижению декремента. Для вертикального направления отмечен незначительный рост значений декремента колебаний.

На рис. 5 приводятся зависимости минимальных значений декрементов колебаний от условных проходов D_y трубопроводов, построенные следующим образом: для каждого условного прохода в трёх частотных диапазонах 0 – 10, 10 – 20 и 20 – 30 Гц определены минимальные значения декрементов колебаний; по полученным точкам (D_y , $D_{\text{мин}}$) построены зависимости в виде аппроксимаций полиномами второй степени. Значения приводятся с учётом фактора “малости возмущений” в виде коэффициента-множителя $k = 1,5$ [4] (пунктирные линии на рис. 5) и без учёта фактора (сплошные линии).

Предлагается в случае отсутствия реальных экспериментальных данных принимать значения декрементов в соответствии с полученными диа-

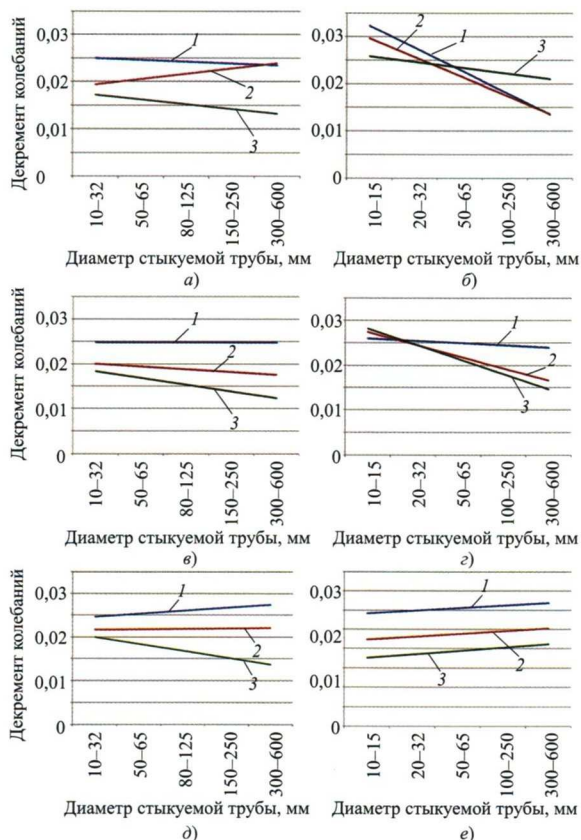


Рис. 4. График зависимости декрементов колебаний (среднеарифметических) трубопроводной арматуры без собственных опор (а, в, д) и с собственными опорами (б, г, е) от диаметров стыкуемой трубы:

а, б – для направления вдоль трубопровода (ось X); в, г – для направления поперёк трубопровода (ось Y); д, е – для направления вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – на частоте 0 – 10 Гц; 2 – на частоте 10 – 20 Гц; 3 – на частоте 20 – 30 Гц

граммами (рис. 5), выведенными эмпирически по результатам многочисленных испытаний и связанными с набором параметров оборудования, условно характеризующих его жёсткость (диаметр стыкуемой трубы, наличие опор, направление и собственная частота колебаний).

Следует отметить, что полученные минимальные значения декрементов (без учёта фактора “малости возмущений”) не превышают нормативного значения 0,02 из [6] и находятся в диапазоне от 0,004 до 0,017. Минимальному значению 0,004 соответствуют зарегистрированные колебания с частотами в диапазоне 0 – 10 Гц арматуры без собственных опор с условным проходом D_y 10 – 32 в направлениях Y и Z, D_y 125 – 600 с частотами 20 – 30 Гц в тех же направлениях и колебания арматуры с условным проходом D_y 65 – 250 с собственными опорами с частотами 20 – 30 Гц в тех же направлениях. В направлении по оси X значению 0,004 соответствуют колебания арматуры без собственных опор с условным проходом D_y 50 – 125 с частотами 10 – 20 Гц. С учётом фактора “малости возмущений” минимальные значения декрементов

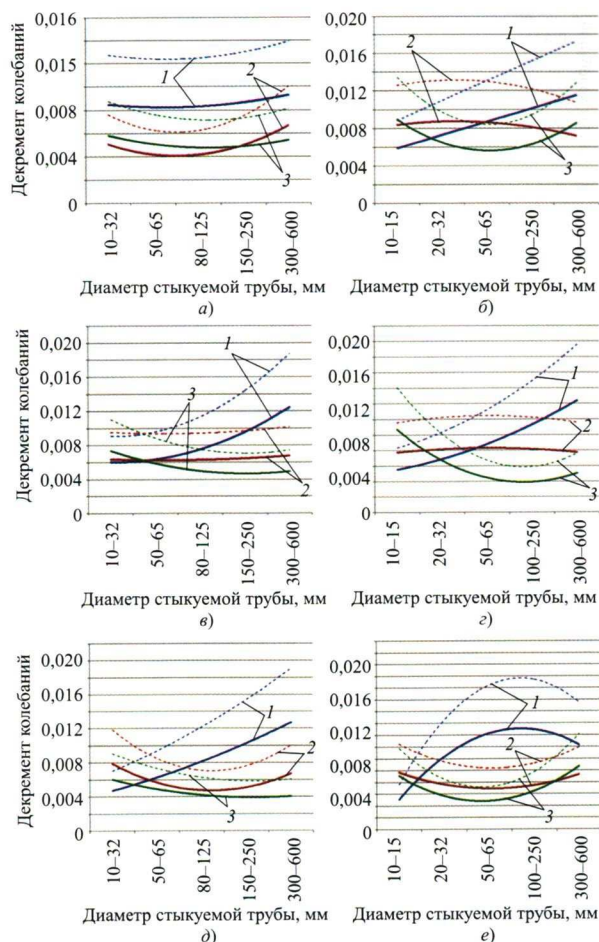


Рис. 5. Минимальные значения декрементов колебаний (нижняя граница) арматуры без собственных опор (а, в, д) и с собственными опорами (б, г, е) в зависимости от диаметров стыкуемой трубы:

а, б – для направления вдоль трубопровода (ось X); в, г – поперёк трубопровода (ось Y); д, е – вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – 3 – полиномиальные линии; 1 – частотный диапазон 0 – 10 Гц; 2 – 10 – 20 Гц; 3 – 20 – 30 Гц; сплошные линии – без учёта фактора “малости возмущений”; пунктирные – с учётом этого фактора

колебаний находятся в диапазоне от 0,006 до 0,026.

На рис. 6 изображены графики зависимости полученных минимальных значений декрементов колебаний трубопроводной арматуры от частоты колебаний (F) с учётом дифференциации по условным проходам D_y трубопроводов, предлагаемой в [5], где вся рассматриваемая арматура разделяется только на две подгруппы: условный проход $D_y < 300$ мм и $D_y > 300$ мм.

Графики зависимостей на рис. 6 построены аналогично графикам на рис. 5, только полученные точки (F , $D_{\min}$) аппроксимировались степенной функцией. Значения приводятся с учётом фактора “малости возмущений” в виде коэффициента-множителя $k = 1,5$ (пунктирные линии) и без учёта фактора (сплошные линии).

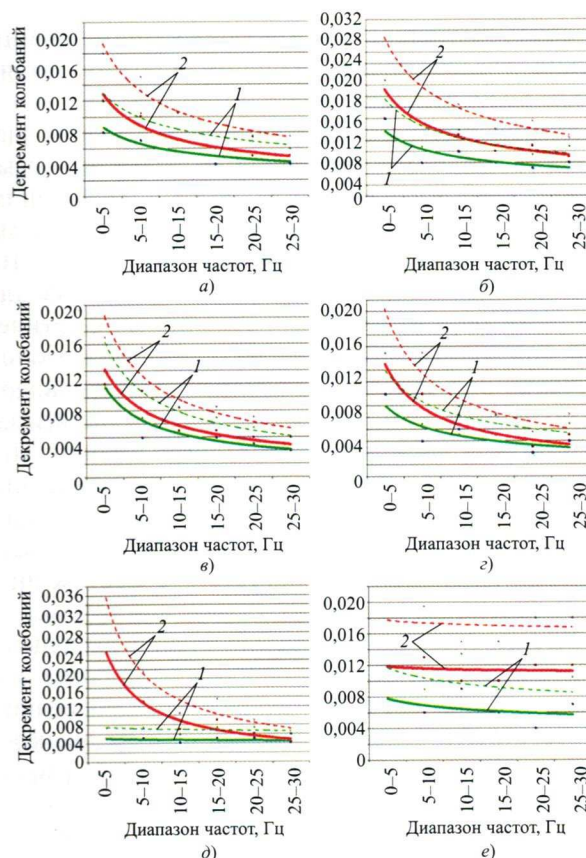


Рис. 6. Минимальные значения декрементов колебаний (нижняя граница) арматуры без собственных опор (а, в, д) и арматуры с собственными опорами (б, г, е) в зависимости от частоты колебаний:

а, б – для направления вдоль трубопровода (ось X); в, г – поперёк трубопровода (ось Y); д, е – вдоль штока арматуры (ось Z); 1 – условный проход D_y 10 – 250; 2 – условный проход D_y 300 – 600; сплошные линии – без учёта фактора “малости возмущений”; пунктирные – с учётом этого фактора

Из полученных графиков видно, что предлагаемые в [5] значения декрементов колебаний не соответствуют реально полученным экспериментальным данным, несмотря на чёткую в данном случае дифференциацию по условному проходу трубопроводов (отсутствуют пересечения зависимостей для условных проходов D_y 10 – 250 и 300 – 600). Значения декрементов колебаний для арматуры “малых” диаметров отличаются от тех же значений для “больших” диаметров в направлениях X и Y в среднем на 0,004, а не на 0,01, как в [5]. Кроме того, значения декрементов существенно зависят от частоты и направления колебаний. С ростом частоты колебаний наблюдается уменьшение декремента в 2 и более раз. В направлении Z минимальные значения декрементов колебаний арматуры с собственной опорой почти не изменяются на всём частотном диапазоне и составляют 0,006 для условных проходов D_y 10 – 250 и 0,011 для условных проходов D_y 300 – 600.

Таким образом, предложенные зависимости (рис. 5) для определения декрементов колебаний

трубопроводной арматуры в случае отсутствия экспериментальных данных свидетельствуют о необходимости уточнения действующих нормативных требований. По мнению авторов, при расчётном обосновании сейсмостойкости следует учитывать несколько декрементов колебаний, соответствующих различным направлениям воздействий. Необходимо также учитывать диаметр условного прохода стыкуемого трубопровода и принимать во внимание значения собственных частот колебаний. Это позволит задавать консервативные и максимально возможные, но экспериментально обоснованные нагрузки на арматуру от сейсмических воздействий.

Более того, принятая в нормативном документе [5] однозначная зависимость от условного прохода D_y (рост декрементов колебаний при переходе от условного прохода $D_y < 300$ к $D_y > 300$) качественно справедлива только при неизменной частоте. В общем же случае за счёт влияния собственных частот принятие такой зависимости от условного прохода D_y трубопроводов следует считать необоснованным.

Выводы

1. Выполнен статистический анализ экспериментально полученных собственных частот и декрементов колебаний для включённых в базу данных 766 единиц трубопроводной арматуры с вынесенным ручным или электрическим приводом без собственных опорных конструкций и с опорной конструкцией непосредственно под арматурой с учётом влияния диаметра стыкуемой трубы и направления воздействия.

2. Показано, что при расчётном обосновании сейсмостойкости арматуры необходимо учитывать несколько декрементов колебаний, соответствующих различным направлениям воздействий, а также условный проход D_y стыкуемого трубопровода, значения собственных частот.

3. По результатам статистического анализа многочисленных экспериментальных данных по-

лучены графические зависимости для определения консервативных значений декрементов колебаний трубопроводной арматуры с различными параметрами, которые свидетельствуют о необходимости уточнения нормативных требований, действующих по отношению к трубопроводной арматуре.

4. Предложено в случае отсутствия прямых экспериментальных данных принимать значения декрементов колебаний в соответствии с эмпирически полученными графическими зависимостями, связанными с набором параметров трубопроводной арматуры, условно характеризующих её жёсткость (диаметр стыкуемой трубы, наличие опор, направление воздействия и собственные частоты колебаний). Это заметно повысит надёжность предварительных оценок сейсмостойкости арматуры на стадиях её разработки и проектирования.

Список литературы

1. *Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС* / Казновский П. С., Казновский А. П., Сааков Э. С., Рясный С. И. – Электрические станции, 2012, № 9.
2. *Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа* / Казновский П. С., Казновский А. П., Сааков Э. С., Рясный С. И. – Электрические станции, № 12, 2012.
3. *Техническое диагностирование арматуры АЭС* / Аркадов Г. В., Адаменков А. К., Гошко А. И., Сейнов С. В., Усанов Д. А. М.: Машиностроение, 2011.
4. *Казновский А. П., Касьянов К. Г., Рясный С. И.* Статистический анализ результатов натурных исследований собственных динамических характеристик ответственного за безопасность оборудования АЭС. – Электрические станции, 2014, № 8.
5. *Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01.* – Вестник Госатомнадзора России, 2001, № 3.
6. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.