

# **ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Хр. Ст. Драганчев  
Технический университет – Варна

Надежность и ресурс энергетических установок АЭС и ТЭС и технологических установок транспорта нефти и газа, химической и нефтеперерабатывающей промышленности в значительной степени определяются надежностью и ресурсом трубопроводов. Вибрации трубопроводов наряду с коррозией, дефектами сварочных соединений и изменением механических свойств металла в процессе эксплуатации, являются фактором, определяющим их ресурс и надежность.

Вибрации трубопроводов вызываются пульсациями давления транспортируемого потока, гидродинамическими и аэродинамическими явлениями в трубопроводах, вибрациями гидравлических машин и несущих конструкций и сейсмическими воздействиями. Вибрации трубопроводов являются основной причиной их повреждений и аварий.

В результате повышенной вибрации в трубопроводах возникают:

- трещины вследствие усталости материала;
- саморазвинчивание арматуры, путевых соединений и систем управления арматуры;
- разгерметизация трубопроводов.

Разгерметизация трубопроводов часто сопровождается взрывом и пожаром, а на АЭС – загрязнением окружающей среды.

Причинами разгерметизация трубопроводов различного назначения являются:

- 60% - гидроудары, перепады давления и вибрации;
- 25% - коррозионные процессы;
- 5% - природные явления и форс-мажорные обстоятельства.

По прогнозам специалистов техногенные катастрофы будут нарастать ввиду повышения возраста трубопроводов.

Обеспечение надежности трубопроводов необходимо начинать еще на этапе проектирования и продолжать на этапе их наладки и эксплуатации. К сожалению на этапе проектирования не всегда возможно определить возмущающие факторы как пульсации давления потока, вибрации несущих конструкций, вызванные

работой других машин, возникновение резонансов в отдельных участках трубопроводов.

В последние годы органы технадзора и стандартизирующих организаций предъявляют повышенные требования к динамическим расчетам трубопроводов и разрабатывают нормы вибрации трубопроводов в процессе эксплуатации. В Российской Федерации уже приняты нормы вибрации трубопроводов газоперекачивающих компрессорных станций с центробежными компрессорами [3], в нефтеперерабатывающей и химической промышленности [5], в энергетике [6]. Аналогичные нормы вибрации трубопроводов приняты нефтеперерабатывающей промышленности США [11, 12], газотранспортным отделом Франции [9], VDI Германии и другие.

Повышенные требования к обеспечению надежности трубопроводов уже приводят к вводу в процессе их эксплуатации систем периодического контроля вибраций и вибродиагностики. В некоторых случаях для ответственных установок вводятся и системы мониторинга вибраций трубопроводов, обеспечивающие непрерывный контроль уровня вибраций.

Целью настоящей работы является разработка методики определения эталонных уровней вибрации трубопроводов электротехнических станций и технологических установок нефтехимической промышленности.

В работе произведен обзор известных автору норм вибрации трубопроводов в системах газотранспорта, нефтехимической промышленности и электроэнергетики.

Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций (КС) с центробежными нагнетателями  
Эти нормы [3] определяют четыре уровня оценок вибраций:

- уровень вибраций с оценкой А является максимально допустимым уровнем при приемочных испытаниях КС и характеризует технически исправную трубопроводную систему и ее опорной конструкцией;

- уровень вибрации с оценкой В является максимально допустимым уровнем при нормально режимной эксплуатации КС, (превышение этого уровня при стационарном технологичном режиме означает развитие дефекта в системе трубопровод–опоры);

- уровень вибрации с оценкой С требует проведения диагностических работ с целью разработки рекомендаций по реконструкции трубопроводной системы и ее реализации;

- уровень вибрации с оценкой D характеризует аварийное состояние трубопроводов и их опорных систем, (превышение этого

уровня может привести к усталостным разрушениям элементов трубопровода).

Техническое состояние трубопровода и его опорной системы классифицируют:

- зона А – хорошее;
- зона В – удовлетворительное;
- зона С – допустимое, но требует улучшение (неудовлетворительное);
- зона D – недопустимое.

Диагностическим параметром при нормировании вибрации трубопроводов выбирается среднеквадратическое значение виброперемещения  $S_e$  и собственная частота участка трубопровода в направлении измерения вибраций как величина интегрально отражающая конфигурацию трубопровода и условия его закрепления.

Нормы вибрации приведены на рис. 1.

Измерение вибрации необходимо проводить по следующей методике:

- вибрации прямолинейных участков измерять в двух направлениях перпендикулярно оси трубы;
- вибрации колен измерять в двух сечениях смежных сторон по двум направлениям в каждом сечении;
- вибрации тройниковых соединений измерять в одной точке по трем взаимно перпендикулярным направлениям;
- вибрации опор арматуры измерять по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Время измерения в каждой точке не менее 30 секунд. Регистрируются среднеквадратические значения виброскорости  $v_e$  и виброперемещения  $S_e$ .

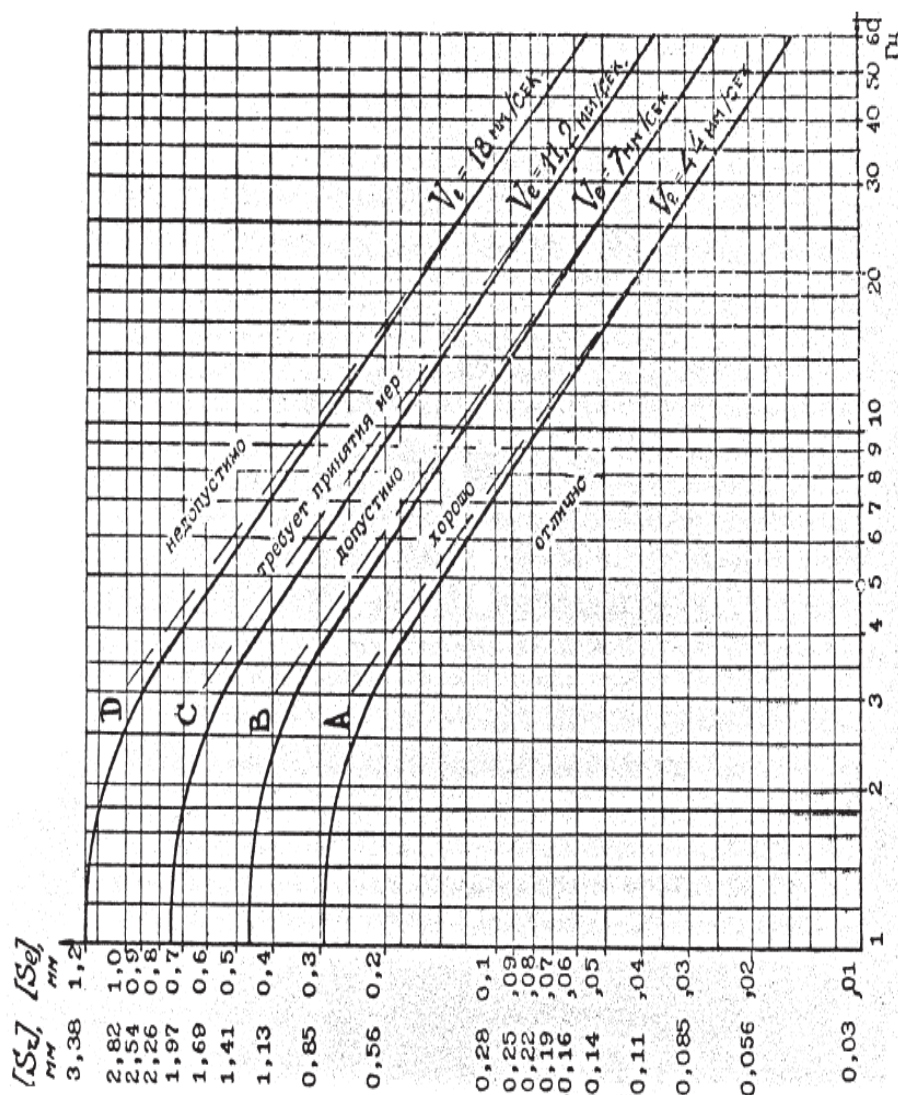


Рис. 1. Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями

Нормы вибрации технологических стальных трубопроводов [5]. Вибрации трубопроводов нормируются по амплитуде виброперемещений в зависимости от частоты вибраций.

Определены четыре опорных уровней вибрации:

I уровень – расчетный при проектировании;

II уровень – допускаемый при эксплуатации;

III уровень – требующий исправления, реконструкции системы;

IV уровень – уровень появления аварийных ситуаций.

Техническое состояние трубопроводов по результатам измерения вибраций классифицируют:

- ниже II уровня – удовлетворительное состояние трубопровода;
- между II и III уровнями – допустимое состояние, рекомендуется контроль;
- между III и IV уровнями – возможны отказы, повышенный контроль, необходимо исправление, реконструкция;
- выше IV уровня – недопустимое состояние.

Ширина каждой зоны при заданной частоте колебаний - 6 дБ.

Нормируются вибрации трубопроводов в диапазоне частот до 60 Гц.

Допускаемые амплитуды виброперемещения трубопроводов нефтеперерабатывающей промышленности Российской Федерации представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Допускаемые значения амплитуд вибрации трубопроводов.  $S_a$ , мкм

Диапазон	Частота, Гц									
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60
1	120	115	100	90	85	60	50	45	40	150
2	250	230	200	180	165	120	95	85	75	70
3	500	450	400	360	330	230	180	145	135	130
4	1250	1100	950	800	750	500	420	350	320	300

При мониторинге вибросостояния трубопроводов в условиях эксплуатации с целью оценки и выявления причин повышенных уровней вибрации, необходимо иметь, кроме уровней пульсации давления, информацию об уровнях вибрации компрессоров, насосов, фундаментов и т. д.

Нормы вибрации трубопроводов пара и горячей воды [6].

В разделе “Контроль вибропрочности трубопроводов и трубных элементов оборудования и котлов” РД-10-249-98 один из рекомендуемых методов контроля вибропрочности – это метод скоростей.

Метод требует измерения виброскоростей в различных точках трубопровода для определения точки с максимальной виброскоростью. После установления местоположения точки с максимальной виброскоростью для каждого пролета проводится измерение пиковых значений виброскорости. Измеренные максимальные пиковые значения виброскорости сравнивают с допустимыми. Критерий допустимости

$$v_{\max} \leq [v],$$

где  $v_{\max}$  – максимальное пиковое значение виброскорости трубопровода;  $[v]$  – допустимое значение виброскорости.

Рекомендуется два уровня виброскорости: I уровень  $[v_1] = 15$  мм/с; II уровень  $[v_2] = 25$  мм/с.

При значениях максимального пикового значения виброскорости  $v_{\max} < [v_1] = 15$  мм/с не требуется проверка вибропрочности. При значениях максимального пикового значения виброскорости  $15 \text{ мм/с} < v_{\max} < 25$  мм/с требуется расчетная проверка вибропрочности на основании подробных измерений с определением спектров виброскоростей. При значениях максимального пикового значения виброскорости

$[v_2] > 25$  мм/с принимаются меры для снижения вибрации.

Применяя принятую в других нормах классификацию технического состояния трубопроводов по результатам измерения вибрации и на нормы вибрации трубопроводов пара и горячей воды их техническое состояние классифицирует как:

- удовлетворительное  $v_{\max} < 15$  мм/с;
- допустимое, необходим контроль, необходимо исправление или реконструкция  $15 \text{ мм/с} < v_{\max} \leq 25$  мм/с;
- недопустимое  $v_{\max} > 25$  мм/с.

Нормы вибрации нефтеперерабатывающей промышленности.

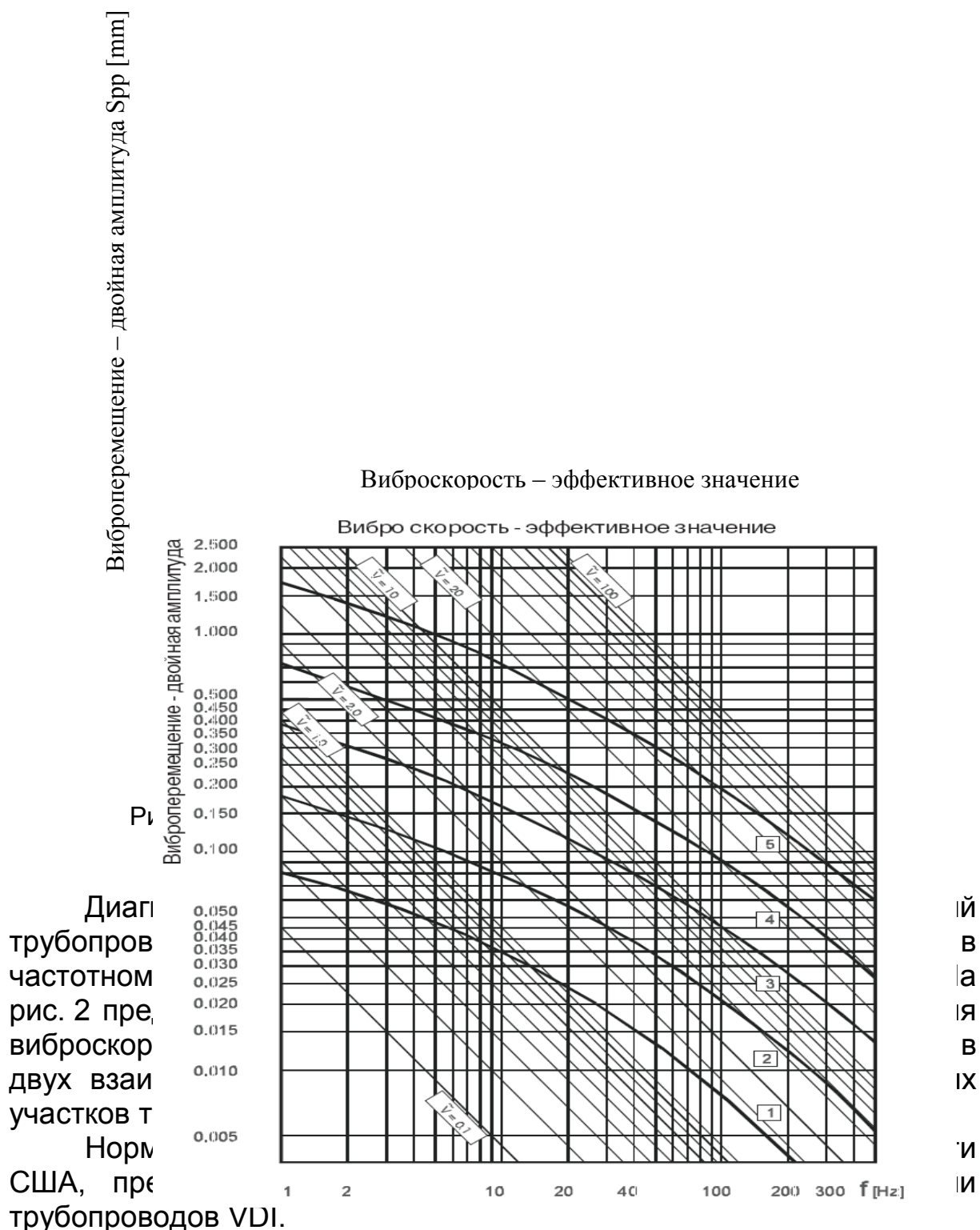
Юго-западным научно-исследовательским институтом г. Сан Антонио, США разработаны нормы оценки технического состояния трубопроводов нефтехимической промышленности по уровню их вибраций. Нормы вибрации, представлены на рис. 2, определяют следующие уровни оценок:

- кривая 1 – определяет границу субъективного восприятия вибраций. Ниже этой кривой вибрации не воспринимаются;
- кривая 2 – определяет максимально допустимые уровни вибраций при проектировании трубопроводов;
- кривая 3 – определяет максимально допустимые уровни вибрации при пуске в эксплуатацию;
- кривая 4 – является максимально допустимым уровнем вибраций, выше которого необходимо принять меры улучшения технического состояния трубопровода;
- кривая 5 – характеризует аварийное состояние трубопровода и его опорной системы.

Учитывая принятой в ISO 10836-1 классификации технического состояния машин в четырех категорий, техническое состояние трубопроводов и их опорных систем согласно представленным на рис. 2 нормы вибрации классифицируют:

- зона ниже кривой 3 – хорошее;
- зона между кривой 3 и кривой 4 – удовлетворительное;

- зона между кривой 4 и кривой 5 – допустимое – требует разработки рекомендаций по ремонту или по реконструкцию трубопровода и его опорной системы (неудовлетворительно);
- зона выше кривой 5 – аварийное (недопустимое).



Нормы вибрации газотранспортных систем рассмотрим на примере Франции, где предлагают оценку технического состояния трубопроводов проводить по двойной амплитуде виброперемещения при частотах ниже 10-20 Гц, а при частотах выше 20 Гц по критерию эффективного значения виброскорости. Вибрации трубопроводов нормируются до частоты 3000 Гц. Предлагаются 3 оценочные уровня вибрации трубопровода и 4 состояния вибрирующих трубопроводов:

- выше I-ого уровня – недопустимое;
- между I-ым и II-ым уровнями – необходим повышенный контроль и скорейший ремонт;
- между II-ым и III-ем уровнями – удовлетворительное;
- ниже III-его уровня – хорошее.

В таблице 2 приведены значения оценочных параметров для троих уровней вибрации.

Таблица 2

Уровень вибрации	Частотный диапазон вибрации, Гц	
	до 20 Гц	Выше 20 Гц
	Двойная амплитуда виброперемещения, $\mu\text{m}$	Эффективное значение виброскорости, мм/с
I	700	19,0
II	200	7,2
III	60	1,8

Нормы высокочастотных вибраций [7].

В трубопроводах высокопроизводительных центробежных и винтовых компрессоров, работа которых сопровождается высоким уровнем шума в частотном диапазоне 1000 Гц ÷ 5000 Гц, возникают повреждения от высокочастотной (акустической) усталости материала. Акустическая усталость материала обычно проявляется в системах редуцирования давления, в дросселях, в переливных клапанах, в линиях подачи газогорючих смесей и в других элементах высокопроизводительных компрессорных установок. Повреждения от высокочастотной усталости в первую очередь возникают в вспомогательных трубопроводах малого диаметра установки с высокими скоростями потока. В основных трубопроводах тоже могут возникнуть повреждения от акустической усталости.

Процессы индицирования акустических и вибрационных явлений в трубопроводах бывают два типа.

Первый – это возбуждение акустического резонанса газа в данном участке трубопровода при совпадении частот вихреобразования с частотой свободных колебаний газа. В



результате акустического резонанса пульсациями давления возмущаются изгибные и оболочечные вибрации труб. При совпадении частот пульсаций давления с частотами свободных колебаний оболочечных форм, представленных на рис. 3 возбуждаются резонансные вибрации. Эти оболочечные формы вибрации при большой интенсивности приводят к возникновению повреждений от высокочастотной усталости.

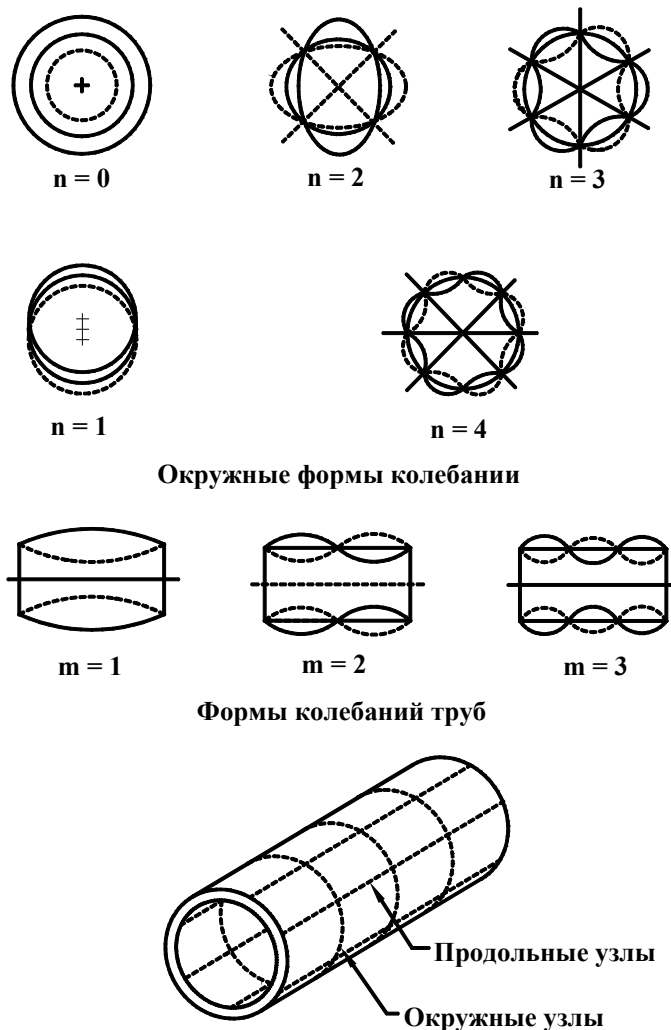


Рис. 3. Оболочечные формы свободных колебаний

Второй тип определяется связью высокой скорости движения потока с динамическим давлением газа в трубопроводе. Возмущаемые широкополосные пульсации давления потока обычно достигают 5000 Гц, вследствие этого возбуждаются резонансные колебания трубы с оболочечными формами колебаний и в

результате этого возникают повреждения от высокочастотной усталости.

Измерение динамических деформаций труб в зонах возникновения повреждений от акустической усталости показало, что спектры динамических деформаций и вибрации совпадают, т. е. вибрации трубопровода возмущают его усталостные повреждения.

Для установления связи между динамическими напряжениями и уровня вибрации трубы проведен следующий эксперимент. В стальной трубе возмущались высокочастотные вибрации с двойной амплитудой динамических деформаций 100 мкСтр (микрострейн), которым соответствуют динамические напряжения с двойной амплитудой 21,0 МПа. При этих динамических напряжениях в трубе не возмущаются повреждения от акустической усталости. Параллельное измерение излучаемого трубой шума показало эквивалентный уровень звукового давления 124 дБ. При повышении уровня шума выше 130 дБ в трубе начинают возникать повреждения от усталости.

Поэтому в [7] предлагают следующие критерии для оценки вероятности возникновения повреждений от акустической усталости стали от уровня излучаемого трубопроводом шума:

- уровень шума ниже 124 дБ – вероятность возникновения повреждений от акустической усталости стали низкая;
- уровень шума между 124 дБ и 130 дБ – вероятность возникновения повреждений от акустической усталости повышается;
- уровень шума выше 130 дБ – вероятность возникновения повреждений от акустической усталости большая.

При измерении шума необходимо поддерживать расстояние между микрофоном и вибрирующей поверхностью трубы 25,4 мм.

Методика расчетного определения эталонных уровней вибрации трубопроводов

Опыт исследования вибрационного и технического состояния ряда трубопроводов нефтехимической промышленности и атомной и тепловых электрических станций Болгарии Научно-исследовательской лаборатории “Виброконтроль и диагностика машин и сооружений” Технического университета гор. Варны (НПЛ “ВДМС”) показал, что использование указанных выше норм применимо только в первом приближении. В зависимости от конструкции трубопровода, месторасположения сварочных соединений, арматуры и фасонных элементов некоторые трубопроводы работают надежно при эффективных значениях виброскорости 45 мм/с и выше, а в некоторых случаях при уровне

виброскорости 12 мм/с установлены трещины трубопроводов и обрыв компенсаторов топливных расширений. Для повышения надежности диагностики трубопроводов разработана методика расчетного определения эталонных уровней трубопроводов.

Определение эталонных уровней вибрации трубопроводов основано расчетным определением уровня эффективного значения виброскорости в выбранном сечении измерения вибрации трубопровода при достижении в одном из опасных сечений уровень динамических напряжений равен пределу выносливости материала. Динамическое напряженно-деформированное состояние трубопровода определяется методом конечных элементов в виду их пространственной конфигурации и разнообразию граничных условий крепления. Конструкцию трубопровода, в зависимости от предварительного анализа частот и форм свободных колебаний его прямолинейных участков и частот возмущающих колебаний сил, дискретизируют одномерными конечными элементами, в случае когда частота первой оболочечной формы свободных колебаний самого длинного пролета трубопровода выше частот пульсации давления или оболочечными элементами, когда частота оболочечной формы колебаний ниже высшей частоты пульсации давления. На рис. 4 представлена конечно-элементная модель трубопровода технологической установки производства азотной кислоты. Дискретизация трубопровода выполнена конечными элементами тип SHELL-4.

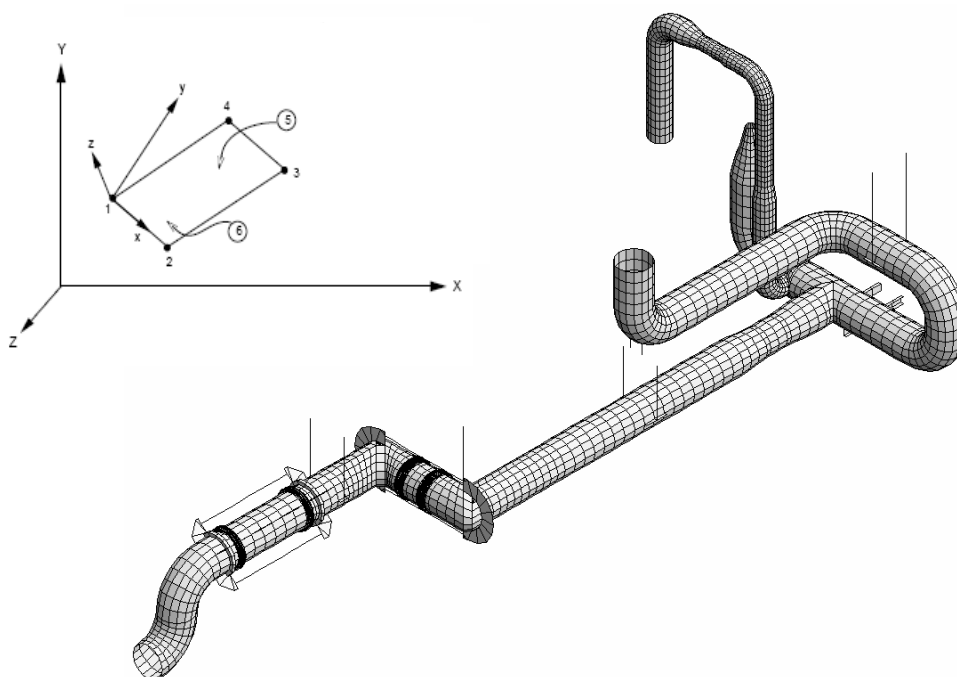
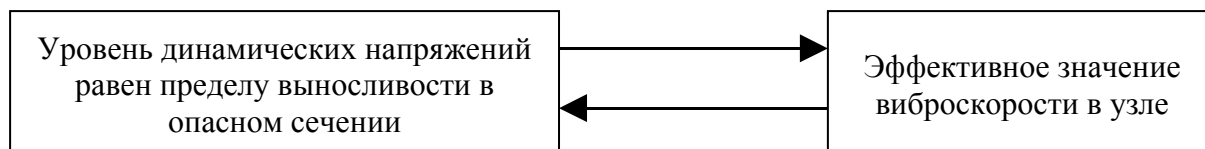


Рис. 4. Конечно-элементная модель трубопровода технологической установки производства азотной кислоты

Конечно-элементная модель определяется частоты и формы свободных колебаний, узловые перемещения, виброскорости и виброускорения и динамические напряжения элементов расчетной модели. Результаты расчета динамических напряжений элементов трубопровода позволяют для любого узла конечно-элементной модели определить эталонный уровень вибрации, которому соответствует достижения предела выносливости в опасном сечении, т. е.



Следовательно, эталонный уровень вибрации трубопровода это тот уровень, при котором в трубопроводе не возмущаются напряжения выше предела выносливости, что в идеальном случае гарантирует ресурс трубопровода. Эталонный уровень вибрации практически определяет “аварийного” уровня вибрации трубопровода. Эталонный уровень вибрации трубопровода гарантирует, что достигая его в трубопроводе не возмущаются повреждения от усталости материала, пока при использовании единых критериев допустимых уровней вибрации неизвестно исполняются условия динамической прочностью трубопровода или не.

Для определения эталонных уровней вибрации трубопровода необходимо построить зависимость изменение виброскорости в узлах, в которых будут мерить вибрации трубопровода в функции от динамических напряжений в опасном сечении трубопровода. Точка пересечения этой кривой с пределом выносливости материала в опасном сечении определяет эталонный уровень вибрации. На рис. 5 приведена зависимость изменения динамических напряжений – изменение виброскорости трубопровода в точке измерения вибрации трубопровода выход из сепаратора I ступени вход в компрессор II ступени установки сжижения газа пропан-бутан. На рис. 6 приведены сечения сварных швов, которые являются опасными сечениями.

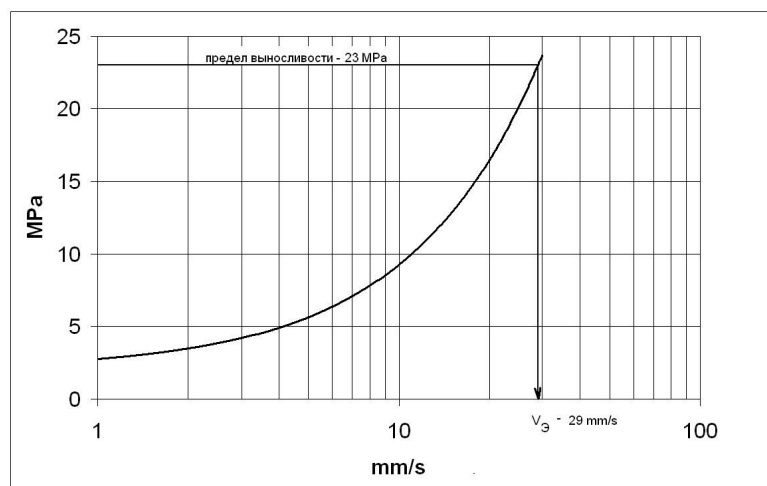


Рис. 5. Зависимость изменения динамических напряжений в опасном сечении от изменения виброскорости в точке измерения вибрации

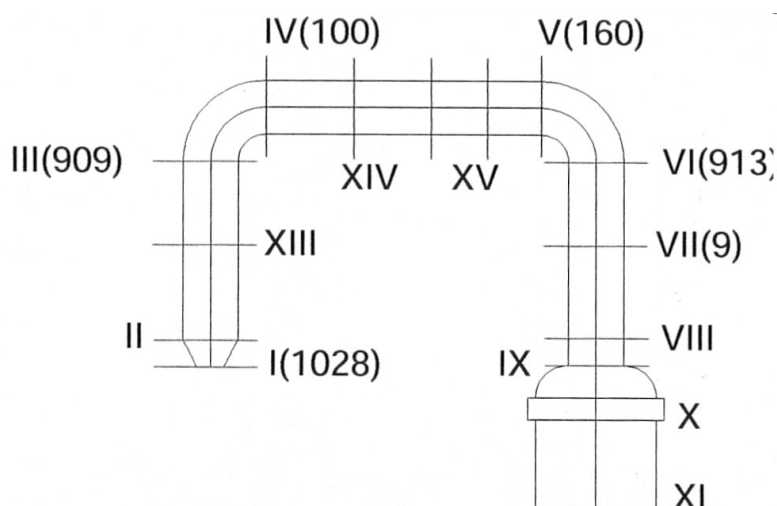


Рис. 6. Опасные сечения трубопровода выход из сепаратора I ступени – вход во II ступень компрессорной установки сжижения газа.

Опасными сечениями трубопровода являются сварные швы и зоны сварки, так как предел выносливости материала в этих зонах значительно ниже предела выносливости основного материала труб и фасонных элементов. В [1] на основе большого объема экспериментов установлено, что предел выносливости материала в зоне сварного шва зависит только от вида сварного шва и не зависит от коэффициента симметрии цикла  $R = -1 \div +1$  и от предела прочности материала. На рис. 7 представлена зависимость предела выносливости сварных соединений от материала трубы. Для стыковых сварных соединений из низкоуглеродистой, низколегированной и высоколегированной стали предел выносливости постоянен –  $\sigma_{-1} = 23$  МПа.

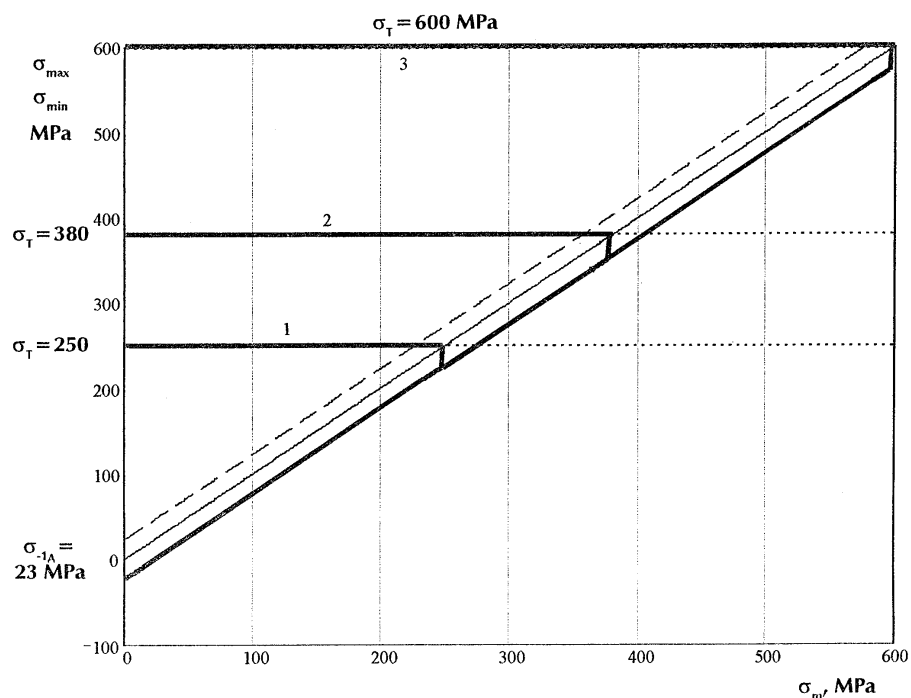






Рис. 7. Зависимость предела выносливости сварного шва V категории от материала трубы: а) низкоуглеродная сталь; б) низколегированная сталь; в) высоколегированная сталь.

В РД 50-551-85 [4] представлена классификация сварных соединений. В Таблице 3 представлена часть от этой классификации. Состояние стыковой сварки элементов труб классифицируют V категории.

Таблица 3. Классификация сварных соединений

Расположение расчетного сечения	Характеристика элемента	Группа элемента
	Основной металл в месте перехода к стыковому шву: - при сварке листов одинаковой толщины и ширины - при сварке листов с разной шириной и толщиной и плавным переходом	1
		1
	Основной металл трубы в зоне кругового шва с подложной шайбой	5
	Основной металл трубы в зоне сварки фланца	5

В Таблице 4 приведены пределы выносливости материала сварочных соединений при числе циклов  $N_1=2 \cdot 10^6$  цикла и  $N_2=5 \cdot 10^6$  цикла. Согласно РД 50-551-85 выше  $5 \cdot 10^6$  циклов предел выносливости постоянен.

Таблица 4

№	Категория сварного шва	Предел выносливости, МПа	
		$N=2 \cdot 10^6$ цикла	$N=5 \cdot 10^6$ цикла
1	I	74	69
2	II	57,5	55
3	III	42,5	40
4	IV	37,5	35
5	V	26	23

Аналогичная классификация сварочных швов приведена в нормах проектирования металлических конструкций Eurocode 03 [8]. Всех видов сварных соединений металлической конструкций классифицируют в 14 классов. Стыковые сварные швы относятся к классу 50. На рис. 8 представлены пределы выносливости конструкционных сталей в зависимости от типа сварного шва.

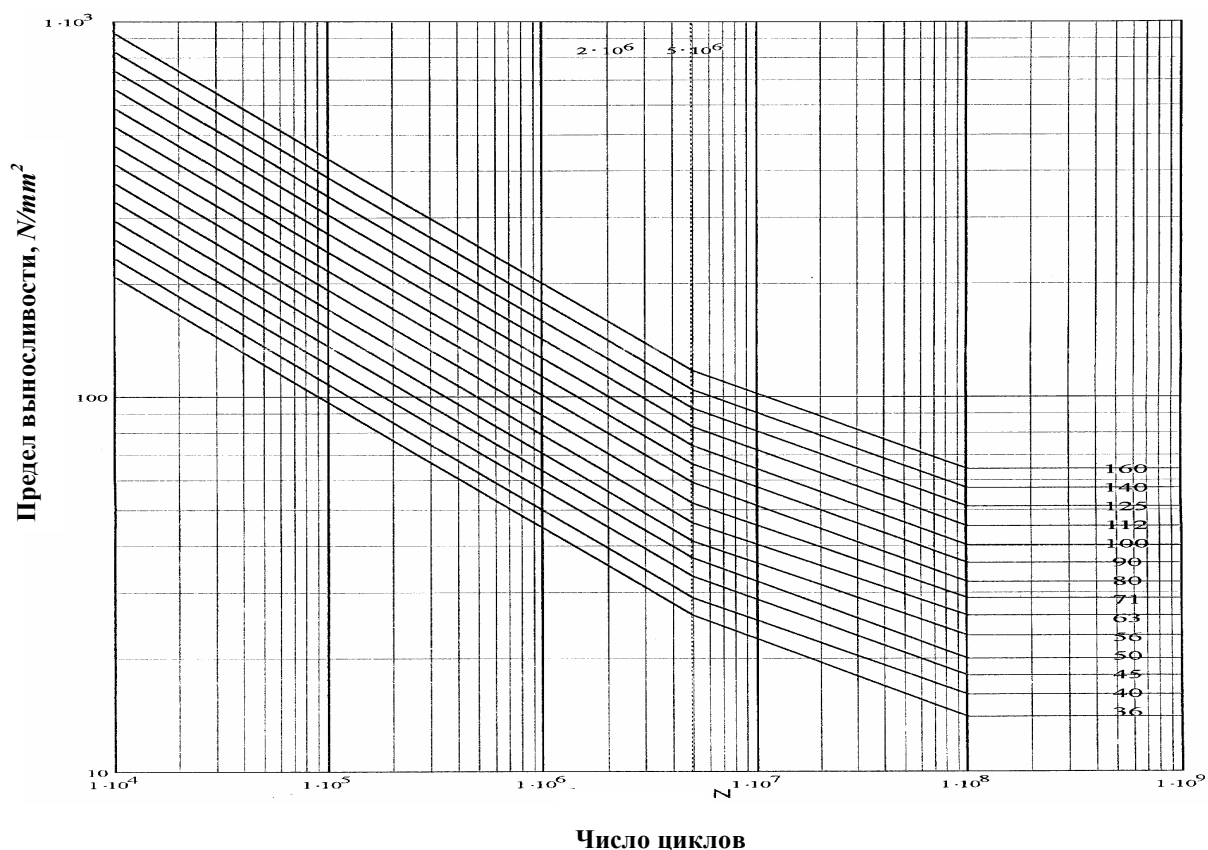


Рис. 8. Пределы выносливости сварочных соединений согласно Eurocode 03.

Для оценки технического состояния трубопроводов по уровню эффективного значения виброскорости необходимо определить граничные уровни динамических напряжений в опасных сечениях трубопровода, которые должны быть ниже предела выносливости, т. е.

$$\sigma_{\text{дин}} \leq \frac{\sigma_{-1}}{k},$$

где  $k$  – нормативный коэффициент безопасности.

Принимая классификацию технического состояния машин, принятой в ISO 10816 [10], предложены 5 класса технического состояния трубопроводов:

- хорошее – А;
- удовлетворительное – В;
- допустимое, необходимо улучшение – С;
- недопустимое – D;
- аварийное – Е.

Граничные значения динамических напряжений в опасных сечений определяются следующими зависимостями:

- значения динамических напряжений на границе между “недопустимым” и “аварийным” состоянием



$$\sigma_{D/E} = \frac{\sigma_{-1}}{1,03 \div 1,05};$$

- значения динамических напряжений на границе между “недопустимым” и “допустимым” состоянием трубопровода

$$\sigma_{C/D} = \frac{\sigma_{D/E}}{k_{\text{норм}}},$$

где  $k_{\text{норм}}$  – нормативный коэффициент безопасности, который определяется нормами проектирования данного трубопровода;

- значения динамических напряжений на границе между “допустимым” и “удовлетворительным” состоянием трубопровода (ширина зоны 8 dB),

$$\sigma_{B/C} = \frac{\sigma_{C/D}}{2,5};$$

- значения динамических напряжений на границе между “удовлетворительным” и “хорошим” состоянием трубопровода

$$\sigma_{A/B} = \frac{\sigma_{B/C}}{2,5};$$

Граничные значения эффективного значения виброскорости определяются графически по диаграмме изменение динамических напряжений в опасном сечении – изменение виброскорости в точке измерения вибрации (рис. 5).

На рис. 5 приведена зависимость изменения динамических напряжений – изменение виброскорости трубопровода в точке измерения вибрации трубопровода выход из сепаратора I ступени вход в компрессор II ступени установки сжижения газа пропан-бутан.

В таблице 5 приведены расчетно определенные граничные значения вибрации и динамических напряжений показанного на рис. 6 трубопровода от обвязки установки сжижения газа с винтовыми компрессорами

Таблица 5

Техническое состояние трубопровода	Динамическое напряжение в опасном сечении	Граничные значения эффективного значения виброскорости, ммс <sup>-1</sup>		
		300 Гц	562 Гц	1444 Гц
Аварийное	$\sigma_{D/E}=21,9$	93,6	44,2	64,0
Недопустимое	$\sigma_{C/D}=14,4$	62,0	29,3	44,0
Допустимое, необходимо улучшение	$\sigma_{B/C}=5,8$	24,8	11,7	17,6
Удовлетворительное	$\sigma_{A/B}=2,3$	10	4,7	7,1
Хорошее				

Сравнение расчетно-определенных норм вибраций трубопровода установки снижения газа с нормами Департамента транспортировки газа Франции и с нормами нефтеперерабатывающей промышленности США приведены в таблице 6. Необходимо отметить, что нормы нефтеперерабатывающей промышленности США ограничены до 300 Гц. В данном случае они графически расширены до 1500 Гц.

Таблица 6

Граничные значения виброскорости	Эффективное значение виброскорости, мм/с								
	f=300 Гц			f=562 Гц			f=1444 Гц		
	P	Φ	A	P	Φ	A	P	Φ	A
$V_{D/E}$	93,6	-	-	44,2	-	-	64,0	-	-
$V_{C/D}$	62	19,0	53	29,3	19,0	68	44,0	19,0	80
$V_{B/C}$	24,8	7,2	26,0	11,7	7,2	30	17,6	7,2	38
$V_{A/B}$	10,0	1,8	14,0	4,7	1,8	16	7,1	1,8	18

В таблице 7 приведены граничные значения эффективного значения виброскорости трубопроводов турбокомпрессорной установки производства азотной кислоты.

Таблица 7

Техническое состояние трубопровода	Обозначения эталонных значений	Уровень эффективного значения виброскорости, мм/с	
		Трубопровод K2102-H2108	Трубопровод H2108-Q2101
D – недопустимое	$V_{C/D}$	16,7	10,2
C – допустимое, необходимо улучшение	$V_{B/C}$	6,6	3,8
B – удовлетворительное	$V_{A/B}$	2,7	1,6
A – хорошее			

**Выводы.**

1. В работе выполнен обзор нормативных документов по вибрационному контролю технического состояния трубопроводов.
2. Разработана методика расчетного определения эталонных уровней вибрации, которая опирается на методику расчета сварочных соединений на усталость.
3. Анализ результатов расчетного определения эталонных уровней вибрации трубопроводов и их сравнение с нормами разных отраслей промышленности показывает, что для ответственных трубопроводов необходимо эталонные уровни вибрации определять по представленной методике расчета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Engineering Кобаев В. П., Дроздов Ю. Н., Прочность и износостойкость деталей машин., М., Высшая школа, 1991 г.
2. Куликов В., Предотвращать, а не ликвидировать последствия, Мировая энергетика, №2, 2008.
3. Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями, Мин. газовой промышленности, М., 1985.
4. РД 50-551. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений., М., Изд. стандартов, 1986 г.
5. РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрации технологических стальных трубопроводов. Управление департамента нефтепереработки Минтопэнерго РФ, 1994.
6. РД 10-249-98, Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды, Ростехнадзор России, №50 от 25.08.98
7. Eisinger F.L., Designing Piping Systems against Acoustically Induced Structural Fatigue, Journal of Pressure Vessel Technology, 1997.
8. Eurocode 03. Design of steel structures, CEN, 17. April 2003.
9. Graille M., Fichet G., Bertrand J., Les vibrations dans les stations de compression equipees de compresseurs a pistons Compte rendu., Association technique de l'industrie du gaz en France, 1970.
10. ISO 10816-1 Mechanical Vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1. General guidelines. 1995.
11. Wachel J. C. Field Investigation of Piping Systems for Vibration-Induced Stress and Failures., Pressure Vessels & Piping Conference, ASME Bound Volume #H00219, June 27-July 2, 1982.
12. Wachel J. C., Smith D. R. Vibration Troubleshooting of Existing Piping Systems., Dynamics Incorporated, July, 1991.