

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА В ОПОРЕ НА ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДА^{*)}

© 2012 г. И.В. Бурмистров¹, А.В. Козин¹, В.Ф. Овчинников²,
В.А. Панов¹, Л.В. Смирнов²

¹ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

²НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

varanov@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 01.05.2012

С помощью численного эксперимента на базе программного комплекса RANT-1 проведено исследование вибрационного возбуждения трубопровода при наличии опоры с зазором. Рассмотрено влияние величины зазора на динамические характеристики трубопровода. Сформулированы условия эффективной работы рассматриваемого типа опор.

Ключевые слова: труба, опора, зазор, вибрация, программный комплекс, сила прижатия, коэффициенты динамичности.

Трубопроводы широко применяются во многих областях современной техники, в том числе и в атомной энергетике. Как и ко всему оборудованию энергетического комплекса, к трубопроводам предъявляются жесткие требования по обеспечению вибропрочности. При этом, в частности, необходимо принимать меры, направленные на исключение резонансных ситуаций, что обычно обеспечивается отстройкой от резонанса за счет установки дополнительных промежуточных опор. Однако установка таких опор ухудшает компенсирующие способности трубопровода при температурных деформациях. Эти противоречия удается сгладить за счет использования опор, ограничивающих перемещение трубы только в поперечном направлении. На рис. 1 схематически представлен вид поперечного сечения трубопровода с опорой, ограничивающей его перемещения в вертикальном направлении.

В исследовании рассматриваются вынужденные колебания трубопровода в этом направлении.

Ясно, что чем меньше зазор или чем больше сила прижатия трубы к одной из плоскостей опоры, тем в большей степени работа опоры с зазором будет соответствовать работе шарнирной опоры. Однако для обоснования соответствующего проектного решения необходимы как качественное представление о зависимости динамического поведения трубопровода при вынужденных колебаниях от величини

^{*)}Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант №11-08-97040-р_поволжье_а), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 16.740.11.0087) и Программой поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

ны зазора, так и количественные параметры вынужденных колебаний. С этой целью с использованием представленной в [1] методики математического моделирования деформаций трубопровода на нелинейных опорах и предназначенного для расчета трубопроводов на статическую прочность, вибропрочность, сейсмические и динамические воздействия программного комплекса RANT-1 проведена серия численных динамических экспериментов. Трубопровод с опорой рассматриваемого типа является примером системы с нелинейной упругой характеристикой.

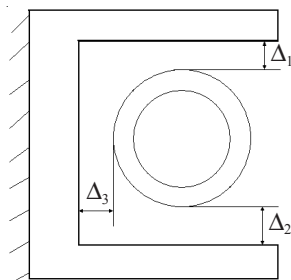


Рис. 1

Далее представлены результаты исследования типичной для процесса проектирования ситуации для прямой трубы (рис. 2).

Рассмотрена жестко закрепленная на концах труба с наружным диаметром 56 мм и толщиной стенки 6 мм, общая длина 2,5 м, материал – сталь с модулем упругости $E = 200$ ГПа, плотностью $\rho = 7800$ кг/м³. Внутри труба заполнена водой плотности $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³. Труба эксплуатируется при внешнем кинематическом воздействии с частотой $f_0 = 50$ Гц. Частота собственных колебаний трубы при указанных параметрах составляет $f_c = 46,5$ Гц. В этом случае коэффициент отстройки от частоты внешнего воздействия равен $K = f_c/f_0 = 0,93$, что не соответствует нормативным требованиям [2], согласно которым необходимо обеспечить значение $K < 0,7$ или $K > 1,3$. Следует отметить, что указанные требования соответствуют ограничению так называемого коэффициента динамичности [3] $K_d = x_{\max}/x_0 < 1,96$. Другими словами, максимальная амплитуда при резонансных колебаниях (x_{\max}) не должна превышать удвоенного отклонения (x_0) при статически приложенной силе.

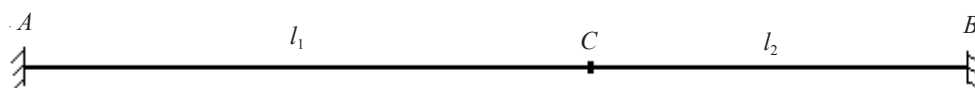


Рис. 2

Отстройка трубы может быть осуществлена, если в сечении трубы C (см. рис. 2) установить шарнирную опору ($l_1 = 1,5$ м, $l_2 = 1$ м). В этом случае низшая частота собственных колебаний составит $f_{c1} = 105,5$ Гц, а коэффициент отстройки $K = f_{c1}/f_0 = 2,11 > 1,3$.

Для рассматриваемого случая проведена серия расчетов колебаний трубы при ее кинематическом возбуждении через узлы крепления A , B , C (в предположении общей платформы, на которой установлен трубопровод). Движение платформы реализовано в поперечном для трубы направлении по гармоническому закону $asin \omega t$ с медленно возрастающей частотой $\omega = 2\pi f$,

$$f = f^* + \epsilon t, \quad f^* = 35 \text{ Гц}, \quad \epsilon = 0,5 \text{ Гц/с}. \quad (1)$$

При указанном относительно медленном изменении частоты внешнего воздействия уровень колебаний трубы практически совпадает с уровнем стационарных колебаний на соответствующей частоте возбуждения.

Для пояснения принятой терминологии и анализа особенностей поведения трубопровода как без промежуточной опоры, так и с опорой, имеющей зазор, на рис. 3 представлен качественный вид резонансной кривой, то есть зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты гармонического воздействия [3, 4]. Рисунок 3а соответствует линейной системе, а рис. 3б – нелинейной.

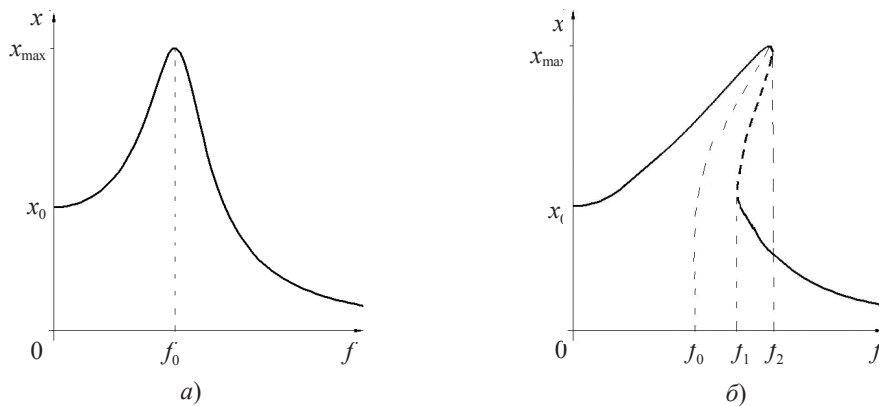


Рис. 3

В диапазоне частот $f_1 < f < f_2$ (см. рис. 3) в нелинейной системе могут устанавливаться колебания с двумя различными амплитудами [4]. Однако использование возрастающей зависимости частоты гармонического внешнего воздействия от времени (1) для систем с жесткой упругой характеристикой дает возможность получить установившиеся колебания с наибольшей амплитудой.

Анализ результатов расчетов при рассмотрении указанного возбуждения целесообразно проводить по аналогии с вынужденными колебаниями линейной системы с одной степенью свободы. В этом случае уравнение, описывающее вынужденные колебания, имеет вид:

$$\ddot{x} + 2\chi\omega_c\dot{x} + \omega_c^2x = a \sin \omega t,$$

здесь ω_c – частота собственных колебаний при нулевом трении, a – имеющая размерность ускорения амплитуда воздействия, χ – коэффициент, характеризующий относительную величину потерь на трение в долях от критической величины этих потерь, когда собственная частота $\omega_c^* = \sqrt{\omega_c^2 - \chi^2\omega_c^2}$ обращается в нуль при $\chi = 1$ (процесс свободных колебаний является аperiodическим). Квазистатическое отклонение оценивается величиной

$$x_0 = \frac{a}{\omega_c^2}. \quad (2)$$

Поскольку в случае малого трения при резонансе $\omega \approx \omega_c$ [3], то

$$x_{\max} = \frac{a}{2\chi\omega_c^2} \quad (3)$$

и коэффициент динамичности принимает значение

$$K_d = \frac{x_{\max}}{x_0} = \frac{1}{2\chi}.$$

С целью нормировки и представления результатов исследования в безразмерной форме использованы данные предварительных расчетов трубопровода, изображенного на рис. 2. При статическом нагружении трубопровода без промежуточной опоры распределенной силой, соответствующей значению $a = 0,163g$, максимальные перемещения реализуются в середине трубы и равны $U_{\max}^0 = 0,0239$ мм, а максимальные напряжения – в сечениях заделки $\sigma_{\max}^0 = 0,692$ МПа. В сечении установки опоры C отклонение трубы h составляет $0,0225$ мм.

Максимальный зазор, выше которого при внешнем воздействии (1) контакт трубы с опорой, имеющей зазор, отсутствует, равен амплитуде резонансных колебаний при отсутствии промежуточной опоры. Эта амплитуда, в свою очередь, пропорциональна амплитуде внешнего гармонического воздействия и обратно пропорциональна величине χ , характеризующей уровень затухания. При этом, как следует из (2), амплитуда внешнего воздействия однозначно связана с величиной квазистатического отклонения x_0 . В связи с этим расчетную информацию коэффициентов динамичности для рассматриваемого примера трубы целесообразно представить в координатах суммарного эффективного зазора z ($z = \chi\Delta/h$) и эффективного коэффициента динамичности k ($k = \chi K_d$), где $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$.

Для варианта центрального положения трубы в опоре ($\Delta_1 = \Delta_2$) получена зависимость максимальных перемещений и напряжений от суммарного зазора Δ при изменении частоты внешнего воздействия по закону (1) в диапазоне от 35 до 65 Гц. Расчеты выполнены для коэффициентов демпфирования $\chi = 0,02$ и $\chi = 0,05$. На рис. 4 представлена характерная для рассматриваемой задачи зависимость от времени отклонений трубы в центральном сечении первого пролета трубы при зазоре $\Delta = 8h$ (черная кривая). Для сравнения серым цветом на рис. 4 показана соответствующая зависимость для варианта трубы без опоры.

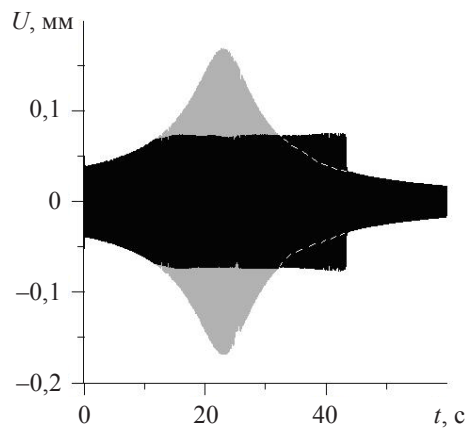


Рис. 4

На графиках рис. 4 четко проявляются эффект расширения области резонанса, ограничение колебаний и явление срыва амплитуды, характерные для нелинейных систем с «жесткой» упругой характеристикой [4].

Представленные далее результаты расчетов нормированы на величины, соответствующие статическому расчету. Для исследуемой системы целесообразно рас-

считать два коэффициента динамичности: коэффициенты динамичности для перемещений и напряжений трактуются как отношения соответствующих максимальных величин к их квазистатическим значениям для варианта трубы без промежуточной опоры

$$K_1 = U_{\max} / U_{\max}^0, \quad K_2 = \sigma_{\max} / \sigma_{\max}^0, \quad k_1 = \chi K_1, \quad k_2 = \chi K_2.$$

Соответствующие зависимости эффективных коэффициентов динамичности от эффективного зазора представлены на рис. 5.

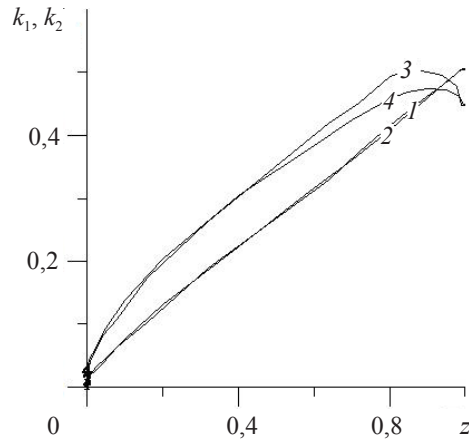


Рис. 5

Кривые 1, 2 соответствуют эффективному коэффициенту динамичности для перемещений k_1 , а кривые 3, 4 – эффективному коэффициенту динамичности для напряжений k_2 при уровнях демпфирования $\chi = 0,02$ и $\chi = 0,05$. Из рисунка следует, что эффективный коэффициент динамичности для перемещений практически во всем диапазоне изменения эффективного зазора (за исключением окрестности начала координат) не зависит от уровня демпфирования, а эффективный коэффициент динамичности для напряжений практически не зависит от уровня демпфирования в интервале изменения эффективного зазора от 0 до значения 0,5 (за исключением окрестности начала координат). Зависимости рис. 5 дают возможность при известном уровне демпфирования χ (например, при нормативном $\chi = 0,02$) и известном уровне внешнего воздействия, характеризуемого величиной квазистатических отклонений h (для рассмотренного примера трубы $h = 0,0225$ мм), определить величину зазора Δ , при котором коэффициент динамичности K_d (для перемещений или напряжений) не будет превышать заданной величины. Для рассматриваемой трубы $K_2 < 2$, если

$$k_2 < 0,04, \quad z < 0,01, \quad \Delta < h/2 = 0,01125 \text{ мм.}$$

Полученный уровень суммарного зазора для трубопроводов ниже реальных допусков изготовления и монтажа конструкции; приведенное значение зазора, в частности, соответствует изменению диаметра трубы при изменении температуры ее материала на 10 °С. Таким образом, можно сделать вывод, что обеспечить снижение резонансных колебаний трубы до безопасного уровня за счет установки опоры с заданным зазором при центральном положении трубы в опоре практически невозможно.

Возникает вопрос о влиянии несимметричности зазора на динамику трубы. Рассмотрена задача вынужденных колебаний трубы (см. рис. 2) для варианта суммарного зазора в опоре $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 25h$ и при уровне демпфирования $\chi = 0,02$. В случае центрального положения трубы в опоре при таком зазоре коэффициент динамичности для перемещений составляет $K_1 = 12$, а для напряжений – $K_2 = 16$. На рис. 6 представлены графики зависимости коэффициентов динамичности для перемещений (кривая 1) и напряжений (кривая 2) от относительного зазора Δ_1/h . Отрицательные значения относительного зазора Δ_1/h соответствуют прижатию трубы в опоре.

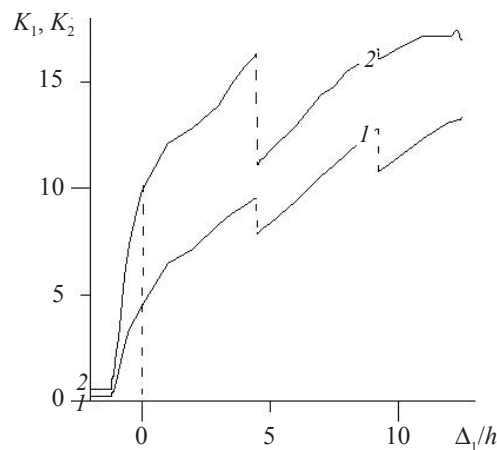


Рис. 6

Труба на опоре с зазорами относится к динамическим системам с нелинейными упругими характеристиками, для которых имеет место неоднозначность амплитуды вынужденных колебаний при частоте внешней силы в диапазоне $f_1 < f < f_2$ (см. рис. 3, 4). На графиках рис. 6 проявлению этого эффекта соответствуют резкие изменения коэффициентов динамичности при значениях относительного зазора порядка 5 и 9. Из вида представленных на рис. 6 кривых следует, что при прижатиях $\Delta_1/h < -1$ коэффициенты динамичности K_1, K_2 являются неизменными и принимают минимальные значения. Этот диапазон зазоров соответствует прижатию трубы в опоре и варианту колебаний трубы при наличии постоянного контакта с опорой. Для $\Delta_1/h > -1$ с ростом величины зазора (уменьшением прижатия) наблюдается резкий рост коэффициентов динамичности: при $\Delta_1/h \approx 0$ коэффициент динамичности для перемещений достигает значения $K_1 = 4,5$ (более 1/3 своего максимального значения), а для напряжений – значения $K_2 = 10$ (более 1/2 своего максимального значения).

Проведенное расчетное исследование динамики трубопровода на опоре с зазором дает возможность сформулировать несколько важных для проектирования трубопроводных систем положений:

1. Использование опор с зазорами без прижатия трубы к опоре не является средством исключения резонансных колебаний.
2. Опора с прижатием реализует шарнирное опирание трубопровода при условии, что величина прижатия обеспечивает контакт с опорой при квазистатическом нагружении, соответствующем амплитуде вибрационного воздействия.

3. Величина минимальной контактной силы определяется с помощью статического расчета трубопровода с шарнирной опорой в сечении установки опоры с зазором при квазистатическом нагружении, соответствующем амплитуде вибрационного воздействия.

4. При выборе уровня прижатия необходимо использовать коэффициент запаса (больше 1), компенсирующий неточность информации о внешнем воздействии.

5. Изложенные выводы можно распространить и на опоры с зазором, когда необходимо исключить колебания трубы в плоскости контакта. В этом случае силой, препятствующей движению трубопровода, является сила трения, максимальное значение которой пропорционально величине нормальной к плоскости опоры силы контакта и коэффициенту трения. Очевидно, что в данной ситуации нормальное прижатие в опоре должно быть увеличено на величину, обратно пропорциональную коэффициенту трения.

Используемые в энергетике трубопроводы во многих случаях имеют сложную пространственную конфигурацию и промежуточные опоры различной конструкции, в том числе и с зазорами. Связанные с температурным расширением, а также смещениями опорных узлов продольные, поперечные и крутильные деформации трубной оболочки могут быть значительными, и конструкция опор должна допускать необходимые перемещения трубы. Разработанная методика расчетов и имеющиеся программные средства позволяют проводить необходимые исследования в процессе проектирования для трубопроводов любой сложности и при произвольных внешних воздействиях, включая вибрационные. Рассмотренный в настоящей работе относительно простой случай дает четкое качественное представление об особенностях процесса вынужденных колебаний трубопровода при наличии опоры с зазором.

Список литературы

1. Моделирование статических и динамических деформаций трубопроводных систем на опорах с нелинейными характеристиками / И.В. Бурмистров и др. // Проблемы прочности и пластичности / Нижегород. ун-т. 2009. Вып. 71. С. 95–103.

2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

3. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. Т. 1 / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.

4. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. Т. 2 / Под ред. И.Т. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.

EFFECT OF THE GAP IN THE SUPPORT UPON THE VIBRATION CHARACTERISTICS OF A PIPELINE

I.V. Burmistrov, A.V. Kozin, V.F. Ovchinnikov, V.A. Panov, L.V. Smirnov

In a numerical experiment using the software package RANT-1, vibrational excitation of a pipeline having a support with a gap is studied. The effect of the gap size upon the dynamic characteristics of the pipeline is considered. Conditions for effective operation of the supports in question are formulated.

Keywords: pipe, support, gap, vibration, software package, hold-down force, dynamic factors.