

УДК 622.242

ДЕМПФИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА

Ишемгужин И.Е.¹, Габбасов Т.И., Шаммазов И.А.,
Ситдииков М.Р., Кочекон М.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

¹ e-mail: ishemguzhin@yandex.ru

Аннотация. *Рассмотрены параметрические колебания трубопровода. Показано влияние эксплуатационных условий на их возникновение. С помощью диаграммы устойчивости определены области параметрического резонанса. Даны рекомендации по устранению параметрических колебаний трубопровода.*

Ключевые слова: *трубопровод, условия эксплуатации, параметрический резонанс, динамическая устойчивость, гасители колебаний*

Повышение ресурса трубопроводов в значительной степени связано с устранением вредных колебаний, приводящих к нарушению изоляционных покрытий, коррозионному растрескиванию, усталостному разрушению тела труб. В неблагоприятных случаях возможно катастрофическое разрушение трубопровода.

Спектр колебаний трубопровода представляет собой сложный комплекс взаимодействия свободных, вынужденных, параметрических, автоколебательных процессов. Спектр собственных частот трубопровода также разнообразен. Он зависит от параметров системы, условий закрепления концов, величин сил сопротивления перемещению, возникающих продольных сил, скорости и объемов движения жидкости, ее пульсации, упругих свойств грунта. Поэтому высока вероятность резонансных явлений при совпадении вынужденных и собственных частот при основном силовом резонансе или возникновении параметрических резонансов.

Остановимся подробнее на параметрических колебаниях [1-3]. Сходные по внешним проявлениям с вынужденными колебаниями параметрические колебания могут классифицироваться как обычные резонансные. Но между тем, эти колебания принципиально отличаются от вынужденных. Параметрические колебания поддерживаются за счет изменения параметров системы. При определенных сочетаниях между частотой возмущающей силы и собственными частотами системы малое начальное возмущение приводит к развитию колебаний большой амплитуды. Соотношение частот, при котором наступает параметрический резонанс, отличается от соотношения частот при вынужденных колебаниях.

Обычный резонанс – это возрастающие вынужденные колебания устойчивой системы, возникающие под действием возмущающей силы. Он проявляется

только тогда, когда частота возмущающей силы равняется частоте собственных колебаний системы.

Параметрический резонанс представляет собой возрастающие колебания около неустойчивого положения равновесия, т.е. параметрический резонанс связан с неустойчивостью равновесного состояния системы, при котором любое случайное возмущение приводит к её раскачке. Так, например, главный параметрический резонанс может быть реализован при амплитуде продольной силы составляющей менее одного процента от эйлерового значения [1].

Для параметрического резонанса характерно наличие сплошных областей возбуждения (областей динамической неустойчивости).

При обычном резонансе амплитуда колебаний возрастает по линейному, а при параметрическом – по экспоненциальному закону. В этом случае параметрический резонанс считается более опасным.

Параметрические колебания характеризуются еще одной особенностью. Если при обычном резонансе введение трения пропорционально скорости приводит к ограничению амплитуды колебаний, то параметрический резонанс может развиваться и при наличии трения. Вне области неустойчивости установившиеся колебания происходят с частотой внешней нагрузки.

Результаты исследований динамической устойчивости механических систем при параметрических колебаниях находят многочисленные технические приложения в строительной механике, радиотехнике, машиностроении, добыче нефти [1-6]. Большое внимание динамической устойчивости трубопроводных систем уделяется при разработке топливной, воздушной и гидравлической систем летательных аппаратов. Статистический анализ показывает, что до 20 % отказов двигателей связано с выходом из строя трубопроводов и шлангов системы питания [4, 5]. Непрерывное требование к увеличению мощности двигателя с ограничениями по массе и габаритам приводит к росту скоростей и давления потока жидкости при относительно тонкостенных конструкциях. Отсутствие внешнего сопротивления создает возможность возникновения параметрических колебаний с опасными резонансами.

В работах [5, 7-9] подробно рассмотрены параметрические колебания трубопровода. Так исследования, посвященные динамической устойчивости при поперечных колебаниях трубопровода, подверженного одновременному воздействию продольной силы и силы возникающей при протекании жидкости с пульсирующими составляющими, приведены в работе [9]. Описаны типы параметрических резонансов для систем с двойным возбуждением. Рекомендуются зависимости для качественного и количественного анализа областей неустойчивости. Показано, что при этом резко увеличивается число возможных резонансов, в частности, аддитивных и особых резонансов. Отмечается, что трубопровод находится в сложном параметрическом возбуждении. На возможность возникновения нелинейных,

случайных и хаотических колебаний трубопровода при действии пульсирующей нагрузки указывается в работе [7].

Специфика трубопроводов для перекачки нефтепродуктов заключается в их большой протяженности, разнообразных условиях эксплуатации, значительных величинах диаметров и масс. Прокладка различных участков может быть осуществлена наземным, надземным, подводным и подземным способом. В последнем случае – с большим демпфированием грунта.

Спектр возмущающих сил может быть механического, гидродинамического, акустического происхождения, а также быть связанным с изменением температурного поля и сейсмическим воздействием.

Интересные результаты получены при изучении работоспособности газопроводов в зонах гидродинамической активности [10]. Анализ аварий показывает, что до 60 % от их общего количества происходит на участке до 15 км от компрессорных станций.

Примерно такой же участок трубопровода (до 20 км от насосных агрегатов) считают динамически активным специалисты, занимающиеся вопросами отказа трубопроводов по причине коррозионного растрескивания под напряжением. Причем в зависимости от конкретных условий эксплуатации разрушение трубопроводов из-за коррозионного растрескивания под напряжением начинает проявляться через 5-16 лет после пуска их в эксплуатацию.

С помощью высокочувствительных микросейсмических съемок вдоль трасс магистральных газопроводов установлены участки с повышенными показателями вибраций технологического характера. Компрессорные станции, являющиеся мощными источниками вибраций способствуют образованию в системе "труба-грунт" колебаний от долей до сотен герц. Уровень микросейсмических шумов у компрессорных станций на два порядка превышает уровень шумов на участках, удаленных от компрессорных станций на более чем 15 км. Выявлена способность слабых вибраций с амплитудой 10-100 мкм/с в диапазоне частот 10-40 Гц в системе "грунт-труба" повышать уровень технологических вибраций, отрицательно влияющих на техническое состояние трубопровода.

Вышеизложенные результаты согласуются с современными представлениями о возникновении параметрических резонансов.

На основании анализа опубликованных работ на рис. 1 представлены некоторые причины возникновения низкочастотных колебаний трубопроводов.

Рассмотрим возможность устранения параметрического резонанса от действия продольной силы с пульсирующей составляющей. Это может быть достигнуто за счет снижения глубины пульсации и изменении упругодиссипативной характеристики трубопровода.

Параметрические колебания в детерминированных системах при линейной и нелинейной постановке задач исследованы весьма подробно [1, 3].

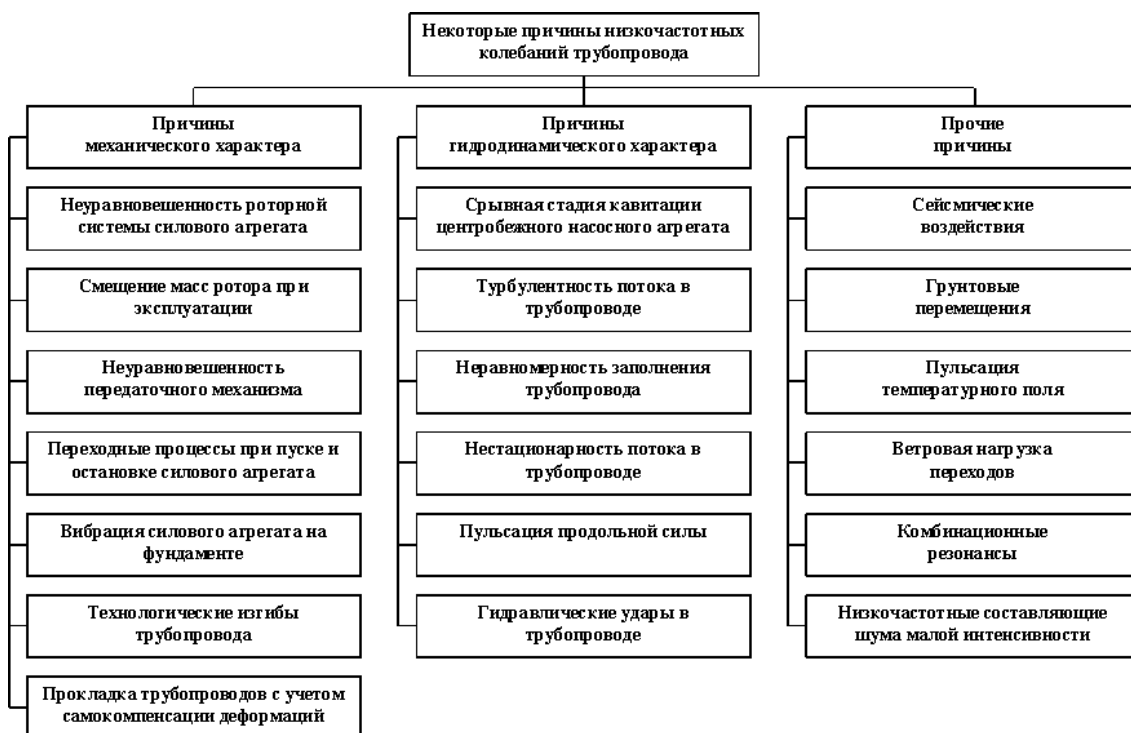


Рис. 1. Некоторые причины низкочастотных колебаний трубопровода

Дифференциальное уравнение для определения динамического прогиба трубопровода при действии продольной силы с пульсирующей составляющей имеет вид [1]:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + (P_0 + P_1 \cos \omega t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где P_0 – постоянная составляющая продольной силы;

P_1 – амплитуда переменной составляющей продольной силы;

ω – возмущающая частота;

EJ – жесткость трубопровода на изгиб;

m – масса единицы длины трубопровода.

Граничным условием шарнирно опертого участка трубопровода удовлетворяет функция

$$y = T(t) \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (2)$$

где $T(t)$ – неизвестная функция времени;

l – длина рассматриваемого участка трубопровода.

При подстановке выражения (2) в уравнение (1) для $n = 1$, получим

$$\left[m \frac{d^2 T}{dt^2} + EJ \frac{\pi^4 T}{l^4} - (P_0 + P_1 \cos \omega t) \frac{\pi^2 T}{l^2} \right] \sin \frac{\pi x}{l} = 0. \quad (3)$$

Поскольку $\sin \frac{\pi x}{l} \neq 0$, из условия (3) имеем:

$$T + \frac{\pi^2}{m l^2} [P_{кр} - P_0 - P_1 \cos \omega t] T = 0, \quad (4)$$

где $P_{кр} = EJ \frac{\pi^2}{l^2}$.

Обозначив

$$\omega t = 2\tau, \quad a = \frac{4\pi^2(P_{кр} - P_0)}{m \omega^2 l^2}, \quad q = \frac{2\pi^2 P_1}{m \omega^2 l^2} \quad (5)$$

придем к уравнению Матье

$$T + (a - 2q \cos 2\tau) T = 0. \quad (6)$$

Уравнение Матье хорошо изучено и используется для оценки динамической устойчивости механических систем, подверженных параметрическим колебаниям [1, 3, 6].

В параметрах a и q (5) строят диаграмму устойчивости Айнса-Стрейта (рис. 2). Неустойчивые области заштрихованы. Так, например, точка A находится в зоне параметрического резонанса, а точка N – в зоне устойчивых колебаний.

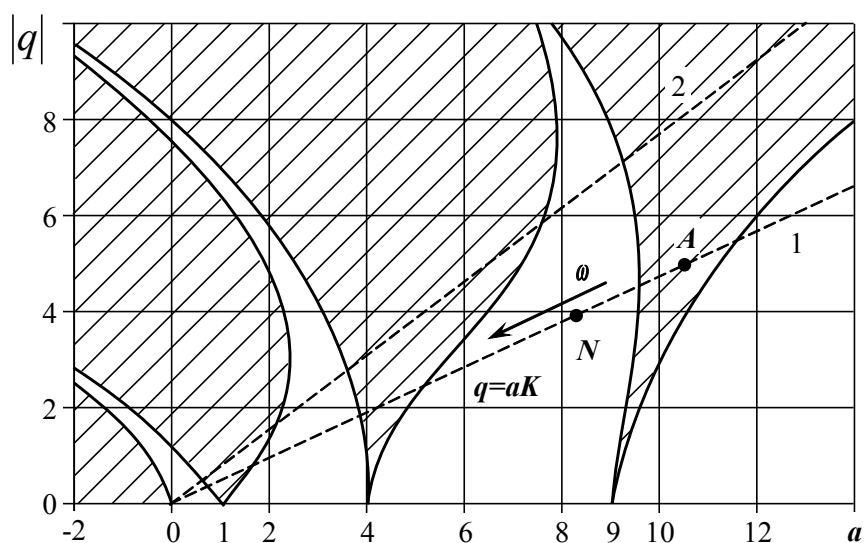


Рис. 2. Диаграмма Айнса-Стрейта с тремя областями резонанса

Показанные на диаграмме устойчивости три резонанса являются наиболее опасными при параметрических колебаниях, особенно первый при $a=1$, когда $\omega=2\omega_0$, где ω – частота возбуждения, ω_0 – частота собственных колебаний механической системы. Оценим свойства параметрических колебаний при изменении частоты возбуждения ω . Как показывают выражения (5) с увеличением частоты возбуждения ω (рис. 2) параметры a и q будут уменьшаться по прямой, приближающейся к началу координат с угловым коэффициентом

$$K = \frac{q}{a} \text{ или } K = \frac{P_1}{2(P_{кр} - P_0)}. \quad (7)$$

Линия 1 (рис. 2) при этом пересекает чередующиеся области устойчивости и неустойчивости. В областях неустойчивости возникает параметрический резонанс. С увеличением глубины пульсации q за счет роста углового коэффициента K линия 2 пересекает области неустойчивости с большими интервалами и зоны параметрического резонанса расширяются.

Уменьшая коэффициент K можно снизить величину интервалов резонансных зон. Это достигается (см. выражение 7) путем снижения величины составляющей продольной силы P_0 , пульсирующей составляющей P_1 , повышением величины критической силы $P_{кр}$.

В качестве примера на диаграмме Айнса-Стретта (рис. 3) показаны области динамической неустойчивости трубопровода диаметром 402 мм с толщиной стенки 15 мм при разных длинах участков. Если для трубопровода при $l=150$ м и $l=200$ м (линии 1 и 2) неустойчивость наступает вблизи значений $a=1$ и $a=4$, то с увеличением длины l и глубины пульсации (линии 3 и 4) возрастают интервалы динамической неустойчивости.

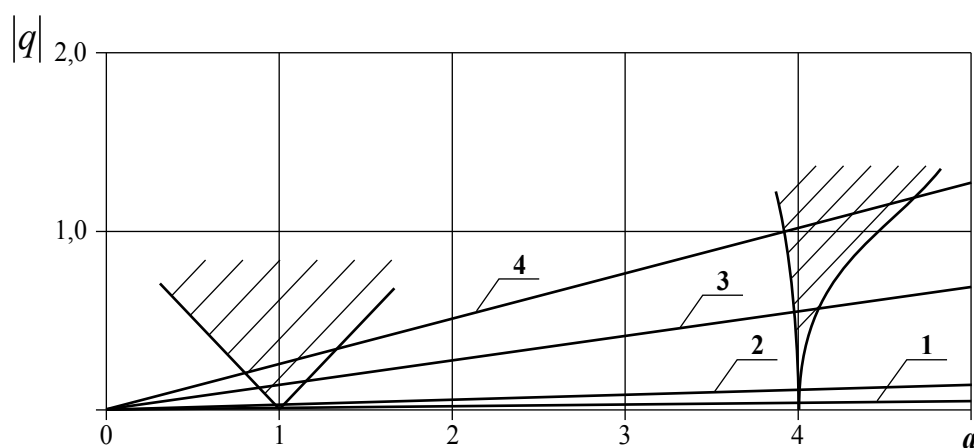


Рис. 3. Фрагмент диаграммы Айнса-Стретта с главным и вторым параметрическими резонансами

Амплитуды колебаний быстро убывают с увеличением номера резонанса. Так, при $q=0,05$ амплитуды соответствующие первому, второму, третьему резонансам относятся как $1 : 0,22 : 0,5$ [1]. Если в системе присутствует диссипация, то эта разница будет еще больше. Поэтому при наличии затухания рассматривается обычно главный параметрический резонанс ($\omega=2\omega_0$) как наиболее опасный с минимальным изменением области неустойчивости.

При наличии затухания чаще пользуются не диаграммой Айнса-Стретта, а диаграммой относительно частоты возбуждения θ [1]. На рис. 4 показаны области относительно частоты возбуждения для главного и второго параметрических резонансов без демпфирования и при декрементах затухания $\Delta=0,2$ и $\Delta=0,4$.

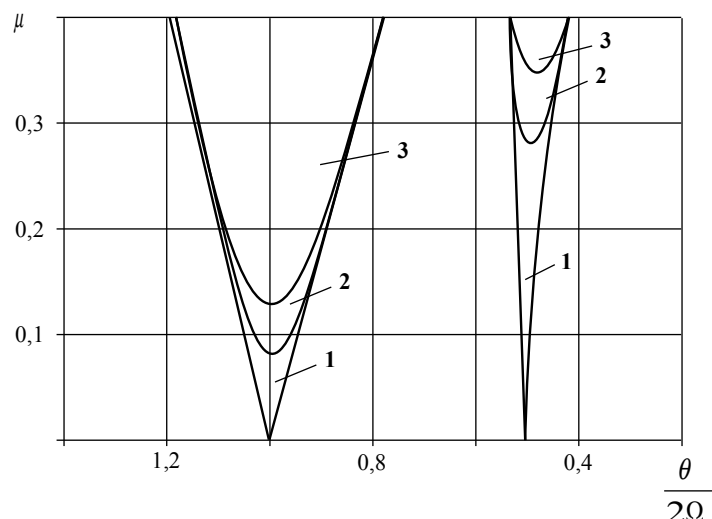


Рис. 4. Области неустойчивости относительно частоты возбуждения θ для главного и второго параметрических резонансов:

- 1 - область неустойчивости без демпфирования;
- 2 - область неустойчивости при декременте затухания $\Delta = 0,2$;
- 3 - область неустойчивости при декременте затухания $\Delta = 0,4$

Как следует из рис. 4 с увеличением затухания области неустойчивости смещаются выше оси абсцисс и используя демпфирование можно полностью исключить параметрические колебания, если глубина пульсации не достигает областей неустойчивости. Параметрические резонансы подавляются сильнее с увеличением их номера.

Для главного параметрического резонанса критическое значение частоты возбуждения равно

$$\theta = 2\Omega \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta}{\pi} \right)^2 \pm \sqrt{\mu^2 - \left(\frac{\Delta}{\pi} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta}{\pi} \right)^4}}, \quad (8)$$

где $\mu = \frac{P_1}{2(P_k - P_0)}$; $\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_k}}$; $\Delta = \frac{2\pi \varepsilon}{\omega_0}$.

Здесь ω_0 – частота собственных колебаний; для шарнирно-опертого трубопровода $\omega_0 = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}$; ε – коэффициент затухания.

Критическое значение частоты возбуждения для второго параметрического резонанса будет иметь следующий вид

$$\theta = \sqrt{1 - \mu^2 \pm \sqrt{\mu^4 - \left(\frac{\Delta}{\pi} \right)^2 (1 - \mu^2)}}. \quad (9)$$

Приближенное значение коэффициента возбуждения μ при котором возникает неустойчивость системы будет равно для главного резонанса $\mu = \frac{\Delta}{\pi}$, для

второго резонанса $\mu = \left(\frac{\Delta}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$.

Наряду с введением сопротивления для повышения устойчивости трубопроводов используются динамические гасители колебаний [4, 11]. Установка динамических гасителей позволяет отстроиться от параметрического резонанса. Динамический гаситель колебаний с вязким трением [11] раздвигает главную область параметрического резонанса (рис. 5). Изменение настройки гасителя по массе и частоте собственных колебаний позволят сдвигать эти области вправо от оси ординат исключая при определенной глубине пульсации попадание в область динамической неустойчивости.

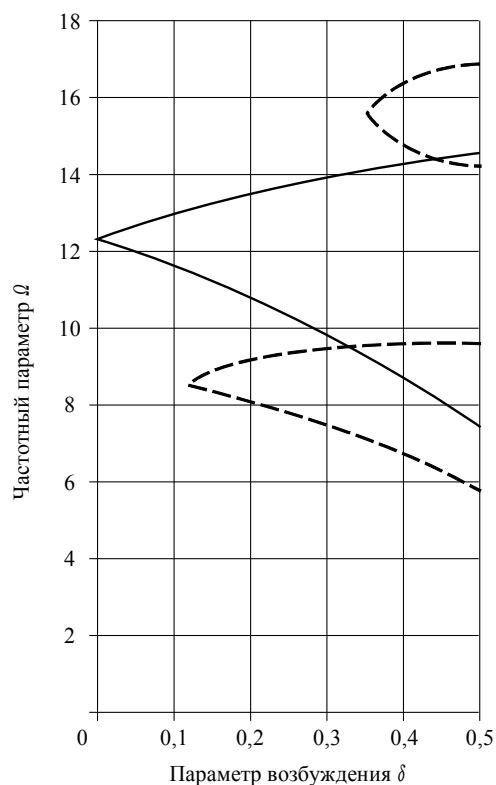


Рис. 5. Области главного параметрического резонанса:

- — область неустойчивости без демпфера;
- - - - - — область неустойчивости с демпфером

Постоянно меняющиеся условия эксплуатации в связи с пересеченной местностью, различными частотными и упругими характеристиками грунтов, всплыванием трубопроводов и воздействием других факторов делает задачу об устранении параметрического резонанса трубопровода по трассе достаточно сложной.

Изменение частотных параметров на разных участках трубопровода (рис. 6) меняет локальную добротность системы, т.е. ее восприимчивость к внешним воздействиям. При высокой добротности системы, последняя будет реагировать, в первую очередь, на ту часть спектра параметрического возбуждения, частоты которой близки к $2\omega_0$ [2].

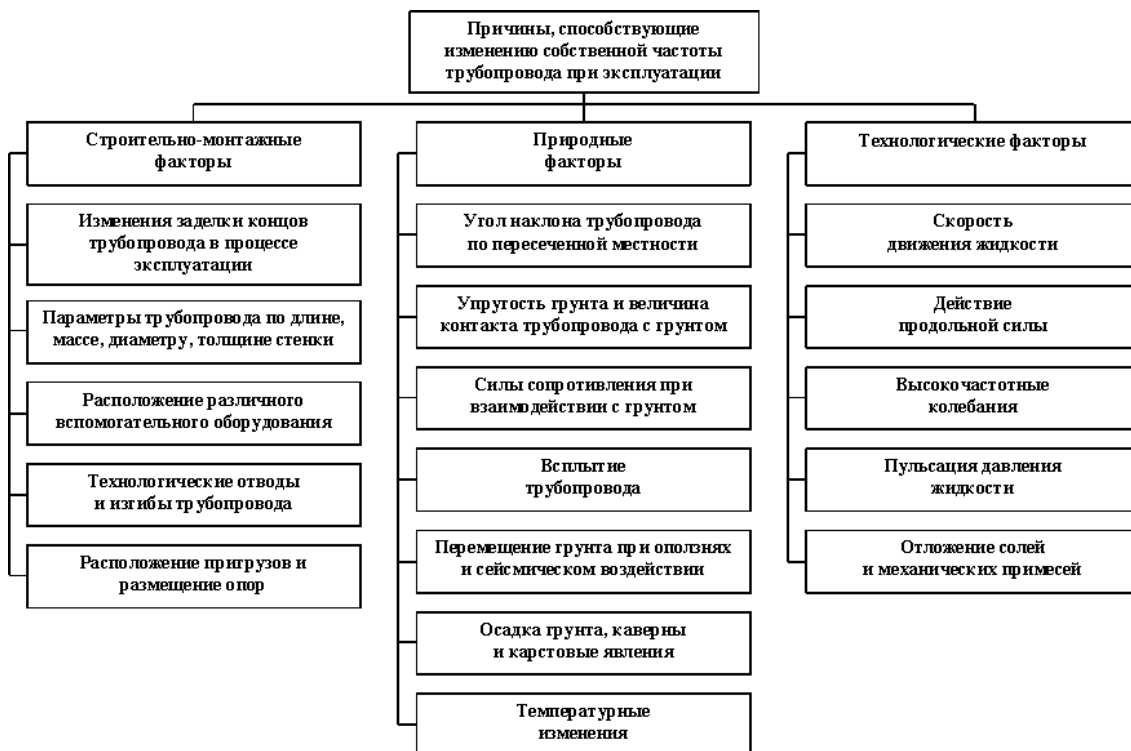


Рис. 6. Причины, способствующие изменению собственной частоты трубопровода при эксплуатации

Для предупреждения параметрических колебаний трубопровода можно рекомендовать следующие мероприятия:

1. устранение или уменьшение возбуждающих сил;
2. стабилизация динамической устойчивости трубопровода путем изменения его параметров;
3. использование динамических гасителей и демпферов с линейной и нелинейной характеристиками;
4. демпфирование трубопровода грунтом, подсыпкой.

Литература

1. Болотин В.В. Динамическая устойчивость упругих систем. - М.: Гостехиздат, 1956. - 600 с.
2. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. - М.: Наука, 1979. - 336 с.
3. Шмидт Г. Параметрические колебания. - М.: Мир, 1978. - 336 с.
4. Кондрашев Н.С. Параметрические колебания трубопроводов на упруго-демпфирующих опорах, вызываемые пульсирующим потоком // В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. - Киев. 1968. - С. 427-433.
5. Светлицкий В.А. Механика трубопроводов и шлангов. - М.: Машиностроение, 1982. - 280 с.

6. Ишемгужин И.Е. Устранение параметрических колебаний низа колонны штанг в наклонной скважине // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2010. - №4, - С. 28-31.

7. Ильгамов М.А., Мишин В.Н. Поперечные колебания трубы под действием бегущих волн в жидкости // Изв. РАН. Механика твердого тела. - 1997. - №1. - С. 181-192.

8. Челомей С.В. Динамическая устойчивость при высокочастотном параметрическом возбуждении // Докл. АН СССР. - 1981. - т. 257. - №4. - С. 853-857.

9. Челомей С.В., Щеглов Г.А. О динамической устойчивости прямого трубопровода, нагруженного переменной осевой силой при протекании через него пульсирующей жидкости // Изв. РАН Механика твердого тела. - 1998. - №6. - С. 175-184.

10. Султангареев Р.Х. Обеспечение работоспособности газопроводов в зонах геодинамической активности. Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук. Уфа /УГНТУ/, 2009. 24 с.

11. Singh K., Malik A.K. Use of dynamic absorbers to control parametric instabilities of pipe. Journal of Applied Mechanics, 1978, Vol. 45, Issue 4, pp. 949-951.

DAMPING PARAMETRIC VIBRATIONS OF THE PIPELINE

I.E. Ishemguzhin¹, T.I. Gabbasov, I.A. Shammazov,
M.R. Sitdikov, M.A. Kochekov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹ *e-mail:ishemguzhin@yandex.ru*

Abstract. *Parametric vibrations of the pipeline are considered. Influence of operational conditions on their occurrence is shown. By means of the stability diagram areas of a parametric resonance are defined. Recommendations about elimination of parametric vibrations of the pipeline are made.*

Keywords: *pipeline, operating conditions, parametric vibrations, dynamic stability, shock-absorber of vibrations*

References

1. Bolotin V.V. *Dinamicheskaya ustoichivost' uprugikh sistem* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow, Gostoptekhizdat, 1956. 600 p.
2. Bolotin V.V. *Sluchainye kolebaniya uprugikh sistem* (Random oscillations of elastic systems). Moscow: Nauka, 1979. 336 p.
3. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniya* (Parametric oscillations). Moscow: Mir, 1978. 336 p.
4. Kondrashev N.S. *Parametricheskie kolebaniya truboprovodov na uprugodempfiruyushchikh oporakh, vyzyvayemye pul'siruyushchim potokom* (Parametric oscillations of a pipeline on an elastic-damping bearings caused by pulsating flow) in book *Rasseyanie energii pri kolebaniyakh mekhanicheskikh sistem* (*Energy dissipation during oscillations of mechanical systems*). Kiev, 1968. pp. 427-433.
5. Svetlitskii V.A. *Mekhanika truboprovodov i shlangov* (Mechanics of pipelines and hoses). Moscow: Mashinostroenie, 1982. 280 p.
6. Ishemguzhin I.E. *Ustranenie parametricheskikh kolebaniy niza kolonny shtang v naklonnoi skvazhine* (Removal of parametric vibrations in the bottom part of rod string of inclined well) *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2010, Issue 4, pp. 28-31.
7. Il'gamov M.A., Mishin V.N. *Poperechnye kolebaniya truby pod deistviem begushchikh voln v zhidkosti* (The transverse oscillations of pipe under the action of running waves in the fluid) *Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela* (*Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences*), 1997, Issue 1, pp. 181-192.
8. Chelomei S.V. *Dynamic stability upon high-frequency parametric excitation* *Soviet Physics Doklady*, Vol. 26, pp. 390-392 (Translated from Chelomei S.V. *Dinamicheskaya ustoichivost' pri vysokochastotnom parametricheskom vozbuzhdenii*. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1981, Vol. 257, Issue 4, pp. 853-857.)

9. Chelomei S.V., Shcheglov G.A. O dinamicheskoi ustoichivosti pryamogo truboprovoda, nagruzhennogo peremennoi osevoi siloi pri protokanii cherez nego pul'siruyushchei zhidkosti (On the dynamic stability of straight pipeline which loaded by a variable axial force during the a pulsating flow fluid) *Izvestiya RAN. Mekhanika Tverdogo Tela (Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences)*, 1998, Issue 6, pp. 175-184.

10. Sultangareev R.Kh. Obespechenie rabotosposobnosti gazoprovodov v zonakh geodinamicheskoi aktivnosti (Providing health of gas pipelines in the areas of geodynamic activity). PhD Thesis. Ufa, USPTU, 2009. 24 p.

11. Singh K., Malik A.K. Use of dynamic absorbers to control parametric instabilities of pipe. *Journal of Applied Mechanics*, 1978, Vol. 45, Issue 4, pp. 949-951.