

УДК 622.691.24

# Оценка вибрационного состояния технологических трубопроводов поршневых компрессоров

Л. И. Соколинский (ОАО «Оргэнергогаз», РФ, Москва)

E-mail: Sokolinskiy@oeg.gazprom.ru

**В статье рассмотрены вопросы нормирования вибрации технологических трубопроводов поршневых компрессоров. Дана оценка применимости для этих целей норм низкочастотной вибрации по СТО Газпром 2-2.3-324-2009 «Диагностическое виброобследование технологических трубопроводов компрессорных цехов с центробежными нагнетателями. Нормы оценки и методы проведения работ» и по СА 03-003-07 «Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов». Показано, что применение норм по СТО Газпром 2-2.3-324-2009 к рассматриваемому объекту при определенных условиях может привести либо к пропуску дефекта, либо к ложной тревоге.**

*Ключевые слова:* вибрация, пульсация газа, компрессор, ротор, виброперемещение, виброскорость, частота, амплитуда, среднеквадратическое значение.

В настоящее время в газовой промышленности нет отраслевого документа по нормированию вибрации технологических трубопроводных обвязок (ТПО) поршневых компрессоров (ПК). Среди специалистов по вибродиагностике, работающих в газовой промышленности, нет единого мнения о выборе критериев оценки вибрационного состояния ТПО ПК.

Одни специалисты считают, что оценивать вибросостояние трубопроводов ПК следует по нормам, приведенным в СТО Газпром 2-2.3-324-2009 [1], в которых параметром оценки вибросостояния является среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости  $V_e$  в заданном низкочастотном диапазоне. Такой подход удобен при проведении виброизмерений и достаточно прост при анализе полученных результатов. Однако область применения [1] – трубопроводы центробежных компрессоров (ЦБК), и нет никаких разрешительных документов на применение норм этого стандарта к трубопроводам ПК. Решить эту проблему, как они считают, можно разработкой и выпуском соответствующего разрешительного документа.

Другие специалисты, к которым причисляет себя автор, считают, что для рассматриваемого объекта применение [1] некорректно, и предлагают оценивать вибросостояние ТПО ПК по нормам СА 03003-07 [2], которыми нормируются амплитуды виброперемещения  $S_a$  спектральных составляющих вибрации. Такой подход более трудоемок при обработке и оценке результатов измерений, однако, по мнению автора, более адекватно отражает условия прочности трубопроводов.

В данной статье изложен подход к решению рассматриваемой проблемы, сложившийся в ОАО «Оргэнергогаз», основанный на физических особенностях вибрации трубопроводов ЦБК и ПК.

Основным источником вибрации трубопроводов, как ПК, так и ЦБК, является пульсирующий поток транспортируемого газа. При бездефектном состоянии ЦБК и их ТПО, включая конфигурацию трубопроводов и техническое состояние опор, низкочастотная пульсация газа и, следовательно, вибрация труб малы, так как мала энергия низкочастотных колебаний, генерируемых компрессором. Почти вся колебательная энергия, генерируемая ЦБК,

сосредоточена в области так называемых лопаточных частот (лопаточная частота равна частоте вращения ротора компрессора, умноженной на число лопаток рабочего колеса). На рис. 1, а, б приведены характерные спектры, соответственно, низкочастотной и высокочастотной вибрации трубы ЦБК при бездефектном состоянии.

На рис. 1, а выделяются область низкочастотной, случайной по амплитуде и частоте вибрации (до 30–40 Гц), вызванной естественными турбулентными пульсациями транспортируемого газа, и детерминированная составляющая с частотой вращения ротора  $F_n$ . Значения этих составляющих спектра при бездефектном состоянии малы, амплитуды виброперемещений обычно не превышают единиц микрометров.

На рис. 1, б курсором отмечена лопаточная составляющая спектра вибрации  $F_{л}$ . Выделяется также 2-я гармоника лопаточной составляющей  $2F_{л}$ . Остальные составляющие, включая низкочастотную область, пренебрежимо малы. Поэтому можно считать, что у бездефектной системы «трубопровод – центробежный компрессор» низкочастотной вибрации труб практически нет. Высокочастотная вибрация труб обвязки ЦБК при его работе имеется всегда.

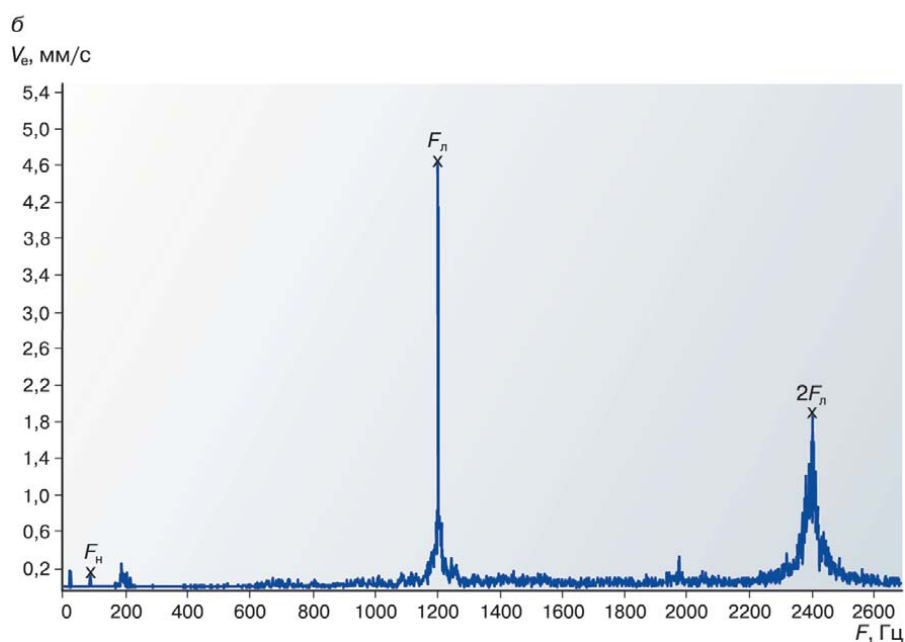
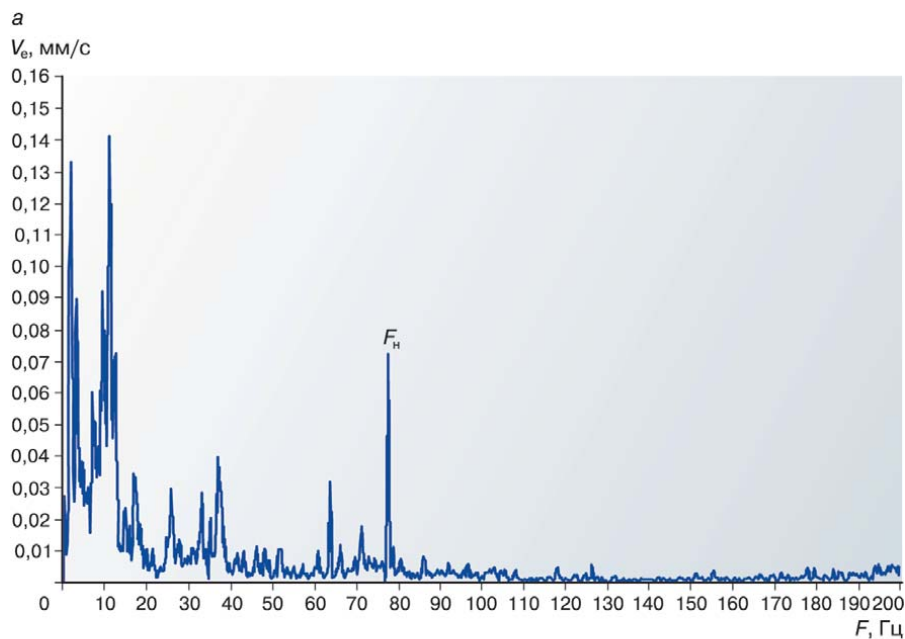
Повышенная низкочастотная вибрация трубопроводов ЦБК в большинстве случаев является резонансной и может быть вызвана либо аномальными газодинамическими процессами в трубопроводах или в проточной части компрессора, либо дефектным состоянием опор. А частота доминирующей составляющей вибрации часто не связана с частотой вращения ротора компрессора.

При разработке [1], в которой принимал участие автор, критериальные уровни норм низкочастотной вибрации трубопроводов ЦБК определялись статистическими мето-

дами обработки большого объема натуральных измерений. При этом ставилась задача выявления аномальных вибросостояний, вызванных возможными устранимыми дефектами, например дефектом опор, возникновением акустических резонансов, дефектами проточной части ЦБК и т. п. Оценка величин накопленных усталостных повреждений собственно трубопроводов под действием вибрации с заданными в нормах [1] критериальными значениями не выполнялась, так как по прикидочным расчетам было ясно, что эти величины далеки от критических значений. Но следовало учитывать наличие на технологических трубах и запорно-регулирующей арматуре (ЗРА) всевозможных вспомогательных трубопроводов, например продувочных патрубков, а также психологическое воздействие вибрации на обслуживающий персонал.

В трубопроводах ПК основная энергия пульсаций газа сосредоточена в низкочастотной области на дискретных составляющих, кратных частоте вращения вала. Это связано с тем, что газ перекачивается компрессором порциями, периодичность которых задается частотой возвратно-поступательного движения поршней ПК и фазовым сдвигом движения поршней, определяемым расположением приводов поршней на коленчатом вале (для многоцилиндровых ПК). Существенной высокочастотной вибрации ТПО ПК, как правило, не наблюдается. Характерный спектр пульсации газа в трубопроводе одной из ступеней 6-цилиндрового двухрядного двухступенчатого компрессора с цилиндрами двойного действия приведен на рис. 2.

Пульсация газа в трубопроводах ПК, так же как и вибрация трубопроводов в исправном или неисправном состоянии, имеет детерминированный по частоте спектр, кратный частоте вращения вала компрессора. При работе нескольких ПК на общую трубопроводную систему возможны составляющие колебаний с частотой биений. Характер вибрации ТПО ПК может быть как резонансным, так и вынужденным. Амплитуды виброперемещений для обоих случаев колебаний, даже при исправном состоянии ТПО, могут достигать десятков или сотен микрометров. Таким образом, можно считать, что *низкочастотная вибрация труб ПК присутствует всегда при работе компрессора. Поэтому основная задача*



**Рис. 1. Низкочастотный (а) и высокочастотный (б) спектры СНЗ виброскорости  $V_v$  (в мм/с) трубопровода ЦБК при бездефектном состоянии**

*нормирования вибрации трубопроводов ПК заключается в косвенной оценке динамических напряжений участков трубопроводов.*

Нормы вибрации труб в СА 03-003-07 [2] были перенесены без изменений из РТМ 38.001-94 [3], куда, в свою очередь, они попали из РТМ 26-12-11-76 [4]. Можно предположить, что эти нормы изначально разрабатывались с учетом накопления повреждаемости труб под воздействием динамических нагрузок. Проведенные в ОАО «Оргэнергогаз» оценочные расчеты

напряженно-деформированного состояния некоторых типичных участков ТПО позволяют с определенной осторожностью подтвердить данное предположение.

На рис. 3 показано сопоставление нормируемых уровней вибрации труб по [1] и [2]. Нормируемый параметр по [1] пересчитан в амплитуду виброперемещения в предположении одночастотной (гармонической) вибрации. Для наглядности графики на рис. 3 построены в логарифмическом масштабе амплитуд виброперемещения.

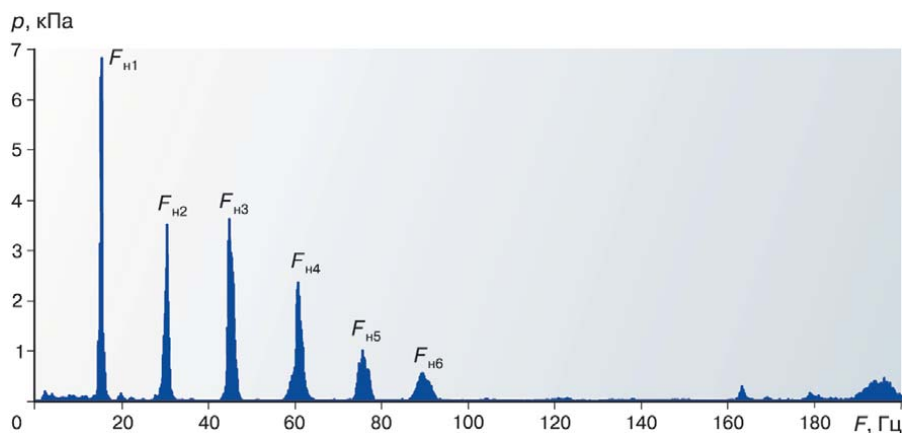


Рис. 2. Характерный спектр пульсации давления газа в трубопроводе нагнетания 1-й ступени при частоте вращения вала ПК 900 мин<sup>-1</sup>

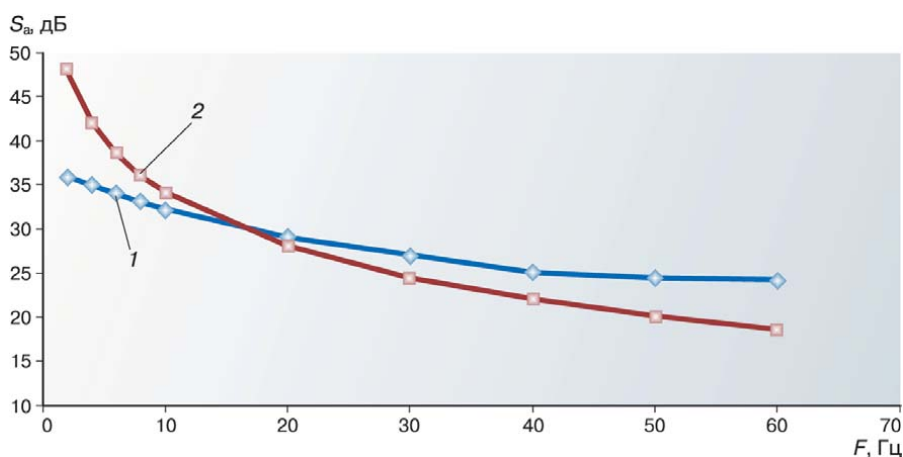


Рис. 3. Границы зон вибрации, допустимой при эксплуатации, по СА 03-003-07 (1) и СТО Газпром 2-2.3-324 – 2009 (2)

Будем считать, что нормы [2] наиболее адекватно отражают влияние вибрации на напряженно-деформированное состояние трубопроводов, а разброс в допустимых уровнях по нормам [1] и [2] не должен превышать 3 дБ (отличие в 1,4 раза). Тогда

из рис. 3 следует, что применение норм [1] к вибрации трубопроводов поршневых компрессоров может привести к пропуску необходимости исправления ТПО для диапазона частот до 8 Гц и к ложному предупреждению о необходимости исправления при

доминирующей вибрации с частотой 40 Гц и выше. Выводы очевидны: в первом случае – возможность образования трещин в зонах концентрации напряжений при допустимой по [1] вибрации; во втором случае – либо нецелесообразные затраты на реконструкцию, либо (при физической невозможности конструктивными изменениями снизить вибрацию до допустимого по [1] уровня) введение ограничений на режимы работы ПК.

Компромиссное решение, обеспечивающее и относительную простоту виброобследований, и адекватную оценку вибросостояния ТПО ПК, видится в следующем. Должна быть разработана методика виброобследований, по которой на первом этапе выполняются измерения СКЗ виброскорости в заданной низкочастотной области во всех точках контроля вибрации. Далее выполняется регистрация спектров амплитуд виброперемещения в отдельных точках, отобранных по указанному в методике критерию. Оценка вибросостояния ТПО ПК выполняется по результатам измерений амплитуд виброперемещений в этих отдельных точках.

#### Список литературы

1. СТО Газпром 2-2.3-324–2009. Диагностическое виброобследование технологических трубопроводов компрессорных цехов с центробежными нагнетателями. Нормы оценки и методы проведения работ. – М.: ОАО «Газпром», 2009. – С. 1–59.
2. СА 03-003–07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. – М.: Ростехэкспертиза, 2007. – С. 1–71.
3. РТМ 38.001–94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. – М.: ВНИПИнефть, 1994. – С. 1–61.
4. РТМ 26-12-11–76. Компрессоры поршневые оппозитные мощностью свыше 250 кВт. Метод расчета колебаний давления газа и вибрации коммуникаций. – Л.: ЛениИИхиммаш, 1976. – С. 1–56.

## Reciprocating compressor piping: Assessing vibration levels

Sokolinskiy L.I. (OAO Orgenergogaz, RF, Moscow)

E-mail: Sokolinskiy@oeg.gazprom.ru

The paper addresses existing vibration ratings for different reciprocating compressor piping configurations. In particular, the author evaluates applicability of low-frequency vibration regulations specified by STO Gazprom 2-2.3-324–2009 industry standard. Vibration diagnostics for process piping at compressor stations fitted with centrifugal blowers. Assessment operations norms and methods, and in accordance with SA 03-003–07, Strength and vibration estimates for steel process pipes. It was found that application of GTO Gazprom 2-2.3-324–2009 norms, could likely lead, in some cases, to either defect skipping or to false alarms, with both being unacceptable.

**Keywords:** vibration, gas surge, compressor, rotor, vibratory displacement, vibration velocity, frequency, amplitude, mean-square value, ratings, standards.

#### References

1. STO Gazprom 2-2.3-324–2009. Diagnosticheskoe vibroobledovaniye tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh tsekhov s tsentrobezhnyimi nagnetatelyami. Normy otsenki i metody provedeniya rabot

[Standard Gazprom 22.3324–2009. Diagnostic vibratory analysis of process pipelines of compressor shops with centrifugal superchargers. Norms of evaluation and methods of work]. Moscow, Gazprom Publ., 2009. 59 p.

2. SA 03-003–07. Raschety na prochnost' i vibratsiyu stal'nykh tekhnologicheskikh truboprovodov [SA 03003-07. Calculations of strength and vibration of steel technological pipelines]. Moscow, Rostekhexpertiza Publ., 2007. 71 p.
3. РТМ 38.001–94. Ukazaniya po raschetu na prochnost' i vibratsiyu tekhnologicheskikh stal'nykh truboprovodov [RTM 38.001–94. Instructions on calculation of of strength and vibration of technological steel pipelines]. Moscow, VNIPIneft' Publ., 1994. 61 p.
4. РТМ 26-12-11–76. Kompressory porshnevye oppozitnye moshchnost'yu svyshe 250 kWt. Metod rascheta kolebaniy davleniya gaza i vibratsii kommunikatsiy [RTM 26-12-11–76. Opposed reciprocating compressors with 250 kW or higher capacity. Gas pressure oscillation and piping vibration testing method]. Leningrad, LenIiIkhimmash Publ., 1976. 56 p.