

# О НОРМИРОВАНИИ ВИБРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ ПАО «ГАЗПРОМ»

УДК 622.691.4.07

**Л.И. Соколинский**, к.т.н., АО «Газпром оргэнергогаз», ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина» (Москва, РФ), sokolinskiy@oeg.gazprom.ru

**А.С. Зарецкий**, АО «Газпром оргэнергогаз», Zaretsky@oeg.gazprom.ru

**В.Г. Юдин**, ООО «Газпром ПХГ» (Москва, РФ), V.Yudin@phg.gazprom.ru

В статье рассмотрены вопросы нормирования вибрации трубопроводных обвязок поршневых компрессоров компрессорных станций ПАО «Газпром». Дана оценка существующей нормативной базе по вибрации этих объектов. Показано, что применение существующих отраслевых норм вибрации трубопроводных обвязок поршневых компрессоров может приводить к ложным выводам о наличии дефектов и необходимости конструктивных изменений трубопроводов. В статье указаны возможные направления решения отмеченной проблемы.

Представлены уровни норм вибрации трубопроводов с поршневыми компрессорами, соответствующие проекту, эксплуатации и аварийным ситуациям. Дан анализ норм вибрации технологических трубопроводов, сформулирована задача нормирования вибрации трубопроводов с поршневыми компрессорами, состоящая в косвенной оценке накопления повреждаемости труб под действием динамических нагрузок.

Возможность применения различных норм была оценена на примере виброобследований трубопроводной обвязки компрессорного цеха с четырьмя поршневыми компрессорами одного из подземных хранилищ газа. Измерены виброскорости и виброперемещения, с использованием двух нормативных документов проведены расчеты оценки снижения ресурса участка трубопровода с максимальной вибрацией. Показано, что нормы ГОСТ 32388–2013 более точно отражают техническое состояние трубопроводов, в связи с чем предложено разработать на его основе отраслевой нормативный документ по вибрации трубопроводов с поршневыми компрессорами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ВИБРАЦИЯ, ПУЛЬСАЦИЯ ГАЗА, ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЕ, ВИБРОСКОРОСТЬ, ЧАСТОТА, АМПЛИТУДА, СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ, ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ.

Для оценки вибрации технологических трубопроводов поршневых компрессоров (ПК) подземных хранилищ газа (ПХГ) в настоящее время должны использоваться нормы СТО Газпром 2–2.3–084–2006 [1]. Норм на вибрацию трубопроводной обвязки (ТПО) ПК других типов компрессорных станций (КС) (линейных, дожимных) в отрасли нет, поэтому специалисты, как правило, применяют нормы для низкочастотной вибрации по СТО Газпром 2–2.3–324–2009 [2]. Вместе с тем такое применение неправомерно, так как [2] распространяется только на трубопроводы центробежных компрессоров.

В [1] нормируется среднеквадратическое значение (СКЗ)

виброскорости  $V_e$  в частотном диапазоне 4–1500 Гц с оценками вибросостояния: <4,4 мм/с – отлично; 4,4–7,0 мм/с – хорошо; 7,0–11,2 мм/с – допустимо; 11,2–18,0 мм/с – требует принятия мер; >18,0 мм/с – недопустимо.

Действие этого стандарта «распространяется на все надземные технологические трубопроводы ПХГ» без разделения КС ПХГ с центробежными или поршневыми газоперекачивающими агрегатами (ГПА), без выделения трубопроводов блоков очистки газа, систем закачки газа в пласт и отбора газа и т. п. Первоисточником норм вибрации раздела 6.9 СТО [1] можно считать «Нормы вибрации трубопроводов технологического

газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями» [3]. По крайней мере, нормативные уровни и измеряемые величины вибрации обоих документов совпадают. Но в [3] отмечено, что эти нормы не распространяются на трубопроводы поршневых компрессоров. Кроме того, в [3] указано, что рассматриваются только изгибные колебания трубопроводов, поэтому измерения выполняются в частотном диапазоне 1–40 Гц.

Другим заслуживающим внимания документом по нормированию вибрации труб является ГОСТ 32388–2013 [4]. Здесь вибрация нормируется по амплитудам гармонических составляющих

**Sokolinsky L.I.**, Candidate of Sciences (Engineering), Gazprom orgenergogaz JSC, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Gubkin Russian State University of Oil and Gas” (Moscow, Russian Federation), sokolinskiy@oeg.gazprom.ru

**Zaretsky A.S.**, Gazprom orgenergogaz JSC, Zaretsky@oeg.gazprom.ru

**Yudin V.G.**, Gazprom PHG LLC (Moscow, Russia), V.Yudin@phg.gazprom.ru

### Norming of vibration of process pipelines of the reciprocating compressors of compressor stations of Gazprom PJSC

The article considers the issues of normalizing the vibration of piping of reciprocating compressors of compressor stations of Gazprom PJSC. The estimation of existing regulatory framework for the vibration of these objects is given. It is shown that the application of existing industry norms for vibration of piping of reciprocating compressors can lead to false conclusions about the presence of defects and the need for changes in pipeline constructions. The possible directions of the solution of the mentioned problem are indicated in the article.

The levels of vibration norms for pipelines with reciprocating compressors are presented, corresponding to the design, operation and emergency situations. The analysis of the vibration norms of process pipelines is given, the task of normalizing the vibration of pipelines with reciprocating compressors is formulated, that is based on the indirect estimation of the pipe damage gathering under the influence of dynamic loads.

The possibility of applying of different norms was assessed using the example of vibration diagnostics of the piping of a compressor shop with four reciprocating compressors of one of the underground gas storages. The vibration velocity and vibration displacement were measured; the reduction in the life of the pipeline section with maximum vibration is estimated using two normative documents. It is shown that the norms of State Standard GOST 32388–2013 are more indicative of technical condition of the pipelines. In this connection, it is proposed to develop the industry normative document on the vibration of pipelines with reciprocating compressors on the basis of this State Standard.

**KEYWORDS:** VIBRATION, GAS PULSATION, VIBRATION DISPLACEMENT, VIBRATION VELOCITY, FREQUENCY, AMPLITUDE, AVERAGE SQUARE VALUE, CYCLIC STRENGTH.

Таблица 1. Допустимые значения амплитуд вибрации трубопровода  
Table 1. Allowable values of pipeline vibration amplitudes

Уровень Level	Амплитуда вибрации трубопровода, $S_a$ , мкм Pipeline vibration amplitudes $S_a$ , $\mu\text{m}$									
	Частота $f$ , Гц Frequency $f$ , Hz									
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60
1	120	115	100	90	85	60	50	45	40	35
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

виброперемещения  $S_a$ . В табл. 1 приведены указанные в [4] нормативные значения  $S_a$  вибрации на различных частотах.

Опорные уровни вибрации, приведенные в табл. 1, следующие: 1 – расчетный при проектировании «Удовлетворительное состояние трубопроводов»; 2 – допускаемый при эксплуатации «Необходим контроль»; 3 – требующий исправления «Необходим повышенный контроль, возможны отказы, необходимо исправление, реконструкция системы»; 4 – уровень появления аварийных

ситуаций «Требуется экстренное исправление».

В [4] так же, как и в [1], нет указания на принадлежность рассматриваемых трубопроводов к тому или иному виду оборудования. Но нормы вибрации в [4] перенесены без изменений, через ряд промежуточных документов, из РТМ 26–12–11–76 [5], поэтому их естественно считать нормами вибрации трубопроводов поршневых машин.

Различие в нормах [1] и [4] заключается не только в применимости этих документов к трубо-

проводным обвязкам различных видов компрессоров (центробежных и поршневых), но и в задачах, решавшихся при разработке исходных норм [6].

#### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Результаты обширных натурных и экспериментально-аналитических исследований колебаний ТПО центробежных компрессоров (ЦБК) [7–9] показали, что 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 и возбуждаемых потоком газа в неоднородностях труб. На рис. 1 показан характерный спектр низкочастотной вибрации трубы ЦБК при бездефектном состоянии.

На рис. 1 выделяется область низкочастотной случайной по амплитуде и частоте вибрации (до 30–40 Гц), вызванной естественными турбулентными пульсаци-

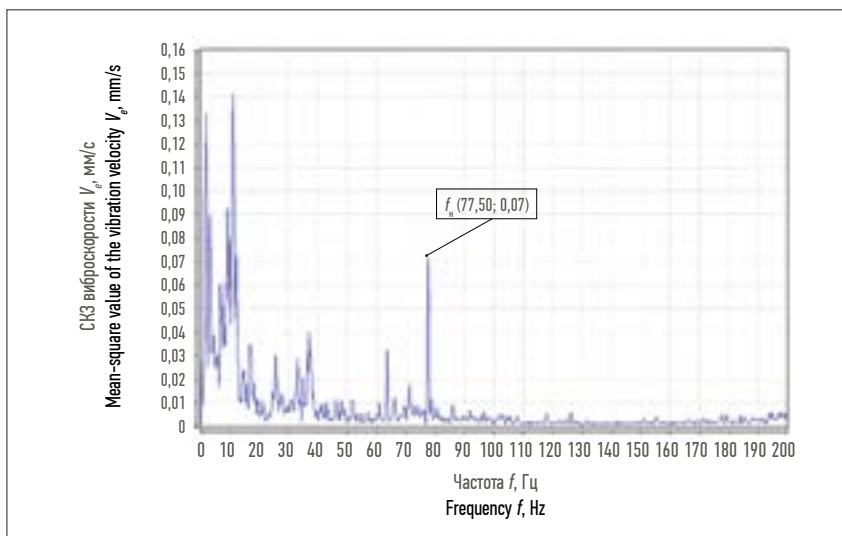


Рис. 1. Низкочастотный спектр СКЗ виброскорости  $V_r$  трубопровода ЦБК при бездефектном состоянии  
Fig. 1. Low-frequency spectrum of the mean-square value of the vibration velocity  $V_r$  of the pipeline of radial-flow compressor in the defect-free state

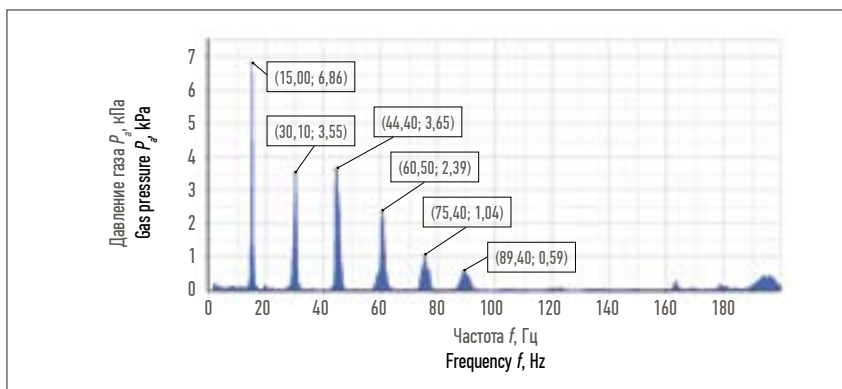


Рис. 2. Характерный спектр амплитуд пульсации давления газа  $P_a$  в трубопроводе ПК при скорости вращения вала 900 об/мин  
Fig. 2. Characteristic spectrum of the pulsation amplitudes of the gas pressure  $P_a$  in the pipeline of the reciprocating compressor at a shaft speed of 900 rpm

ями 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 мкм.

Повышенная низкочастотная вибрация трубопроводов ЦБК в большинстве случаев является резонансной и может быть вызвана либо аномальными газодинамическими процессами в трубопроводах или проточной части компрессора, либо дефектным состоянием опор [9]. При этом частота доминирующей состав-

ляющей вибрации, как правило, не связана с частотой вращения ротора компрессора.

При разработке [2], в процессе которой один из авторов принимал участие, критериальные уровни норм низкочастотной вибрации трубопроводов ЦБК определялись статистическими методами 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 ве-

личин накопленных усталостных повреждений собственно трубопроводов под действием вибрации с заданными в нормах [2] критериальными значениями не проводилась, 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 всевозможных вспомогательных трубопроводов, например продувочных патрубков, а также психологическое воздействие вибрации на обслуживающий персонал.

В трубопроводах ПК основная энергия пульсаций транспортируемого газа и, следовательно, вибрации ПК и трубопроводов сосредоточена в низкочастотной области на дискретных составляющих, кратных частоте вращения вала. Существенной высокочастотной вибрации ТПО ПК, как правило, не наблюдается. Характерный спектр пульсации давления газа в трубопроводе одной из ступеней шестицилиндрового двухрядного двухступенчатого компрессора с цилиндрами двойного действия показан на рис. 2.

Характер вибрации ТПО ПК может быть как резонансный, так и вынужденный нерезонансный. Амплитуды виброперемещений для обоих случаев колебаний, даже при исправном состоянии ТПО, могут достигать десятков или сотен мкм. Можно считать, что низкочастотная вибрация труб ПК присутствует всегда при работе компрессора. Поэтому основная задача нормирования вибрации трубопроводов ПК, решавшаяся разработчиками норм [4, 5], заключалась в косвенной оценке накопления повреждаемости труб под воздействием динамических нагрузок.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применимость норм [1] и [4] была оценена на примере виброобследований ТПО компрессорного цеха с четырьмя ПК одного

из ПХГ. В одних и тех же точках ТПО компрессоров на одних и тех же режимах измерялись виброскорость и виброперемещение. Спектры виброскорости и виброперемещения для точки, где было зафиксировано максимальное из измеренных значений  $V_e$ , показаны на рис. 3–4.

Оценка вибрации обследованных ТПО по нормам [1] была «Недопустимо» ( $V_e > 18$  мм/с). Оценка вибрации по нормам [4] (см. рис. 4 и табл. 1) соответствовала «Допустимо при эксплуатации. Необходим контроль». Оценки вибрации всех четырех ТПО ГПА цеха были аналогичными. При этом аномалий в работе компрессоров и опорной системы трубопроводов выявлено не было. Поэтому единственным вариантом снижения вибрации могла быть реконструкция трубопроводной обвязки.

По результатам оценки вибрации ТПО по нормам [1] следовало остановить работу цеха, добиться финансирования работ по проектированию и выполнению реконструкции ТПО ПК, выполнить эти работы. На реализацию этих мероприятий понадобился бы не один год.

При оценке вибрации по нормам [4] следовало продолжить работу цеха без временных и режимных ограничений с условием проведения периодических контрольных измерений вибрации ТПО (1–2 раза в год).

В целях проверки обоснованности применения норм [1] и [4] на обследованном объекте для участка трубопровода, где была зафиксирована максимальная вибрация (рис. 5), с использованием конечно-элементной модели этого участка (рис. 6), была выполнена оценка снижения ресурса по СТО Газпром 2–2.3–328–2009 [10] при уровнях вибрации по нормам [1] и [4].

Расчеты выполнялись при следующих исходных условиях: труба 325 × 12 мм, частота 1-й формы колебаний – 44 Гц, рабочее давление – 4,4 МПа, число пусков и

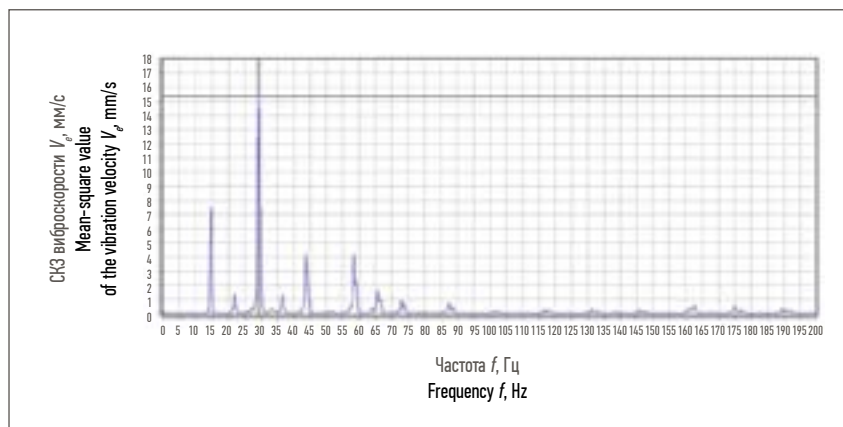


Рис. 3. Спектр виброскорости в частотном диапазоне 4–200 Гц,  $V_e = 18,6$  мм/с  
Fig. 3. Spectrum of vibration velocity in the frequency range 4–200 Hz,  $V_e = 18.6$  mm/s

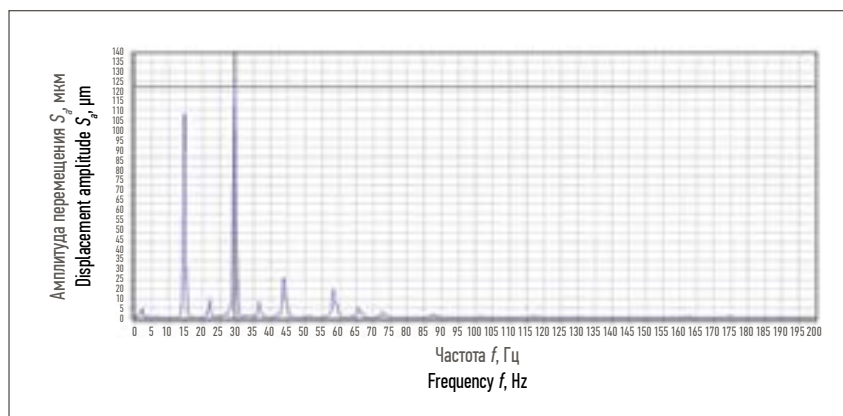


Рис. 4. Спектр амплитуд виброперемещения,  $S_a = 122$  мкм на частоте 30 Гц  
Fig. 4. Spectrum of the vibration displacement amplitudes,  $S_a = 122$  μm at frequency of 30 Hz

остановок – 10 в год. Результаты этой оценки приведены в табл. 2 (здесь: верхний уровень по [1]  $V_e = 18$  мм/с пересчитан на амплитуду виброперемещения  $S_a$  на частоте 44 Гц в предположении вибрации только на этой частоте).

Из анализа результатов расчетов, приведенных в табл. 2, следует, что при вибрации, соответствующей верхнему уровню по нормам СТО [1], остаточный ресурс уменьшается незначительно (приблизительно так же, как и при уровне 2 по ГОСТ 32388–2013 [4]), и это уменьшение не требует немедленной остановки оборудования и реконструкции ТПО. При вибрации, соответствующей более низким уровням, остаточный ресурс практически не изменяется, и оценка вибрации по [1] теряет смысл.

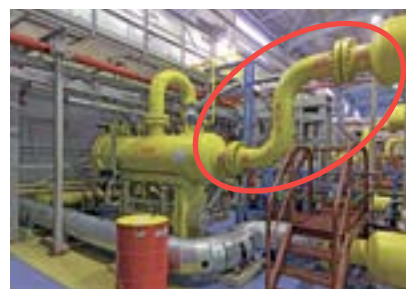


Рис. 5. Участок с максимальной вибрацией  
Fig. 5. A zone with maximum vibration

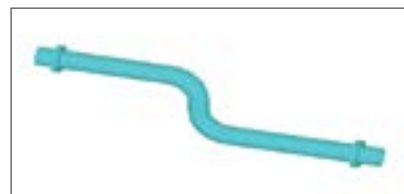


Рис. 6. Конечно-элементная модель участка ТПО  
Fig. 6. Finite element model of the connection piping section

Таблица 2. Оценка снижения ресурса из-за динамических напряжений по [10]  
Table 2. Estimation of resource loss due to the dynamic stresses according to [10]

Уровень по [10] Level according to [10]	Амплитуда виброперемещения на частоте 44 Гц $S_a$ , мкм Amplitude of vibration displacement at a frequency of 44 Hz $S_a$ , $\mu\text{m}$	Динамическое напряжение $P_a$ , МПа Dynamic stress $P_a$ , MPa	Снижение ресурса по [10] Decreasing the resource according to [10]
2	80	1,9	<5 %
3	140	3,3	На 20 % By 20 %
4	340	8	В 5 раз 5 times
Верхний уровень по [1] High level according to [1]	92	2,2	6 %

Нормы ГОСТ 32388–2013 [4] более адекватно отражают техническое состояние трубопроводов и принимаемые в соответствии с ним организационно-технические решения. Так, при превышении

уровня 4 ресурс снижается более чем в пять раз, чем и обосновывается необходимость остановки обследованного оборудования. При значении вибрации между уровнями 2 и 3, что было зафик-

сировано при рассматриваемых измерениях, снижение ресурса не достигает 20 %, что позволяет работать ПК без временных и режимных ограничений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный выше анализ рассмотренной проблемы нормирования вибрации ТПО ПК неоднократно докладывался на отраслевых совещаниях и научно-технических семинарах. Считаем, что на основе ГОСТ 32388–2013 [4] может быть разработан отраслевой нормативный документ по вибрации ТПО ПК предприятий газовой промышленности (линейных и дожимных КС, КС ПХГ). Этот документ должен разрабатываться с учетом особенностей конфигурации ТПО, режимных условий работы КС, сложившейся практики проведения диагностических работ в отрасли. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

- СТО Газпром 2-2.3-084–2006. Методика проведения базового диагностического обследования надземных технологических трубопроводов подземных хранилищ газа ОАО «Газпром». М.: ОАО «Газпром», 2007. 40 с.
- 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. 58 с.
- Нормы вибрации трубопроводов технологического газа компрессорных станций с центробежными нагнетателями [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (дата обращения: 02.08.2018).
- ГОСТ 32388–2013. Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200110068> (дата обращения: 02.08.2018).
- РТМ 26-12-11-76. Компрессоры поршневые оппозитные мощностью свыше 250 кВт. Метод расчета колебаний давления газа и вибрации коммуникаций [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/471835568> (дата обращения: 02.08.2018).
- Соколинский Л.И. Оценка вибрационного состояния технологических трубопроводов поршневых компрессоров // Газовая промышленность. 2015. № 3. С. 98–100.
- Ангалева А.М., Соколинский Л.И., Лопатин А.С. Исследования вибрации и пульсации газа в системах «центробежный нагнетатель – трубопровод» // Труды РГУНГ им. И.М. Губкина. 2009. № 4. С. 74–85.
- Соколинский Л.И., Засецкий В.Г., Вишняков В.А. и др. Возбуждение автоколебаний в потоке газа в неоднородностях трубопроводных линий КС МГ // Сборник трудов «Международная конференция «Энергодиагностика и Condition Monitoring». М., 1999. Т. 2. Ч. 1. С. 81–92.
- Соколинский Л.И., Забродин Ю.В., Шайхутдинов А.З. и др. Исследование низкочастотной вибрации трубопроводов КС // Газовая промышленность. 1997. № 3. С. 20–23.
- СТО Газпром 2-2.3-328–2009. Оценка технического состояния и срока безопасной эксплуатации технологических трубопроводов компрессорных станций. М.: ОАО «Газпром», 2009. 54 с.

#### REFERENCES

- Company Standard STO Gazprom 2-2.3-084–2006. Methodology for Carrying out a Basic Diagnostic Survey of the Aboveground Technological Pipelines of Gazprom's Underground Gas Storage Facilities. Moscow, Gazprom OJSC, 2007, 40 p. (In Russian)
- Company Standard STO Gazprom 2-2.3-324–2009. Diagnostic Vibration Monitoring of Technological Pipelines of Compressor Shops with Centrifugal Compressors. Norms of Assessment and Methods of Work. Moscow, Gazprom OJSC, 2009, 58 p. (In Russian)
- Norms of Vibration of Process Gas Pipelines of Compressor Stations with Centrifugal Compressors [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200003197> (access date: 02.08.2018). (In Russian)
- State Standard GOST 32388–2013. Technological Pipelines. Norms and Methods for Calculating Strength, Vibration and Seismic Effects [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200110068> (access date: 02.08.2018). (In Russian)
- Technical Guides RTM 26-12-11-76. Reciprocating Compressors with a Capacity of More Than 250 kW. Method for Calculating Gas Pressure Fluctuations and Process Pipeline Vibrations [Electronic source]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/471835568> (access date: 02.08.2018). (In Russian)
- Sokolinsky L.I. Evaluation of the Vibrational State of the Technological Pipelines of Reciprocating Compressors. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2015, No. 3, P. 98–100. (In Russian)
- Angalev A.M., Sokolinsky L.I., Lopatin A.S. Study of Gas Vibration and Pulsation in the "Centrifugal Compressor – Pipeline" Systems. Trudy RGNU im. I.M. Gubkina = Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2009, No. 4, P. 74–85. (In Russian)
- Sokolinsky L.I., Zasetzky V.G., Vishnyakov V.A., et al. Excitation of Self-Oscillations in the Gas Flow in the Inhomogeneities of the Pipeline Lines of the Compressor Stations of Main Gas Pipelines. Proceedings of the International Conference "Energy Diagnostics and Condition Monitoring". Moscow, 1999, Vol. 2, Part 1, P. 81–92. (In Russian)
- Sokolinsky L.I., Zabrodin Yu.V., Shaykhutdinov A.Z., et al. Investigation of Low-Frequency Vibration of Pipelines of the Compressor Station. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 1997, No. 3, P. 20–23. (In Russian)
- Company Standard STO Gazprom 2-2.3-328–2009. Assessment of the Technical Condition and the Period of Safe Operation of Process Pipelines of Compressor Stations. Moscow, Gazprom OJSC, 2009, 54 p. (In Russian)