

УДК 622.691.486.05

**А.М. Короленок**, д.т.н., профессор, декан факультета «Проектирование сооружений и эксплуатация систем трубопроводного транспорта», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия), e-mail: korolynok.a@gubkin.ru;  
**Ф.Г. Тухбатуллин**, д.т.н., профессор кафедры «Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия); **Ю.В. Колотилов**, д.т.н., профессор кафедры «Нефтепродуктообеспечение и газоснабжение», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия)

## Обеспечение промышленной безопасности компрессорных станций путем диагностики негерметичности запорной арматуры

Методы, с помощью которых в настоящее время проводится контроль утечек природного газа (метана) на газотранспортных объектах, подразделяются на контактные и дистанционные (лазерные и инфракрасные детекторы метана; приборы бортового базирования, осуществляющие поиск утечек метана с воздуха на большом расстоянии; стационарная автоматизированная лазерная система постоянного мониторинга утечек метана на территориях компрессорных станций), с которыми также сочетаются специфические методы – органолептический, акустический, биоиндикационный, прогнозно-расчетный. Описан метод определения утечек газа в запорной арматуре по регистрации виброакустического сигнала. Длительная эксплуатация запорной арматуры приводит к постепенному износу элементов уплотнения шара и, как результат, к негерметичности крана. Вследствие этого образуются перетечки газа, снижающие эффективность работы нагнетателей, или происходит сброс газа в атмосферу, приводящий к загрязнению окружающей среды. Показано, что без выявления и устранения негерметичности запорной арматуры не может быть решена основная задача – повышение эффективности транспорта газа, поэтому необходимо создать систему диагностики запорной арматуры, определяющую наличие протечек газа и их количественную оценку. Разработана методика измерения величины расхода утечки газа в кране при потере им герметичности с помощью регистрации виброакустического сигнала, так как запорная арматура является одним из основных источников производственного шума.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, газоперекачивающий агрегат (ГПА), компрессорная станция (КС), магистральный газопровод, виброакустический сигнал, диагностика запорной арматуры, вибродиагностика.

.....

*A.M. Korolenok, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of Pipeline Transport Systems Designing, Construction and Operation Department, e-mail: korolynok.a@gubkin.ru;*  
*F.G. Tukhbatullin, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), Doctor of Science (Engineering), Professor of Oil Products and Gas Supply Department; Yu.V. Kolotilov, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), Doctor of Science (Engineering), Professor of Oil Products and Gas Supply Department*

## Provision of industrial safety for compressor plants by means of stop valves leakage diagnostics

The methods used to support natural gas (methane) leakage monitoring that is currently performed at the gas transport facilities are subdivided into contact and remote (laser and infrared methane detectors; aerial devices searching methane leakages at the aerial height from the large distances; the stationary automated methane leakage continuous monitoring laser system in the compressor plants territories) that are combined with such special methods as organoleptic, acoustic, bioindication, predictive-calculation are. A method of gas leak detection in stop valves by vibroacoustic signal recording is described. Continuous operation of stop valves causes wear of ball sealing elements and resulting valve leakage. Therefore there are gas leakages reducing the blowers' operational efficiency, or there is gas discharge to the atmosphere causing environmental pollution. It is determined that the main task – gas transport efficiency improvement – cannot be solved without detection and elimination of stop valves leakages, therefore it is necessary to establish stop valves

**diagnostic system detecting gas leakages and their quantitative assessment. A valve gas leakage flow rate measuring method in case of loss of its tightness using vibroacoustic signal recording is developed, as stop valves are one of the main sources of industrial noise.**

**Keywords:** industrial safety, gas-compressor unit (GCU), compressor plant (CP), gas-main pipeline, vibroacoustic signal, stop valves diagnostics, vibration diagnostics.

В настоящее время в связи с высокими темпами развития газовой промышленности и ростом удельного веса природного газа, реализуемого на мировом и внутреннем российских рынках, наиболее актуальным является снижение удельных потерь метана как доминирующего компонента природного газа на газотранспортных объектах [1–3]. Основная доля в платежах за выбросы загрязняющих веществ приходится на метан, который относится к IV классу опасности [4–6]. Эти факторы определяют необходимость создания постоянно обновляемой надежной производственной системы учета и контроля потерь природного газа, в том числе с утечками метана, от технологического оборудования на объектах транспорта газа – компрессорных станциях (КС) и линейной части магистральных газопроводов.

Среди различных источников утечек газа существенную роль играет негерметичность затвора запорной арматуры. Краны становятся негерметичными в процессе их эксплуатации и воздействия механических примесей, перемещающихся с транспортируемым газом. На линейных кранах, например, недопустимы нарушение или сбой конечного положения затвора на открытие, так как уплотнение седел затворов кранов, которые недооткрыты или перекрыты, будет нарушено при первом же пропуске очистного устройства.

При подаче газа на недозакрытый или перезакрытый кран возникает дросселирование, что приводит к эрозионному износу седел затвора.

Перечень типовых технологических уз-

лов и оборудования газотранспортных объектов, исследуемых для определения возможных мест утечек метана, включает в себя обвязку нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА) – газопроводы, запорную арматуру и свечи агрегатные [7].

Борьба с утечками (набивка в затвор уплотнительных паст или замена арматуры) может быть эффективна только при количественной оценке потерь газа.

Количественные потери газа можно оценить с помощью методики измерения величины расхода утечки газа в кране при потере им герметичности путем регистрации vibроакустического сигнала. Известно, что запорная арматура является одним из основных источников производственного шума. Шумы кранов часто превышают допустимые санитарные нормы и могут достигать 150 дБ. Особенно сильным источником шума являются краны, имеющие выход на свечу, при истечении газа из газопровода в атмосферу. Создаваемые внутри запорной арматуры шумы несколько ослабляются при прохождении через стенки газопровода.

Турбулентный режим потока газа, особенно на кранах высокого давления, создает звуковые сигналы в диапазоне частот 500–10 000 Гц и ультразвуковые сигналы в диапазоне частот от 10 до 100 кГц.

Величина частотного диапазона обратно пропорциональна размеру щели, и поэтому микроутечки обуславливают диапазон турбулизованной струи, а обычные утечки – звуковой. Обследование запорной арматуры показало,

что утечки, представляющие реальную потерю газа, создают турбулизацию струи в частотном диапазоне до 10 кГц. Ультразвуковой диапазон частот может быть использован для диагностирования запорной арматуры на ранней стадии возникновения дефекта прокладки. Количественная оценка перетечек газа для измерения vibроакустического сигнала реализуется импульсным прецизионным шумомером-виброметром модели 2209, датчиком вибрации 4370 и измерительным магнитофоном модели 7005 (фирма Bruel&Kjaer, Дания). Спектральный анализ vibроакустического сигнала может выполняться с применением узкополосного анализатора модели 2034 той же фирмы. Анализирующая аппаратура позволяет получить любую характеристику vibроакустического сигнала: автоспектр, спектральную плотность мощности, мощность в заданной полосе частот, автокорреляционную функцию, функцию взаимной корреляции.

Полученные зависимости уровня и частоты акустического сигнала от величины расхода перетечки газа позволили установить, что пиковая частота турбулизованной струи пропорциональна скорости истечения и обратно пропорциональна размеру щели крана или диаметру свечи. Уровень шума свечи пропорционален площади и восьмой степени скорости истечения, а уровень шума крана – кубу перепада давления (шестой степени скорости истечения) и площади щели крана.

Экспериментальные исследования по обнаружению перетечки кранов обвязки нагнетателей позволили установить,

Ссылка для цитирования (for references):

Короленок А.М., Тухбатуллин Ф.Г., Колотилов Ю.В. Обеспечение промышленной безопасности компрессорных станций путем диагностики негерметичности запорной арматуры // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2015. – № 5. – С. 68–71.

Korolenok A.M., Tukhatullin F.G., Kolotilov Yu.V. Obespechenie promyshlennoj bezopasnosti kompressornyh stancij putem diagnostiki negermetichnosti zapornoj armatury [Provision of industrial safety for compressor plants by means of stop valves leakage diagnostics]. *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 5. P. 68–71.

что при большом перепаде давления на уплотнении, когда выполняется условие [8]

$$(p_{\text{вх}} - \Delta p) / p_{\text{вх}} \leq [2 / (k+1)] k / (k-1), \quad (1)$$

где  $p_{\text{вх}}$  – давление перед краном,  $\Delta P$  – перепад давления на кране,  $k$  – показатель политропы, выражение для пиковой частоты шума  $f_n$  имеет вид:

$$f_n = \alpha_1 \cdot z \cdot S_h \cdot R \cdot p^{1/2} \cdot T_{\text{вх}}^{-1/2} / (\alpha_2 \cdot d), \quad (2)$$

где  $\alpha_1 = 0,36$  – коэффициент, зависящий от пропускной способности;  $\alpha_2 = 1,63$  – коэффициент, зависящий от гидравлического сопротивления;  $0,2 \leq S_h \leq 1,3$  – число Струхала;  $T_{\text{вх}}$  – абсолютная температура газа на входе крана;  $z$  – коэффициент сжимаемости газа;  $R$  – газовая постоянная;  $p$  – плотность газа при нормальных условиях;  $d$  – диаметр свечи или размер щели крана.

Для крана учитывается снижение уровня шума стенками газопровода. Шум, возникающий в кране, распространяется вниз и вверх по течению и заставляет колебаться стенки газопровода, которые возбуждают шум в окружающей атмосфере. Из-за звукопоглощения от стенок газопровода возбуждаемый в атмосфере шум по своему уровню значительно меньше возникающего внутри крана. Величина снижения уровня шума крана стенками газопровода зависит от жесткости стенки и ее массы, размера и типа крана, расхода перетечки.

При определении величины снижения шума крана при частоте турбулизованной струи меньшей, чем кольцевая частота газопровода, снижение уровня шума контролируется жесткостью стенки газопровода. Если же определяют величину снижения шума при частоте большей, чем кольцевая частота, то принимают во внимание, что в этом диапазоне частот снижение шума подчиняется закону массы.

Кольцевая частота  $f_k$  – это частота, при которой длина продольной волны звука, проходящего через материал стенки

газопровода, равна внутреннему периметру газопровода. Здесь находится максимальная плотность собственных частот трубной оболочки

$$f_k = c / (\pi \cdot D), \quad (3)$$

где  $c = 5170$  м/с – продольная скорость звука в материале газопровода;  $D$  – наружный диаметр трубопровода.

Тогда снижение уровня шума  $\Delta L$  имеет вид:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg(\delta / D) + 48, f_n \leq f_k, \quad (4)$$

$$\Delta L = 17 \cdot \lg(p_{\text{тр}} \cdot \delta \cdot f_n) - 38, f_n > f_k, \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина стенки газопровода;  $p_{\text{тр}}$  – плотность материала трубы.

Измеряемый уровень шума  $W$ , протекающего через свечу газа, и скорость истечения газа  $V$  из свечи связаны соотношением [9]

$$W = K \cdot \rho_c^2 \cdot V^3 \cdot d / (\rho_o \cdot c_o), \quad (6)$$

где  $0,3 \cdot 10^{-4} \leq K \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент пропорциональности;  $\rho_c$  – плотность газа в струе;  $\rho_o$  – плотность окружающей среды;  $c_o$  – скорость распространения звука в окружающей среде.

Для турбулентных струй газа характерно наличие различного рода внутренних источников возмущений, вызывающих температурные, акустические и турбулентные пульсации в потоке. Это приводит к увеличению интенсивности акустического излучения струи, поэтому в этом случае используется большее значение коэффициента пропорциональности в формуле (6). В общем случае для каждого типа крана или свечи проводятся испытания по определению коэффициента пропорциональности. Уровень суммарного шума в точке звукового поля, расположенного на расстоянии  $g$  от отверстия свечи под углом  $\theta$  к оси струи, можно определить из соотношения

$$\Sigma W = 10 \cdot \lg W + 10 \cdot \lg F - 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot r^2) + 120, \quad (7)$$

где  $F = f(\theta)$  – фактор направленности струи.

Таким образом, уровень шума свечи ( $W$ ) определяется в зависимости от угла установки и расстояния шумомера (точки измерения) от отверстия свечи, а объем (массовый расход газа) – в зависимости от скорости истечения, определяемой из выражения (6) и площади свечи.

Исходная величина уровня шума, создаваемая внутри той или иной конструкции крана, может быть обнаружена аналогичным способом. Суммируются величина уровня шума, замеренного шумомером на каком-то определенном фиксированном расстоянии, величина снижения уровня шума крана стенками газопровода из выражений (4)–(5) и величина снижения уровня шума на расстоянии и под углом от крана до точки измерения из выражения (7).

При определении перетечки в запорной арматуре применение одного шумомера не всегда дает желаемый результат [10, 11], так как прием акустических колебаний в звуковом диапазоне частот может быть перекрыт производственным шумом, генерируемым рабочей средой. Кроме того, измерительной средой является газопровод, излучающий акустические колебания во внешнюю среду, среди которых присутствуют собственные частоты трубы. В этом случае используются двухканальный анализатор и два вибродатчика. Один вибродатчик устанавливается на кране, а другой – на трубе на расстоянии, превышающем три диаметра от крана вниз или вверх по потоку. Вибродатчики устанавливаются на магните. В особых случаях можно предусмотреть применение специального компаунда (смола). Анализатор спектра позволяет получить разность двух сигналов в любом диапазоне частот. Если разность уровней сигналов положительна, то кран течет.

Литература:

1. СТО Газпром 027-2006. Типовая программа оценки эмиссии природного газа на объектах ОАО «Газпром». – М.: ИРЦ «Газпром», 2006. – 45 с.
2. СТО Газпром 031-2007. Методика проведения измерений объемов эмиссии метана в атмосферу на объектах ОАО «Газпром». – М.: ИРЦ «Газпром», 2007. – 61 с.

3. Байков И.Р., Китаев С.В., Шаммазов И.А. Методы повышения энергетической эффективности трубопроводного транспорта природного газа. – СПб.: Недра, 2008. – 439 с.
4. СТО Газпром 2-1.19-214-2008. Охрана окружающей среды на предприятиях ОАО «Газпром». Производственный экологический контроль и мониторинг. Термины и определения. – М.: ИРЦ «Газпром», 2008. – 36 с.
5. СТО Газпром 2-1.19-275-2008. Охрана окружающей среды на предприятиях ОАО «Газпром». Производственный экологический контроль. Общие требования. – М.: ИРЦ «Газпром», 2009. – 57 с.
6. СТО Газпром 2-1.19-415-2010. Охрана окружающей среды на предприятиях ОАО «Газпром». Экологический мониторинг. Общие требования. – М.: Газпром экспо, 2010. – 59 с.
7. Аكوпова Г.С., Дорохова Е.В., Попов П.Б. Оценка объемов потерь метана с утечками от технологического оборудования газотранспортных объектов ОАО «Газпром» // Вести газовой науки: Научно-технический сборник. – 2013. – № 2 (13). – С. 63–67.
8. Юренев В.Н., Лебедев П.Д. Теплотехнический справочник. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
9. Муниин А.Г., Самохин В.Ф., Шипов Р.А. и др. Авиационная акустика. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 238 с.
10. Прутужалов А.Д., Капитонов Н.Л., Воронцов А.В. и др. Контроль утечек в трубопроводной арматуре в процессе эксплуатации // Технологии нефти и газа. – 2012. – № 3. – С. 50–53.
11. Зайцев Н.Л., Суханов В.И. Совершенствование методики вибродиагностического контроля трубопроводных обвязок оборудования магистральных газопроводов // Вестник Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). – (Металлургия). – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 89–92.

## References:

1. *STO Gazprom 027-2006. Tipovaja programma ocenki jemissii prirodnoho gaza na ob'ektah ОАО «Gazprom»* [The standard program of natural gas emission assessment at the facilities of Gazprom JSC]. Moscow, Information and Advertising Centre «Gazprom», 2006. 45 pp.
2. *STO Gazprom 031-2007. Metodika provedenija izmerenij ob'emov jemissii metana v atmosferu na ob'ektah ОАО «Gazprom»* [The method for measuring the methane emission to the atmosphere at the facilities of Gazprom JSC]. Moscow, Information and Advertising Centre «Gazprom», 2007. 61 pp.
3. Baykov I.R., Kitaev S.V., Shammazov I.A. *Metody povyshenija jenergeticheskoy jeffektivnosti truboprovodnogo transporta prirodnoho gaza* [Methods to improve the natural gas pipeline transport energetic efficiency]. Saint-Peterburg, Nedra Publ., 2008. 439 pp.
4. *STO Gazprom 2-1.19-214-2008. Ohrana okruzhajushhej srede na predpriyatijah ОАО «Gazprom». Proizvodstvennyj jekologicheskij kontrol' i monitoring. Terminy i opredelenija* [Environmental protection at the enterprises of Gazprom JSC. Industrial environmental control and monitoring. Terms and definitions]. Moscow, Information and Advertising Centre «Gazprom», 2008. 36 pp.
5. *STO Gazprom 2-1.19-275-2008. Ohrana okruzhajushhej srede na predpriyatijah ОАО «Gazprom». Proizvodstvennyj jekologicheskij kontrol'. Obshhie trebovanija* [Environmental protection at the enterprises of Gazprom JSC. Industrial environmental control. General requirements]. Moscow, Information and Advertising Centre «Gazprom», 2009. 57 pp.
6. *STO Gazprom 2-1.19-415-2010. Ohrana okruzhajushhej srede na predpriyatijah ОАО «Gazprom». Jekologicheskij monitoring. Obshhie trebovanija* [Environmental protection at the enterprises of Gazprom JSC. Environmental monitoring. General requirements]. Moscow, Gazprom expo, 2010. 59 pp.
7. Akopova G.S., Dorokhova Ye.V., Popov P. B. *Ocenka ob'emov poter' metana s utechkami ot tehnologicheskogo oborudovanija gazotransportnyh ob'ektov ОАО «Gazprom»* [Assessment of methane losses with leakages from the processing equipment of the gas transport facilities of Gazprom JSC]. *Vesti gazovoj nauki* [News of Gas Industry]: Scientific and Technical Collection, 2013, No. 2 (13). P. 63–67.
8. Yurenev V.N., Lebedev P.D. *Teplotehnicheskij spravochnik* [Heat Engineering Reference Book]. Moscow, Energiya, 1976, Vol. 2. 896 pp.
9. Munin A.G., Samokhin V.F., Shipov R.A. et al. *Aviacionnaja akustika* [Aviation Acoustics]. Moscow, Mashinostroenie, 1986, Vol. 1. 238 pp.
10. Prituzhalov A.D., Kapitonov N.L., Vorontsov A.V. et al. *Kontrol' utechek v truboprovodnoj armature v processe jekspluatacii* [Leakage monitoring of piping valves in operation]. *Tehnologii nefi i gaza = Oil and Gas Technologies*, 2012, No. 3. P. 50–53.
11. Zaytsev N.L., Sukhanov V.I. *Sovershenstvovanie metodiki vibrodjagnosticheskogo kontrolja truboprovodnyh obvjazok oborudovanija magistral'nyh gazoprovodov* [Improvement of gas-main pipelines equipment piping vibration diagnostic method]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta (JuUrGU) = The Vestnik of the South Ural State University (SUSU)*, Metallurgija [Metallurgy], 2014, Vol. 14, No. 1. P. 89–92.



## Группа Компаний «ФИАС»

Более 10 лет на Российском рынке

- прямые поставки промышленного оборудования
- электродвигатели и средства автоматизации WEG
- профессиональные переводы на иностранные языки

info@fiasamur.ru  
motor@fiasamur.ru  
translate@fiasamur.ru



официальный  
дистрибьютор  
на Дальнем Востоке  
[www.weg.net](http://www.weg.net)

☎ **+7 (4217) 55-37-25**  
✉ **info@fiasamur.ru**

**5%** скидка за  
фото макета

**[www.fiasamur.ru](http://www.fiasamur.ru)**