

ТРУБОПРОВОД / ОБОРУДОВАНИЕ

В статье рассмотрена технология осушки полости газопроводов, а также состав оборудования вакуумно-азотного комплекса для осушки полости газопроводов после проведения гидравлических испытаний на прочность и проверки их на герметичность.

Методология осушки, описанная в данной статье, заключается в том, что в процессе осушки устанавливают баланс между количеством испарившейся влаги и влаги, откачиваемой из полости газопровода, а при отклонении параметров осушки от заданных допусков регулируют производительность откачных вакуумных агрегатов и доосушку одновременно с вакуумированием осуществляют продувкой азотом вплоть до заданной (проектной) величины влажности.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОСУШКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ

В.Г. ДУБИНСКИЙ
Д.А. КУДРЯВЦЕВ

зам. главного инженера ИТЦ по ИТ ДАО «Оргэнергогаз»
ведущий инженер ИТЦ по ИТ ДАО «Оргэнергогаз»

г. Москва

Повышенные требования, устанавливаемые проектами к качеству осушки строящихся магистральных газопроводов, прокладываемых в районах Крайнего Севера, и морских газопроводов большой протяженности, потребовали в сжатые сроки разработать новые методы и технологии, а также создать новое наукоемкое оборудование для обеспечения осушки полости газопроводов до температуры точки росы минус 40°C и ниже.

Особенности технологического процесса осушки линейных участков магистральных газопроводов большой протяженности, проложенных в различных природно-климатических условиях, заключаются в следующем [1], [2]:

- испытания и осушку полости участка осуществляют по всей его протяженности;
- производительность установок, используемых для осушки, зависит не только от пропускной способности участка, но и от его аккумулирующей способности;
- после испытаний и удаления воды в полости участка содержится влажная среда с температурой точки росы, равной температуре грунта, и для достижения заданной проектной глубины осушки требуется применять специальные технологии, позволяющие осуществлять фазовые переходы значительных объемов влаги и ее

эвакуацию из полости испытываемого участка газопровода;

- остаточная концентрация воздуха в смеси с природным газом, подаваемым в полость газопровода, после осушки должна быть не выше нижнего предела взрываемости (<5%).

С целью практической реализации поставленных ОАО «Газпром» задач по повышению качества осушки строящихся магистральных газопроводов ДАО «Оргэнергогаз» спроектирован, изготовлен и эксплуатируется вакуумно-азотный комплекс оборудования для осушки КС и линейной части МГ (далее ВАК).

В технологии, реализуемой ВАК, удаление воды, осушку и консервацию трубопроводов производят соответственно продувкой воздухом, вакуумированием полости трубопроводов и их заполнением газообразным азотом, полученным непосредственно из атмосферного воздуха на объекте производства работ.

ВАК размещается в контейнерах и перемещается на одном автоприцепе по временным вдольтрассовым дорогам без твердого покрытия, при работе не требует укрытия (навеса) и может быть подвержен всевозможным климатическим воздействиям при температуре наружного воздуха от минус 40°C до плюс 40°C.

В комплект поставки ВАК входят три технологических модуля:

- вакуумный модуль в контейнере;
- азотный модуль в контейнере;
- компрессорный модуль в контейнере.

Компактная вакуумная установка изготовлена в блочно-комплектном исполнении, поставляется в полной заводской готовности и предназначена для выполнения работ по осушке трубопроводов после гидроиспытаний. Вакуумная установка состоит из группы последовательно соединенных насосов. На первой ►



Рис. 1 Размещение оборудования ВАК на объекте производства работ

ступени установлен форвакуумный винтовой насос, а на второй ступени – высокооборотный безмасляный роторный насос. Насосы объединены общим всасывающим трубопроводом и общим патрубком для подсоединения установки к вакуумируемому трубопроводам.

Вакуумная установка обеспечивает создание вакуума от атмосферного давления до остаточного давления 0,002 мбар, что соответствует температуре точки росы минус 60 °С.

Технические данные вакуумно-азотного комплекса приведены в таблице 1, общий вид модулей ВАК и их расположение на объекте производства работ показаны на рис. 1.

Технология осушки полости трубопроводов, осуществляемая ВАК, обеспечивает следующие режимы работы (рис. 2):

- продувка сжатым воздухом с целью вытеснения воды после гидротестирования: только компрессорный модуль 1 подключается к объекту осушки 4;
- вакуумирование с целью испарения воды с внутренней поверхности трубопроводов и откачки паров воды: только вакуумный модуль 5 подключается к объекту осушки 4;
- доосушка и заполнение полости инертной средой на основе азота до достижения заданных (проектных) значений температуры точки росы и концентрации кислорода не выше 2% во всем объеме осушаемых трубопроводов: схема предусматривает компримирование атмосферного воздуха в винтовом компрессоре 1, отделение механических примесей и влаги в механических и адсорбционных фильтрах (расположенных в азотном модуле 2), получение азота с температурой точки росы не выше минус 40°С из атмосферного воздуха в азотном модуле 2 и подачу азота в полость объекта осушки 4 при работающем вакуумном модуле 5.

На трубных обвязках КС может быть осуществлен наиболее экономичный режим осушки смешанным потоком атмосферного воздуха и азота с рециркуляцией

осушающей среды в трубопроводах до достижения проектной температуры точки росы. Данный режим осушки предусматривает сжатие атмосферного воздуха винтовым компрессором 1, отделение влаги и получение азота в азотном модуле 2, подачу азота в трубопровод 4 и далее после удаления влаги, рециркуляцию азота в основной поток воздуха (на вход компрессорного модуля). Такой режим осушки позволяет наращивать с каждым последующим циклом рециркуляции концентрацию азота с температурой точки росы не выше минус 40°С и регулировать производительность ВАК по воздушно-азотной смеси, подаваемой в осушаемые трубопроводы и оборудование КС.

Особенности вакуумно-азотной технологии осушки участков магистральных газопроводов заключаются в том, что первоначально вакуумирование полости осуществляют в условиях нестационарного режима, при котором давление и скорость течения откачиваемой среды меняются по длине участка. При этом объем воздуха в полости газопровода превышает объемы влаги, испаряющейся с его внутренней поверхности.

Принятая физическая модель осушки основана на том, что в процессе вакуумирования частицы жидкости из объема переходят на внутреннюю поверхность, испаряются и с объемом воздуха откачиваются из полости трубопровода, а условием баланса соответствует оптимальный режим осушки, при котором объем испарившейся при вакуумировании жидкости равен объему воздуха, откачиваемого из полости газопровода за равные промежутки времени.

Для определения объема влаги, содержащейся в полости участка газопровода, уравнение для полного термодинамического потенциала состояния системы «жидкость – пар» представили в виде:

$$\Phi = N_1\varphi_1 + N_2\varphi_2 + 4\pi R^2\sigma, \quad (1)$$

где:

- N_1 – количество частиц влаги в паровой фазе;
- N_2 – количество частиц в жидкой фазе;
- φ_1 – термодинамический потенциал паровой фазы при температуре T и давлении P в полости газопровода;
- φ_2 – термодинамический потенциал жидкой фазы;
- $4\pi R^2\sigma$ – энергия жидкости, содержащейся в виде пленки на внутренней поверхности труб газопровода после удаления воды;
- σ – сила поверхностного натяжения;
- R – внутренний радиус труб.

Для условия равновесия выражение 1 представили в виде:

$$\varphi_2 - \varphi_1 + 4\pi\sigma \frac{dR^2}{dN_2} = 0, \quad (2)$$

выразив количество частиц в жидкой фазе N_2 через объем молекул воды V_2

$$\left(N_2 = \frac{4\pi R^2}{3V_2} \right)$$

и учитывая соотношения

$$d\varphi_1 = V_1 dH \quad \text{и} \quad d\varphi_2 = V_2 dH$$

После дифференцирования выражения 2 получили уравнение для определения скорости испарения воды в зависимости от изменения упругости паров воды H в участке газопровода в виде:

$$(V_1 - V_2)dH = 2\sigma V_2 d\left(\frac{1}{R}\right) \quad (3)$$

Проинтегрировав уравнение 3, получили выражение для определения количества влаги, содержащейся в полости газопровода перед началом осушки, в виде формулы:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = AT_{mp}L(\ln H_1 - \ln H_3) \frac{1}{\rho} = 1,244 AT_{mp}L(\ln H_1 - \ln H_3), \quad (4)$$

где:

- A – коэффициент, зависящий от диаметра труб, толщины пленки жидкости на внутренней поверхности труб и силы поверхностного натяжения;
- T_{mp} – абсолютная температура в газопроводе;
- L – протяженность газопровода;
- H_1 – упругость паров воды перед началом осушки;
- H_3 – упругость паров воды, соответствующая заданной (проектной) температуре точки росы;
- ρ – плотность паров воды при нормальных условиях (0,8 кг/м³).

Формулу для определения суммарного количества влаги, которую необходимо удалить из полости газопровода для достижения заданных проектных значений влажности, представили в виде:

$$V_{вл} = 1,244 AT_{mp}L(\ln H_1 - \ln H_3) + V_{mp} 10^{-3} \frac{P_{mp}}{P_0} (d(P_{mp}, T_{mp}) + 1,244[d(P_{нз}, T_{нз}) - d(P_{mp}, T_{mp})]), \quad (5)$$

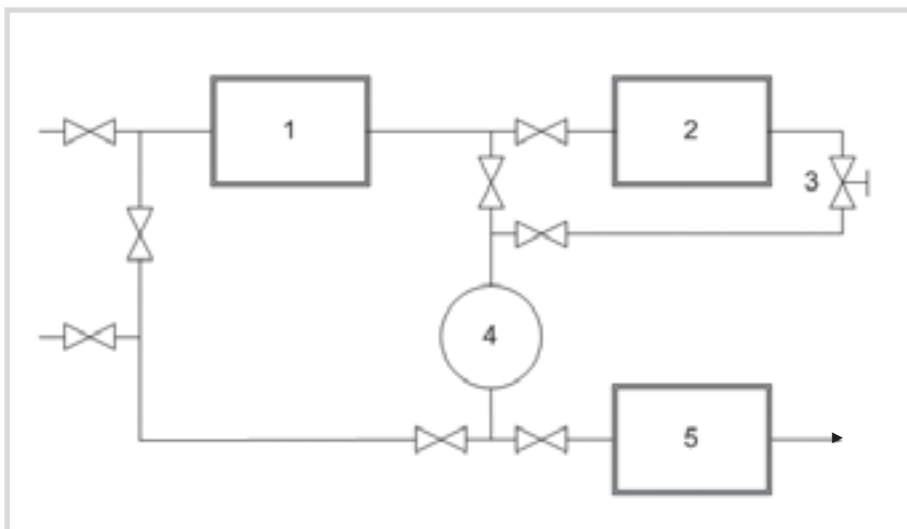


Рис. 2 Блок-схема ВАК
1 – компрессорный модуль; 2 – азотный модуль; 3 – регулятор расхода;
4 – объект осушки; 5 – вакуумный модуль

ТРУБОПРОВОД / ОБОРУДОВАНИЕ

где:

V_{mp} – геометрический объем полости газопровода;
 $d(P_{mp}, T_{mp})$ – начальное влагосодержание воздуха при измеренных давлении (P_{mp}) и температуре (T_{mp}) в полости газопровода;
 $d(P_{нз}, T_{нз})$ – влагосодержание воздуха при измеренных на нагнетании компрессора давлении ($P_{нз}$) и температуре ($T_{нз}$);
 P_0 – давление, приведенное к нормальным условиям.

Формулу для определения максимальной производительности откачных вакуумных агрегатов представили в виде:

$$q_{max} = 4,1 \times 10^6 \frac{R^4 \gamma_A P_n (1 - e^{-\alpha \tau_1})^2 K_n}{L \eta} + V_{вп} \frac{dp}{(H_1 - H_3) dt}, \quad (6)$$

где:

γ_A – показатель аккумулирующей способности участка газопровода;
 P_n – давление в начале вакуумирования;
 α – скорость изменения давления в полости газопровода;

τ_1 – продолжительность вакуумирования от начального давления до давления, соответствующего проектному;

η – коэффициент динамической вязкости среды, откачиваемой из полости участка газопровода;

K_n – коэффициент, учитывающий профиль трассы;

$V_{вп}$ – объем влаги в полости участка газопровода;

dp/dt – скорость изменения давления в полости газопровода за время при изменении упругости паров воды от H_1 до H_3 .

Продолжительность вакуумирования τ_1 при постоянной производительности $q = q_{max}$ определили интегрированием выражения

$$\frac{dV}{d\tau_1} = \frac{V_{mp} N}{P} \times \frac{dP}{d\tau_1}$$

и представили в виде формулы:

$$\tau_1 = \frac{V_{mp} N}{q_{max}} \times \ln \frac{H_1}{H_3}, \quad (7)$$

где:

dV – объем откачиваемой из полости газопровода среды за время $d\tau$ при изменении давления на величину dp ;

V_{mp} – геометрический объем газопровода;
 N – кратность обмена среды в объеме газопровода (отношение суммарного количества влаги, которое следует удалить для достижения заданной величины влажности к количеству влаги, откачиваемой из одного объема газопровода);

q – производительность откачных вакуумных агрегатов;

H_1 – упругость паров воды в начале осушки;

H_3 – упругость паров воды, соответствующая заданному значению влажности среды.

При вакуумировании полости газопровода в диапазоне давлений от 0,2 мбар до 0,01 мбар пропускная способность газопровода в зависимости от давления и аккумулирующей способности изменяется по закону, близкому к экспоненциальному. Величина снижения производительности откачных вакуумных агрегатов в зависимости от изменения пропускной и аккумулирующей способности газопровода определяется по формуле:

$$\Delta q = \Delta Q_{r, \sigma} = q_{max} (\tau_1 - \tau_2) - \frac{q_{max}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \tau_1}) \times (e^{-\alpha \tau_2} - e^{-\alpha \tau_1}) \quad (8)$$

С целью повышения эффективности и сокращения времени осушки одновременно с регулированием производительности откачных вакуумных агрегатов в полость газопровода подают азот, полученный из атмосферного воздуха путем его разделения на азот и кислород в полимерных полволоконных мембранах. Температуру точки росы азота, подаваемого в полость газопровода, регулируют таким образом, чтобы после расширения потока азота в вакууме величина температуры точки росы была бы равной заданному проектному значению. Например, при соотношении объема азота на выходе из полимерных полволоконных мембран к объему воздуха, входящему в мембраны, равном 0,5, температура точки

росы азота составит минус 50°C, а при соотношении, равном 0,42, минус 60°C. Причем азотирование полости газопровода осуществляют от начала участка, а откачку среды производят вакуумированием полости от конца участка.

Первоначально весь объем газопровода, находящийся под вакуумом, заполняют азотом. Дальнейшую доосушку осуществляют продувкой азотом и вакуумированием полости газопровода вплоть до заданной (проектной) величины влажности.

Формулу для определения суммарного времени осушки вакуумированием, заполнением азотом и продувкой азотом вплоть до заданной (проектной) влажности в полости газопровода представили в виде:

$$\tau_{\Sigma} = \frac{NV_{mp}}{q_{max}} \times \ln \frac{H_1}{H_3} + \frac{V_{mp}}{q_{N_2}} + \frac{4,1 \times 10^4 D_{mp}^2 LF}{D_{np}^2 \sqrt{T}} \left[\left(\frac{H_2}{H_3} \right)^{0,143} - 1,1 \right], \quad (9)$$

где:

N – кратность обмена среды в объеме газопровода (отношение суммарного количества влаги, которую следует удалить для достижения заданной величины влажности, к количеству влаги, откачиваемой из одного объема газопровода);

V_{mp} – геометрический объем полости газопровода;

q_{N_2} – производительность азотного модуля;

D_{mp} – диаметр труб участка газопровода;

D_{np} – диаметр труб продувочного трубопровода;

H_2 – упругость паров воды в полости участка газопровода в момент начала заполнения азотом;

F – кратность обмена азота в объеме участка газопровода для достижения заданной влажности;

T – абсолютная температура в полости газопровода.

Разработанная технология и оборудование ВАК использовались при осушке завершенных строительством компрессорных станций МГ «СРТО-Торжок» и МГ «Ямал-Европа».

В настоящее время ОАО «Газпром» фактически является обладателем передовых технологий и новых образцов оборудования для выполнения комплекса работ по осушке и консервации азотом трубопроводов и технологического оборудования объектов ЕСГ ОАО «Газпром» с реальной перспективой их эффективного использования в смежных отраслях промышленности как на территории РФ, так и за рубежом. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- «Способ осушки полости трубопровода и устройство для его осуществления». Патент № 2272974, 15.06.2004г.
- «Способ осушки полости подводного участка магистрального газопровода после гидравлических испытаний». Патент: заявка № 2007142057/06 (046049), 15.11.2007г.

	Вакуумный модуль		Азотный модуль	Компрессорный модуль
	1 ступень	2 ступень		
Производительность, м³/час	630	4000	азот 96% - 800 азот 98,2% - 660	1600
Давление на входе	от 1000 мбар	от 22 мбар	1,8 МПа	0,1 МПа
Давление на выходе	до 22 мбар	до 0,002 мбар	1,65 МПа	1,96 МПа
Мощность силовой установки (потребная), кВт	15	7,5	20	315
Масса контейнера, кг	2200		1200	5600
Электрическое питание	400 В, 50 Гц		220 В, 50 Гц	-

Табл. 1 Технические характеристики ВАК