

ОСУШЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА: МЕТОДЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ

УДК 622.691.4

Е.В. Устинов, к.ф.-м.н., ООО «НПО «Газтехномаш» (Жуковский, РФ),
ustinov@npogtm.ru

В статье выполнен сравнительный анализ двух основных способов осушения трубопроводов большого диаметра – путем вакуумирования и с помощью продувки сухим воздухом. Показано, что метод вакуумирования более эффективен при меньших энергоемкости и материальных затратах, а также обладает рядом технологических преимуществ. Во-первых, с его помощью можно удалять влагу при ее локальном скоплении. Во-вторых, при вакуумировании существует четкий количественный критерий отсутствия остатков воды в трубопроводе в конденсированных фазах, а именно достижение значения давления 100 Па (1 мбар). Однако при определенных условиях в холодное время года метод продувки трубопровода теплым воздухом может оказаться более простым и экономичным, чем вакуумирование.

Описано оборудование, используемое для осушения трубопроводов, – двухступенчатые вакуумные установки первого и второго поколения и воздухоудка с приводом вентилятора от газового двигателя. Обозначены пути дальнейшего технического совершенствования его конструкции, повышения надежности и увеличения производительности вакуумных установок во всем диапазоне давлений.

Представлены результаты расчетов времени вакуумирования для осушения трубопровода в зависимости от его объема и количества воды. Показано, что в первую очередь продолжительность процедуры зависит от объема влаги; объем трубопровода сказывается на времени работы в существенно меньшей степени.

Проанализирован опыт практического использования вакуумных установок в различных климатических условиях. Для финального удаления из трубопровода остатков влаги перед его заполнением азотом предложен оригинальный метод продувки под вакуумом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОСУШЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ, ВАКУУМНАЯ УСТАНОВКА, ПРОДУВКА СУХИМ ВОЗДУХОМ.

Низкое содержание влаги – необходимое условие безаварийной эксплуатации трубопроводов. Вода попадает во внутреннюю полость труб, в частности в процессе испытаний после строительства или ремонта. В случае гидравлических тестов она частично остается после слива, в случае пневматических – конденсируется из нагнетаемого в трубопровод воздуха при высоком давлении.

Обычно остатки воды удаляют путем многократной прогонки поршней, однако полностью осушить трубопровод таким образом не удастся. Кроме того, при сложной форме трубопроводов и наличии разветвлений, что характерно для газовых промыслов или обвязок компрессорных цехов,

прогонка поршней невозможна и необходимо применять другие методы осушки.

Для удаления из трубопроводов оставшейся после прогонки поршней влаги, как правило, их продувают осушенным воздухом [1]. Однако в последние 10–15 лет в нашей стране и за рубежом стала постепенно внедряться новая технология: воду удаляют путем вакуумной откачки.

Цель настоящей работы – представить методику оценки рациональности применения того или иного метода осушки трубопроводов для заданных условий и ознакомить заинтересованных специалистов с соответствующим оборудованием и опытом его эксплуатации.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ВАКУУМИРОВАНИЕМ И ПРОДУВКОЙ

При продувке трубопровода скорость уноса воды Q определяется через отношение ее содержания в воздухе, подаваемом в трубопровод и выходящем из него:

$$Q = (\rho_{ex} - \rho_{in}) \cdot S, \quad (1)$$

где ρ_{in} и ρ_{ex} – плотность паров воды во входящем и выходящем воздухе соответственно; S – объемная производительность установки осушенного воздуха. Если значительная часть поверхности трубы влажная, температура выходящего воздуха будет близка к температуре грунта, а влажность – к 100 %

E.V. Ustinov, PhD in physics and mathematics, Gastechnomash (Zhukovsky, the Russian Federation),
ustinov@npogtm.ru

Dewatering of large diameter pipelines: Techniques, equipment, and practical experience

The article presents the comparative analysis of two basic techniques for the dewatering of large diameter pipelines: vacuum treatment and dry air purge. It is shown that the vacuum treatment is more efficient given the lower power consumption and expenses, and has a number of technological advantages. First and foremost, it makes it possible to remove the moisture from the places of its local accumulation. Secondly, the vacuum treatment has a clear quantitative criterion for zero condensed residual water in a pipeline, which is reaching the pressure of 100 Pa (1 mbar). However, under certain conditions of the cold season, purging a pipeline with warm air might be simpler and more cost-effective than vacuum treatment.

The study described some pipeline dewatering equipment: first- and second-generation two-stage vacuum units, as well as the blower with gas-engine driven fan. The paper outlines the ways of further improvement of the structure, reliability, and capacity of the equipment within the entire pressure range.

Calculation results are presented for vacuum treatment time needed to dewater a pipeline based on its volume and the amount of water. It is shown that the treatment time depends on the amount of moisture in the first place, whereas the pipeline volume has significantly less effect.

The study analyses the practical experience of using vacuum units in various climatic conditions. The original technique of vacuum purge is proposed as the final step of removing the residual moisture from the pipeline before filling it with nitrogen.

KEYWORDS: PIPELINE DEWATERING, VACUUM UNIT, DRY AIR PURGE.



(парциальное давление H_2O будет соответствовать давлению ее насыщенного пара при заданной температуре). Поскольку к воздуху для продувки трубопроводов предъявляются жесткие требования (согласно [1] точка росы не должна превышать -20 °C), вычитаемым в скобках формулы (1) можно пренебречь:

$$Q = \rho_{ex} \cdot S. \quad (2)$$

Аналогичное соотношение справедливо для расчета скорости удаления воды путем вакуумирования, когда отсутствует входящий поток воздуха в трубопровод.

Отсюда очевидно, что при одинаковой объемной производительности вакуумной установки и установки по производству осушенного воздуха можно ожидать

близкие результаты в отношении скорости осушения труб. В этой связи при оценке рациональности использования данных методов в первую очередь следует учитывать экономические показатели: стоимость производства единицы объема осушенного воздуха и вакуума (под «производством вакуума» подразумевается извлечение единицы объема паровоздушной смеси из сосуда с низким давлением в атмосферу).

В [2] показано, что вне зависимости от давления в трубопроводе величина механической работы, которую необходимо затратить на извлечение 1 м^3 паровоздушной смеси из вакуумируемого газопровода в атмосферу, существенно меньше (в 10 и более раз) величины работы сжатия такого же количества воздуха до давления

$0,7$ МПа (7 бар) для его осушения. Это обстоятельство – весомый аргумент в пользу вакуумирования по сравнению с традиционным методом осушения трубопроводов продувкой сухим воздухом.

Высокая энергетическая эффективность технологии вакуумирования позволяет создавать производительные компактные установки с низкой мощностью привода. К числу достоинств этого метода следует также отнести простоту и технологичность.

Продувка сухим воздухом эффективна в тех случаях, когда обводненная значительная часть поверхности трубы – достаточная площадь, чтобы воздух выходил из газопровода с близкой к 100 % влажностью. В противном случае плотность паров воды в выдуваемом воздухе уменьшается и согласно (1)

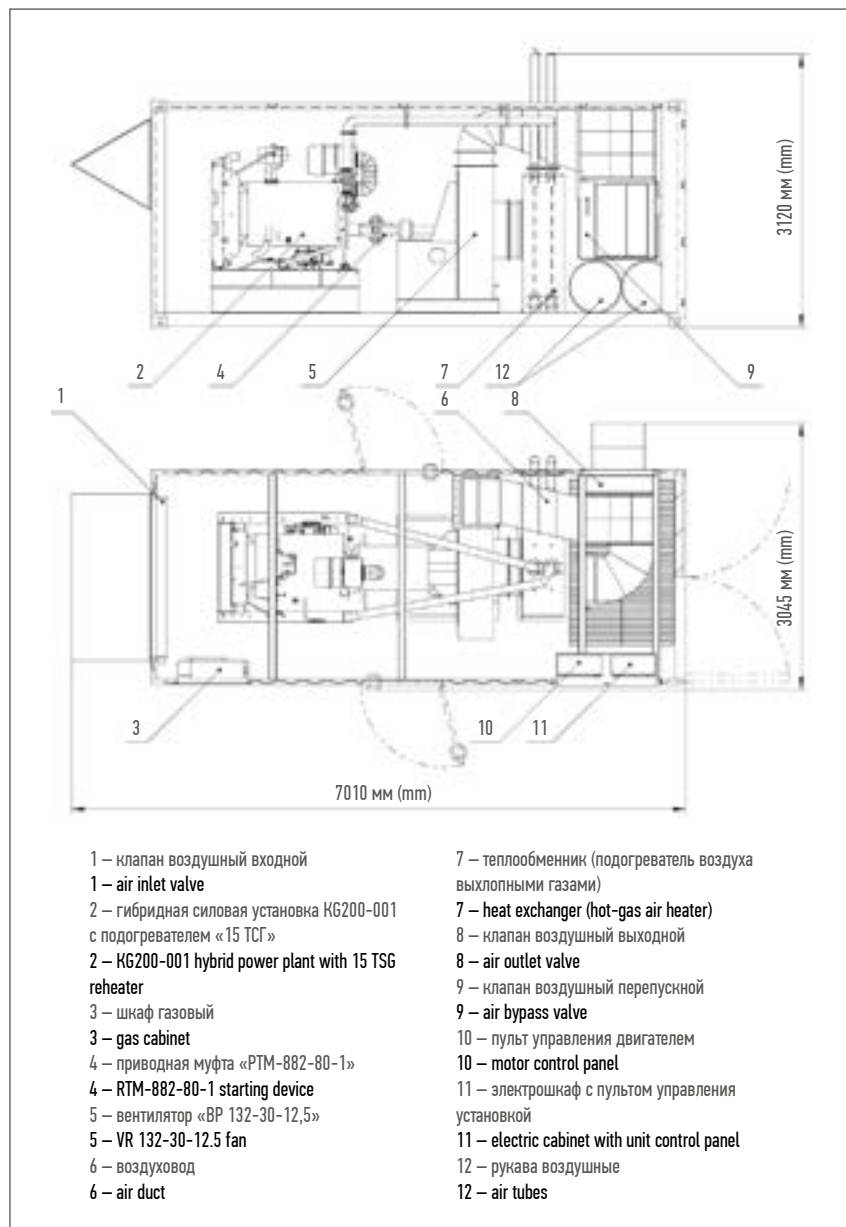


Рис. 1. Устройство воздуходувки
Fig. 1. Blower configuration

падает скорость осушения. Поэтому, используя технологию продувки сухим воздухом, трудно извлечь воду из локальных скоплений – для полного высыхания глубоких «луж» с небольшой площадью поверхности требуется продолжительное время. Согласно [1] снижение точки росы в выдуваемом воздухе не следует рассматривать как надежный критерий завершения работ. Удовлетворительным показателем можно считать низкое значение точки росы выдуваемого воздуха только при возобновле-

нии продувки после длительного перерыва.

В отличие от описанного способа метод вакуумирования позволяет эффективно удалять влагу из мест ее локального скопления, на которых фокусируется вся мощность вакуумной установки после высыхания основной поверхности трубопровода. Для этого необходимо обеспечить подвод тепла к соответствующим участкам, чтобы компенсировать обусловленное испарением воды понижение температуры поверхности.

Обычно подвод тепла несложно реализовать ввиду хорошей теплопроводности грунта и материала труб. Однако в некоторых случаях, например для труб с теплоизоляцией, проложенных по мерзлым грунтам, подача тепла может быть затруднена.

Технология вакуумирования имеет ясный и простой критерий завершения работ – достижение давления в газопроводе 100 Па (1 мбар), при котором вода не может находиться в конденсированной фазе при температуре выше $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Несмотря на перечисленные преимущества вакуумирования, в некоторых случаях рационально проводить осушение трубопроводов путем продувки воздухом. Ранее был отмечен главный недостаток продувки – ресурсоемкость производства больших объемов осушенного воздуха. Однако в зимний период, когда температура воздуха существенно ниже нуля, его влажность понижается достаточно для того, чтобы воздух можно было использовать для продувки после предварительного подогревания в целях предотвращения выхолаживания труб. Действительно, точка росы атмосферного воздуха априори не может быть выше его фактической температуры (эти параметры сравниваются при влажности 100 %). Таким образом, если не строго соблюдать требование [1] в отношении точки росы вдуваемого в трубопровод воздуха ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), согласно формуле (1) можно добиться хорошей скорости осушения и при несколько более высокой плотности паров H_2O в подаваемом воздухе: главное, чтобы плотность была существенно ниже соответствующей величины в выходящем потоке. Другими словами, осушение продувкой рационально проводить в тех случаях, когда точка росы вдуваемого воздуха ниже температуры трубы. Если это условие не соблюдается, влага будет конденсироваться на стенках трубопровода. Поскольку даже при существенно отрицательных температурах воздуха грунт, как правило,

Таблица 1. Основные технические характеристики воздухоудвки
Table 1. Key specifications of the blower

Параметр Parameter	Величина Value
Производительность по воздуху, м³/с Air capacity, m³/s	4,5–12,2
Напор вентилятора, кПа Fan pressure, kPa	7–9
Мощность двигателя, кВт Motor power, kW	200
Подогрев воздуха, °С Air reheat, °C	17–100
Расход топливного газа при нормальных условиях и частоте вращения 1600 об/мин, м³/ч Fuel gas flow rate under reference conditions and at 1600 r/min speed of rotation, m³/h	40
Масса установки, кг Unit weight, kg	7300

не промерзает на глубину укладки газопроводов, при положительной или нулевой температуре трубы для ее осушения можно использовать подогретый воздух с точкой росы –10 °С или ниже.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОСУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Воздуходувка подогретого воздуха

В перспективе использования окружающего воздуха в зимний период для осушения газопроводов в ООО «НПО «Газтехномаш» в 2018 г. был разработан и сконструирован опытный образец воздухоудвки подогретого воздуха (рис. 1). Установка на 97 % состоит из комплектующих отечественного производства. Ее основные агрегаты – высоконапорный вентилятор производства ЗАО «Вентиляторный ЗАВОД «КОМВЕН» (Белоусово) и газопоршневой двигатель «КАМАЗ» производства ПАО «КАМАЗ» (Набережные Челны), соединенные через эластичную муфту. Напор вентилятора позволяет эффективно продувать до 20 км магистрального газопровода диаметром 1400 мм. Для подогрева выходящего воздуха используется теплообменник, через который проходят выхлопные газы двигателя. Напор и температуру подаваемого воздуха можно регулировать как изменением оборотов двигателя, так и воздушными клапанами (рециркуляционным

и находящемся на выходе установки). Благодаря теплообменнику «воздух – выхлопные газы» в воздухоудвке используется практически 100 % энергии (за вычетом неизбежных тепловых потерь), выделяющейся при сгорании топливного газа для нагревания выходящего воздушного потока. Максимальная тепловая мощность установки составляет 300 кВт, благодаря чему она может использоваться не только по прямому назначению (для продувки и осушения газопроводов), но и как эффективное средство воздушного обогрева. Ее основные технические характеристики представлены в табл. 1.

Вакуумные установки

Внедрением технологии осушения трубопроводов методом вакуумирования ООО «НПО «Газтехномаш» занимается с 2013 г. За это время накоплен значительный опыт конструирования и эксплуатации вакуумных установок.



Рис. 2. Вакуумная установка первого поколения
Fig. 2. First-generation vacuum unit



Рис. 3. Вакуумная установка второго поколения в работе
Fig. 3. Second-generation vacuum unit in use

В конце 2013 г. были спроектированы и изготовлены две установки первого поколения (рис. 2). Они выполнены по двухступенчатой схеме, каждая состоит из четырех пар насосов. Предварительное сжатие паровоздушной смеси осуществляется насосом Рутса, а финальное сжатие и выхлоп в атмосферу – форвакуумным роторно-пластинчатым насосом. Двухступенчатая схема позволяет в несколько раз повысить производительность установки по сравнению с производительностью форвакуумных насосов и понизить минимально достижимое остаточное давление до значения ниже 100 Па (1 мбар).

Созданные в 2018 г. установки второго поколения (рис. 3) имеют некоторые конструктивные отличия.

Блочно-модульное исполнение. В аппаратах первого поколения насосы открыто размещали на раме.

Наличие циклонного сепаратора на входе (перед насосом Рутса) для очистки потока от твердых

Таблица 2. Основные технические характеристики вакуумных установок
Table 2. Key specifications of vacuum units

Параметр Parameter	Величина Value	
	Установка первого поколения First-generation unit	Установка второго поколения Second-generation unit
Количество и производительность форвакуумных насосов, м ³ /ч Quantity and capacities of backing vacuum pumps, m ³ /h	4 × 640	1 × 1920
Количество и производительность насосов Рутса при синхронной частоте вращения 3000 об/мин (50 Гц), м ³ /ч Quantity and capacities of Roots vacuum pumps at 3000 r/min (50 Hz) synchronous speed, m ³ /h	4 × 2500	1 × 7300
Максимальная производительность установки при давлении на входе менее 0,1 кПа (10 мбар) и синхронной частоте вращения насосов Рутса 1800 об/мин (60 Гц), м ³ /ч Maximum capacity at inlet pressure less than 0.1 kPa (10 mbar) and 1800 r/min (60 Hz) synchronous speed, m ³ /h	11 000	8500
Потребляемая электрическая мощность, кВт Power consumption, kW	75	45

частиц повышает надежность и долговечность насосов.

Увеличение эффективности установки за счет снижения температуры и повышения плотности среды перед форвакуумным насосом с помощью теплообменника – охладителя потока, находящегося между двумя насосами. Увеличение производительности форвакуумного насоса позволяет, в свою очередь, заметно увеличить производительность насоса Рутса и установки в целом.

Исполнение Aqua форвакуумного насоса обеспечивает возможность откачки паровоздушной смеси с содержанием водяных паров до 100 %, что достигается за счет повышенной (близкой к 100 °С) рабочей температуры.

Установка второго поколения легко разбирается на две части – модули форвакуумного насоса и насоса Рутса, каждая из которых может транспортироваться вертолетом типа «Ми-8». В комплект поставки входит электростанция собственных нужд с отечественным газовым двигателем мощностью 50 кВт.

Во всех типах вакуумных установок привод насосов Рутса выполнен с помощью преобразователей частоты, что позволяет регулировать скорость вращения

насосов. Необходимость такой регулировки связана с ограничениями на величину как максимально допустимого перепада давления на входе и выходе насосов Рутса, так и степени сжатия (отношения абсолютного давления на выходе и входе) в диапазоне «среднего вакуума» 0,6–2,5 кПа (6–25 мбар). Последнее ограничение особенно важно, поскольку превышение допустимой степени сжатия может привести к перегреванию и заклиниванию насосов.

Сконструированная на основе промышленного контроллера система управления для каждого режима работы (давления на входе) вычисляет допустимую скорость вращения насоса Рутса с учетом изложенных выше ограничений. В реальности производительность вакуумных установок сильно зависит от входного давления. При абсолютном давлении на входе, лежащем в диапазоне 30–100 кПа (0,3–1 бар), насос Рутса не включается, поскольку перепад давления, который он может создать, 5–7 кПа (50–70 мбар), относительно невелик по сравнению с входным давлением и его эффективность минимальна. В этом диапазоне параметров производительность вакуумных установок определяется производительностью форва-

куумных насосов. В дальнейшем по мере откачки возрастает скорость вращения насосов Рутса и, соответственно, увеличивается производительность установки в целом. Эффективность осушения определяется в первую очередь производительностью установки при низких давлениях, 0,6–1 кПа (6–10 мбар) (см. далее). При таком давлении, близком к давлению насыщенного пара воды, при температуре трубопровода (грунта) в диапазоне 0–7 °С [3] испаряется основное ее количество. В данном диапазоне давлений производительность двухступенчатых вакуумных систем максимальна.

Технические характеристики вакуумных установок представлены в табл. 2.

С точки зрения их практического использования важно оценить время, затрачиваемое на откачку участка трубопровода в зависимости от его объема и количества оставшейся влаги. Процедуру вакуумирования можно условно разделить на три этапа [2].

На первом этапе происходит снижение давления в осушаемом газопроводе и удаление из него воздуха. Здесь парциальное давление паров воды поддерживается постоянным за счет ее испарения,

а давление воздуха уменьшается по экспоненциальному закону:

$$p = p_a \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{V}\right) + p_{H_2O}, \quad (3)$$

где p и p_a – давление в трубопроводе и атмосферное давление соответственно; V_s и V – откачанный установкой объем паровоздушной смеси и объем газопровода соответственно; p_{H_2O} – парциальное давление насыщенных паров воды при температуре трубопровода (грунта). При этом откачанный вакуумной установкой объем при ее переменной производительности определяется по соотношению:

$$V_s = \int S(t)dt, \quad (4)$$

где t – время от начала вакуумирования.

Первый этап можно считать завершенным после откачки шести объемов трубопровода. Далее согласно (3) давление воздуха снизится в $\exp(6) \cong 400$ раз до значения 250 Па (2,5 мбар).

Второй этап вакуумирования характеризуется продолжительным плато на графике зависимости давления в газопроводе от времени: здесь удаляются практически чистые пары воды. Поскольку водяной пар находится в динамическом равновесии с жидкой или твердой фазами, давление в трубопроводе остается постоянным до завершения процесса испарения и в хорошем приближении описывается известной зависимостью давления насыщенного пара H_2O от температуры [3]. Продолжительность второго этапа зависит от количества влаги в трубопроводе. Согласно [1] нормативный остаток влаги в трубопроводах после предварительного ее удаления поршнями составляет 0,43 кг/м для газопроводов диаметром 1400 мм и 0,30 кг/м – для газопроводов диаметром 1000 мм. Для удаления такого количества влаги при температуре 3 °С и плотности водяных паров 5,9 г/м³ потребуется отка-

чать 46,5 объема трубопровода диаметром 1400 мм и 65 объемов трубопровода диаметром 1000 мм. Масштабность работы на этом этапе обуславливает жесткие требования к производительности в диапазоне давлений 0,6–1 кПа (6–10 мбар), которую могут обеспечить двухступенчатые вакуумные установки (производительность при более высоких давлениях не столь важна и может быть меньше).

После завершения второго этапа конденсированные фазы воды в трубопроводе отсутствуют и должно наблюдаться достаточно быстрое (по экспоненциальному закону) падение давления до величины 0,1 кПа (1 мбар), при котором вакуумирование можно считать завершенным, – третий этап. Теоретически для достижения давления 0,1 кПа (1 мбар) достаточно откачать порядка двух объемов газопровода (снижение давления в $\exp(2) \cong 7,4$ раза). Однако на практике граница между вторым и третьим этапом часто бывает

Больше на сайте
neftegas.info



Подписывайтесь на нас в



размытой, а сам третий этап может затянуться по времени.

ОПЫТ ОСУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

На сегодняшний день накоплен значительный опыт осушения трубопроводов с помощью вакуумных установок, разработанных в ООО «НПО «Газтехномаш». К сожалению, опыт эксплуатации описанной выше воздухоудовки отсутствует, поскольку в зимний сезон 2018/2019 гг. она не использовалась.

Первый раз вакуумные установки (первого поколения) применили в 2014 г. после гидроиспытаний третьей нитки газопровода Средняя Азия – Китай. С их помощью за 2 мес. было осушено около 220 км газопровода диаметром 1000 мм. Процесс проводили поэтапно на участках протяженностью 20–25 км. В результате вакуумирования в трубопроводе было достигнуто целевое давление 0,1 кПа (1 мбар).

Климатические условия Средней Азии выявили слабые места установок первого поколения: открытое (без корпуса) исполнение и отсутствие фильтров или сепараторов твердых частиц на входе, в результате чего после окончания работ требовалась трудоемкая наружная и внутренняя чистка насосов и электрошкафов.

После вакуумирования участки газопровода заполняли сухим азотом. На этом этапе было обнаружено интересное явление – конденсация влаги на противоположном от напуска азота конце трубы. Причина заключается в том,

что оставшиеся после вакуумирования в трубопроводе пары воды сжимаются, как поршнем, поступающим азотом, почти не смешиваясь с ним, в результате чего по мере роста давления образуется жидкая фаза. Для предотвращения этого явления на завершающем этапе вакуумирования при снижении давления в газопроводе ниже величины давления насыщенного пара воды при работающей вакуумной установке в трубы напускали воздух для удаления оставшегося водяного пара. После прекращения напуска давление снижали до 0,1 кПа (1 мбар).

После завершения работ в Средней Азии одну из установок первого поколения использовали осенью 2014 г. для осушения 18-километрового участка газопровода диаметром 1420 мм вблизи гор. поселения Агириш (Западная Сибирь). Здесь объем влаги в трубопроводе был значительным. После 5 сут вакуумирования давление снизилось до 0,8 кПа (8 мбар) и в течение последующих 9 сут не опускалось ниже 0,72 кПа (7,2 мбар). В результате из трубопровода было удалено около 9 тыс. кг (9т) воды, но целевое давление 0,1 кПа (1 мбар) так и не было достигнуто. Интересно отметить, что вакуумирование проводили при отрицательных температурах воздуха и на всей внутренней поверхности 12-метровой трубы диаметром 300 мм, которой была подсоединена установка к газопроводу, образовалась наледь толщиной 20–25 мм.

Установку второго поколения использовали для вакуумирова-

ния обвязки компрессорного цеха головной компрессорной станции «Ужгородская» (ООО «Газпром трансгаз Югорск») в декабре 2018 г., а также для осушения участка магистрального газопровода Уренгой – Центр диаметром 1420 мм и протяженностью 27,9 км в июле 2019 г. Воду с последнего участка удаляли при низкой (близкой к 0 °С и местами отрицательной) температуре грунта. Охлаждение трубы и прилегающего грунта произошло в результате стравливания воздуха из газопровода после завершения пневмоиспытаний. При дальнейшем удалении влаги поршнями на выходе появлялась смесь воды со льдом. По прошествии 7 сут и 6 ч после начала вакуумирования давление в газопроводе опустилось до 0,61 кПа (6,1 мбар) (давление насыщенных паров воды при температуре 0 °С), далее практически не менялось в течение 44 ч, после чего опускалось достаточно медленно, со скоростью около 150–200 Па/сут (1,5–2 мбар/сут). Вероятно, низкая скорость падения давления в газопроводе обусловлена тем, что по мере испарения воды в основной части трубы в некоторых местах она остается в виде наледи. Ввиду малых размеров данных участков скорость возгонки льда ограничивается скоростью подвода к ним теплоты, которая, в свою очередь, лимитируется теплопроводностью грунта. При испарении (возгонке) воды или льда на ограниченных участках возможно их охлаждение на несколько градусов, что отражается в снижении давления насыщенных паров. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. ОАО «Газпром», ООО «Газпром ВНИИГАЗ». СТО 2-3.5-354-2009. Порядок проведения испытаний магистральных газопроводов в различных природно-климатических условиях [Электронный ресурс]. Режим доступа: ограниченный.
2. Устинов Е.В. Создание и опыт использования высокопроизводительных вакуумных систем для осушения трубопроводов // Химическая техника. 2016. № 10. С. 24–26.
3. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

REFERENCES

- (1) OAO Gazprom, OOO Gazprom VNIIGAZ. *Company standard STO 2-3.5-354-2009. Procedure for testing main gas pipelines in various natural climatic conditions*. [Access restricted]. (In Russian)
- (2) Ustinov EV. Creation and experience of using high-performance vacuum systems for pipeline drying. *Chemical Engineering = Khimicheskaya tekhnika*. 2016; (10): 24–26. (In Russian)
- (3) Vargaftik NB. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: Nauka; 1972. (In Russian)