

УДК 621.59(075.8)

Ральф Данкерт-Паулсен,

«Herose GmbH», Elly-Heuss-Knapp-Strasse, 12, Bad Oldesloe, Deutschland, D-23843

e-mail: ralf.dankert-paulsen@herose.com

Вацлав Влчек

«Traccom s.r.o.», Klostermannova, 138, Chomutov, Czech Republic, 43001

e-mail: traccom@traccom.cz

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ПЕРЕПОЛНЕНИИ РЕЗЕРВУАРА ЖИДКИМ КРИОАГЕНТОМ

Фирма «Herose GmbH» уделяет серьёзное внимание совершенствованию выпускаемой криогенной арматуры и обеспечению её надёжной работы в экстремальных условиях. Специалисты фирмы выполнили испытания предохранительного клапана в фактических условиях его работы при возможном переполнении резервуара жидким азотом без отбора паровой фазы. Предохранительный клапан, установленный на криогенном резервуаре, в этих условиях работы открывался и закрывался почти 1000 раз. Проведённые испытания показали, что предохранительный клапан типа 06388 надёжно работает при отсутствии отбора газа из криогенного резервуара.

Ключевые слова: Предохранительный клапан. Криогенный резервуар. Жидкий азот. Испытание.

Ralf Dankert-Paulsen, Vaclav Vlcek

RESEARCH THE RELIABILITY OF SAFETY VALVES AT POSSIBLE OVERFLOW VESSEL OF A LIQUID CRYOGENIC PRODUCT

The firm «Herose GmbH» pays serious attention to the improvement of output cryogenic armature and ensuring its reliable work under extreme conditions. Specialists of the company completed tests of the safety valve in real conditions of work, with the possible overflow of the tank with liquid nitrogen without selection the vapor phase. The safety valve installed on the cryogenic tank in these conditions of work were opening and closing almost 1 000 times. The conducted tests showed that the safety valve type of 06388 works reliably in the absence of gas selection from the cryogenic tank. The conducted tests showed that the safety valve type of 06388 works reliably in the absence of selection of gas from the cryogenic tank.

Keywords: Safety valve. Cryogenic tank. Liquid nitrogen. Testing.

1. ВВЕДЕНИЕ

Криогенная арматура, выпускаемая фирмой «Herose GmbH», успешно применяется в широком диапазоне температур (от -196 до $+185$ °С) и давлений (от 0,2 до 55 бар) при реализации различных технологических процессов, связанных с хранением, транспортированием, газификацией и ожижением различных криопродуктов, таких как азот, кислород, аргон и т. д.

Известно, что при хранении жидкого криопродукта в замкнутом резервуаре он начинает испаряться из-за теплопритоков из окружающей среды. Интенсивность испарения зависит от количества подводимой теплоты и давления хранения криоагента. В боль-

шинстве случаев применяют резервуары длительного бездренажного хранения криоагентов, которые работают без потерь продуктовой газообразной (жидкой) фазы в окружающую среду. Для этого они оснащаются предохранительными клапанами, рассчитанными на прочностные характеристики криогенных резервуаров.

Так, например, при хранении жидкого азота в резервуаре при давлении 2,5 бар (равновесная температура насыщения составляет -187 °С) с максимально допустимым расчётным давлением 37 бар предохранительный клапан должен быть настроен на срабатывание при 35 бар. Уровень наполнения резервуаров жидким криоагентом составляет до 98 % от своего внутреннего объёма. В большинстве случаев они оснащены испарителем подъёма давления, кото-

рый позволяет выдавать жидкий азот под давлением с по-следующей его газификацией.

В случае длительного хранения жидкого азота или нарушения теплоизоляции по каким-либо причинам его давление может повыситься до 35 бар. Это вызовет срабатывание предохранительного клапана в результате испарения части жидкой фазы, что приведёт к увеличению удельного объёма азота на 84 % и переполнению резервуара.

До сих пор не было выяснено, происходит ли рост объёма жидкой фазы в резервуаре быстрее испарения и роста давления газообразной фазы с последующим сбросом избыточного объёма газа через предохранительный клапан в атмосферу. В таком случае предохранительный клапан должен при необходимости отводить и жидкую фазу из резервуара.

В связи с этим актуальным является исследование надёжности работы предохранительного клапана при возможном переполнении резервуара жидким криоагентом, так как сделать окончательный вывод на основе только теоретических расчётов затруднительно.

Целью настоящей работы является выяснение в ходе проведения эксперимента, наиболее полно воспроизводящего фактические условия эксплуатации предохранительного клапана, отвечает ли он предъявляемым к нему требованиям.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи в течение 15 дней компанией «Herose GmbH» на собственной испытательной площадке были проведены натурные испытания работы предохранительного клапана типа 06388 (фото 1), располагаемого на криогенном резервуаре (фото 2).



Фото. 1. Внешний вид предохранительного клапана типа 06388.1004.0000

Предохранительный клапан типа 06388 должен срабатывать при максимальном увеличении давления на +10 % и обеспечивать надёжный отвод объёмного потока жидкой или газообразной фазы из криогенного резервуара в окружающую среду. Подъём давления в криогенном резервуаре осуществлялся за счёт теплопритоков из окружающей среды через нарушенную теплоизоляцию. Все необходимые мероприятия при проведении испытаний были согласованы с экспертами «TÜV Nord Systems GmbH».

Испытания проводились в соответствии со следующими требованиями и стандартами: PED 97/23/EC; ASME Code Sec. VIII Div. 1; AD 2000 Merkblatt A2; DIN EN ISO 4126-1; DIN EN 13648-1.

Укажем основные характеристики применяемого оборудования.

Предохранительный клапан:

Тип: 06388.1004.0000.

Серийный номер: 10000748365.

Диаметр условного прохода: $d_o=7,0$ мм.

Давление начала срабатывания клапана: 35,0 бар.

Предоставлен: Компанией «Herose GmbH».

Криогенный резервуар:

Тип резервуара: Вертикальный.

Изоляция: Вакуумная.

Внутренний объём: 2 м³.

Расчетное давление: 37 бар.

Предоставлен: Компанией «Basi Schöberl GmbH».

Криоагент:

Вещество: Жидкий азот.

Предоставлен: Компанией «Linde AG».



Фото. 2. Место установки предохранительного клапана на резервуаре хранения жидкого азота

3. МЕТОДИКА И ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

В ходе испытания производилась фото- и видеосъёмка, а также измерялись и регистрировались следующие данные: температура на выходе предохранительного клапана, °C; давление перед предохранительным клапаном, бар; уровень заполнения/количество вещества в резервуаре, кг.

3.1. Подготовка к испытанию

Испытываемый предохранительный клапан установлен справа от имеющегося переключающего клапана резервуара (фото 2). Для измерения температуры на выходе из предохранительного клапана на нём был закреплен датчик температуры Pt100. Для обеспечения дополнительной безопасности к переключающему клапану слева был подключен второй предохранительный клапан, отрегулированный на срабатывание по достижению давления 39 бар. Патрубки, обычно монтируемые для отвода газа вниз, на первом этапе испытания установлены не были.

3.2. Заполнение резервуара

Резервуар заполнен жидким азотом на 98 % в количестве 1625 кг. Равновесное состояние в резервуаре стабилизировалось при давлении 4 бар. Благодаря вакуумированию изоляции данное состояние было неизменным в течение ночи.

3.3. Нарушение вакуума

В результате нарушения вакуумной теплоизоляции в 09:35 давление в резервуаре увеличилось с 4 до 7 бар к 13:00. В связи с тем, что темп нагрева жидкого азота и соответственно темп повышения давления в резервуаре оказались слишком низкими, было принято решение о дополнительном наполнении резервуара жидким азотом до переполнения. С целью экономии времени до начала испытания самого предохранительного клапана в 13:45 резервуар был заполнен до переполнения. В итоге общее количество азота в резервуаре составило около 1631 кг. После этого в 16:00 давление в резервуаре увеличилось до 36 бар, что привело к первому срабатыванию и полному открытию предохранительного клапана. Далее, через регулярные промежутки времени, примерно каждые 10 мин., предохранительный клапан надежно срабатывал при отсутствии вибрации тарелки клапана. Температура отводимого газа на выходе из предохранительного клапана составляла минус 180 °С.

Начиная с 20:00 предохранительный клапан перестал открываться полностью, в связи с чем, слышалось лишь слабое шипение. Давление в резервуаре прекратило увеличиваться и, напротив, начало медленно снижаться до давления закрытия клапана (фото 3).



Фото 3. Предохранительный клапан после первой серии срабатываний

Затем, чтобы удостовериться в том, что предохранительный клапан не заблокирован, был закрыт переключающий клапан, установленный перед предохранительным клапаном. Это привело к росту давления в резервуаре до 37 бар (примерно в 21:45). Открытие переключающего клапана немедленно вызвало надлежащее резкое срабатывание предохранительного клапана, что позволило полностью исключить возможность его обледенения (фото 4).

В течение первого дня испытания резервуар был

надежно защищен предохранительным клапаном. Для уменьшения возможного воздействия влаги, содержащейся в воздухе и проникающей под крышку пружины, был установлен выпускной патрубок, отводящий газ вниз. Использование выпускного клапана или изогнутой трубки является стандартной технической мерой, применяемой на практике (фото 5).

В последующие дни испытания подтвердили, что предохранительный клапан регулярно срабатывал при достижении давления газа около 35 бар без возникновения вибраций и вновь закрывался после снижения давления (примерно до 33,5-34,0 бар). За весь период регистрации данных никакого воздействия на клапан не оказывалось (фото 6), и какие-либо неполадки обнаружены не были.



Фото 4. Внешний вид обледенелого клапана

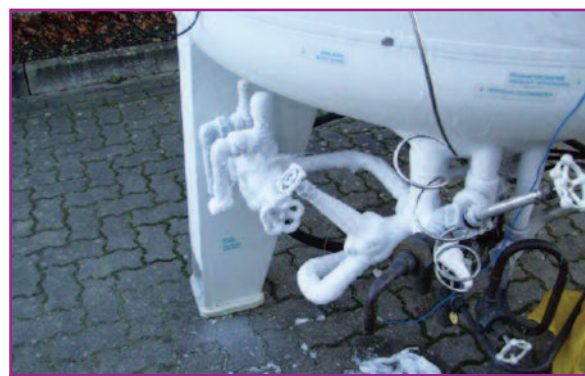


Фото 5. Обледенение испытуемой конструкции



Фото 6. Обледенение и срабатывание клапана

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно заключить, что при полностью заполненном резервуаре предохранительный клапан срабатывал примерно каждые 5-6 мин. и сбрасывал давление, выпуская азот в атмосферу. Снижение уровня заполнения резервуара приводит к увеличению интервалов срабатывания предохранительного клапана и продлению времени его открытия. При заполнении резервуара примерно на 22 % интервал от первого до второго срабатывания предохранительного клапана увеличился до 2 ч. Это объясняется тем, что при полностью заполненном резервуаре перед предохранительным клапаном имеется лишь крайне незначительная газовая прослойка, обеспечивающая сравнительно высокую скорость роста давления в резервуаре. Снижение давления при открытии предохранительного клапана происходит исключительно быстро, хотя клапан открывается лишь на короткое время. Частое срабатывание предохранительного клапана приводит примерно через 4 ч к полному обледенению его внешних поверхностей (рисунки 5 и 6).

При испытании однозначного вывода об агрегатном состоянии среды, выпускаемой через предохранительный клапан, сделать не удалось. Каждый раз в конце снижения давления в зоне предохранительного клапана отчетливо виднелось облако (рис. 6). Если в какой-то период времени через предохранительный клапан и выходила жидкая фаза, она немедленно испарялась вследствие быстрого падения давления (с 35 бар до давления окружающей среды). Это не повлияло на надежную работу предохранительного клапана и не вызвало появления вибраций.

На всем протяжении испытания в течение 15 дней не возникло ни одной критической ситуации, которая могла бы привести к разрушению предохранительного клапана или каким-либо иным образом повлиять на его эксплуатационное состояние. За это время предохранительный клапан открывался и вновь закрывался около 1000 раз.

После этого предохранительный клапан был проверен на испытательном стенде. Критерии проверки отработавшего предохранительного клапана:

Герметичность при нагрузке, соответствующей 97 % заданного давления: 0 пузырей в ёмкости с водой.

Давление срабатывания, определенное на испытательном стенде: 35,3 бар;

– давление открытия: 35,6 бар;

– давление закрытия: 34,0 бар.

Результаты испытания продемонстрировали, что после ввода предохранительного клапана в эксплуатацию он не претерпел никаких изменений. Все полученные значения соответствуют имеющимся допускам.

Визуальная оценка состояния отдельных деталей предохранительного клапана (рисунки 7-9) после испытания: все детали предохранительного клапана имеют лишь незначительные следы использования. Сос-

тояние поверхностей всех деталей предохранительного клапана соответствует их состоянию после изготовления.

На рис. 9 заметно, что уплотнительная поверхность стержня изогнулась в соответствии с коническим контуром седла предохранительного клапана. Результаты измерений показали, что после почти 1000 открытий предохранительный клапан находится в рабочем состоянии и может использоваться дальше без каких-либо ограничений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компания «Herose GmbH» уделяет серьёзное внимание совершенствованию выпускаемой криогенной арматуры и обеспечению её надёжной работы в критических условиях. С этой целью выполнены натурные испытания предохранительного клапана в фактических условиях работы при возможном переполнении резервуара жидким азотом без отбора паровой фазы.

В результате предохранительный клапан, установленный вне помещения, открывался и закрывался в течение 15 дней примерно 1000 раз при температуре от -10 °С до 6 °С. По окончании испытания отдельные детали и эксплуатационные характеристики предохранительного клапана сохранились без каких-либо изменений.

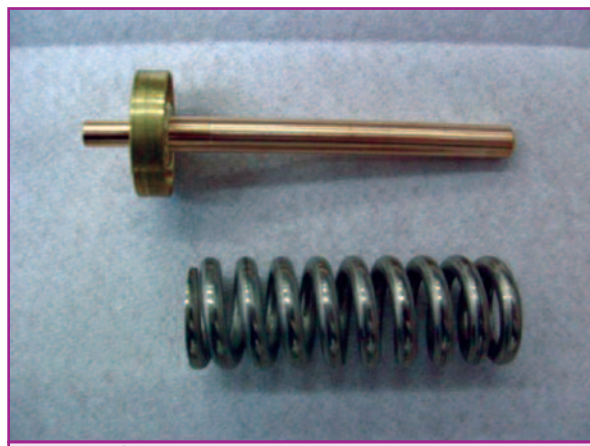


Рис. 7. Стержень клапана и нажимная пружина

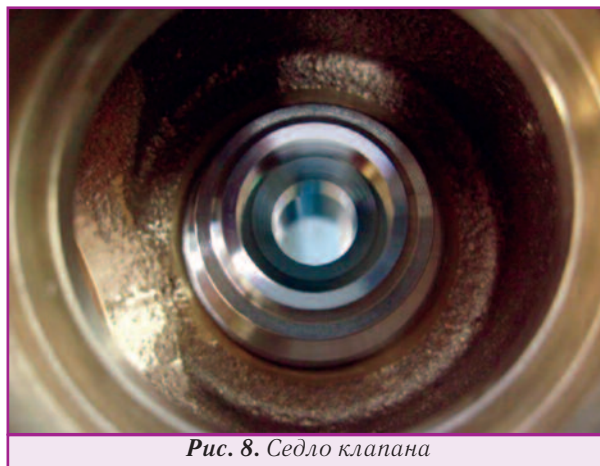


Рис. 8. Седло клапана



Фото 9. Стержень предохранительного клапана

Проведённые испытания предохранительного клапана типа 06388 показали, что он надёжно работает при отсутствии отбора газа из криогенного резервуара. Поэтому результаты данного опыта могут быть применимы как к криогенным резервуарам различной ёмкости, так и к предохранительным клапанам других размеров и типов 06388хх и 06418хх вследствие сходства геометрических форм их деталей, влияющих на проток газа и функциональные свойства клапанов.

ВСЕ О НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗАХ И ПРОДУКТАХ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА — В ОДНОМ ЖУРНАЛЕ!
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
“ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ”

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ — УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
 ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ “УА-СИГМА”
 СОУЧРЕДИТЕЛЬ — ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
 ЖУРНАЛ ЗАРЕГИСТРИРОВАН В МИНИСТЕРСТВЕ ЮСТИЦИИ УКРАИНЫ —
 СВИДЕТЕЛЬСТВО КВ № 16526-4998ПР ОТ 19.04.2010 Г.
 С 2005 Г. — ОФИЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ ВАК УКРАИНЫ.
 ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗДАНИЯ — 6 ВЫПУСКОВ В ГОД.
 ОБЪЁМ КАЖДОГО ВЫПУСКА — 72 СТР.
 ПУБЛИКУЕМЫЕ СТАТЬИ РЕФЕРИРУЮТСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ЖУРНАЛАХ
 И БАЗАХ ДАННЫХ ВИНТИ РАН (Г. МОСКВА)

ЖУРНАЛ ПРЕДНАЗНАЧЕН ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ, ЗАНИМАЮЩИХСЯ СОЗДАНИЕМ,
 ИЗГОТОВЛЕНИЕМ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК,
 СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ (Гелия, водород, оксид и диоксида углерода, сжиженного природного газа и др.),
 ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА, А ТАКЖЕ НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ И СТУДЕНТОВ

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

<ul style="list-style-type: none"> – ПРОБЛЕМЫ КРИОГЕННОГО, КИСЛОРОДНОГО, КОМПРЕССОРНОГО И УГЛЕКИСЛОТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ – ПРОЦЕССЫ, ЦИКЛЫ, СХЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ХОЛОДИЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ – УСТАНОВКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА, КОМПРИМИРОВАННОГО И СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА, ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ДР. ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ 	<ul style="list-style-type: none"> – ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ – ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ И ИХ СМЕСЕЙ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ – ЭКОНОМИКА ПРЕДПРИЯТИЙ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ – ПРАКТИКА. НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ
--	---

Приглашаем к сотрудничеству производителей, учёных, аспирантов и докторантов

ПРИ ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА НЕОБХОДИМО РУКОВОДСТВОВАТЬСЯ НИЖЕПЕРЕЧИСЛЕННЫМИ ПРАВИЛАМИ:

МАТЕРИАЛ ГОТОВИТСЯ при помощи редактора MS Word и направляется на e-mail: uasigma@paco.net.
В СТАТЬЕ НЕОБХОДИМО УКАЗАТЬ УДК; инициалы и фамилии авторов; название организации, её почтовый адрес; название статьи; реферат (на русском и английском языках); список литературы.
СТАТЬЯ должна быть разбита на несколько разделов: введение, основная часть (может состоять из нескольких разделов со своими заголовками), заключение.
ФОРМУЛЫ необходимо набирать в редакторе формул. Каждая формула должна иметь номер.
РИСУНКИ следует располагать после упоминания о них в тексте. Они нумеруются и сопровождаются подрисовочными подписями. На рисунке допускаются цифровые и буквенные обозначения, а поясняющие надписи выносятся в подписи к нему. Схемы, графики, диаграммы должны быть выполнены в любой из указанных программ: CorelDraw, Visio, AutoCAD, графический редактор MS Word. Предоставляются они в векторном виде.
ФОТОГРАФИИ необходимо прилагать к статье в виде отдельных JPG-файлов с разрешением не менее 300 dpi.
ТАБЛИЦЫ должны иметь номера и названия.
ЛИТЕРАТУРА: На используемые библиографические источники ссылки делаются по мере их упоминания в статье. Если источник — книга, необходимо указать: фамилии и инициалы авторов, название книги, место и год издания, название издательства, общее количество страниц. Для журнала — фамилии и инициалы авторов, название журнала и статьи, год и номер выпуска, а также страницы, на которых напечатана статья.
 Для патентов и авторских свидетельств указывается номер, страна, МКП или МКИ (международный классификатор патентов или изобретений), полное название.
 В отдельном письме необходимо дать сведения обо всех авторах: фамилия, имя, отчество; учёная степень и звание; должность, полное название организации, института или предприятия, а также домашний и служебный адреса с почтовыми индексами и номера телефонов, факсов и e-mail.
ВЫПОЛНЕНИЕ ЭТИХ ТРЕБОВАНИЙ УСКОРИТ ИЗДАНИЕ СТАТЬИ.
 Статьи принимаются к публикации на русском языке.
 Авторам, публикующим статьи в журнале, предоставляется авторский экземпляр.
 Редакция просит не направлять материалы, ранее опубликованные или публикуемые в других изданиях.
 Редакция оставляет за собой право проводить правку статей.

Для оформления подписки и размещения рекламы нужно связаться с редакцией журнала по телефону или e-mail.
 Адрес редакции: а/я 188, г. Одесса-26, Украина, 65026
 Тел./факс: +380 (48) 777-00-87; e-mail: uasigma@paco.net; web: www.uasigma.odessa.ua