К.Н. Куликов[1], А.И. Лычаков[2], Ю.А. Карамзина[1]
[1] АО «НИПТБ «Онега», Северодвинск, Россия
[2] Филиал Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, Северодвинск, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСУШКИ БАЛЛОНОВ ВОЗДУХА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПОСЛЕ РЕМОНТА

Объект и цель научной работы. Снижение количества потребляемого воздуха и сокращение продолжительности осушки баллонов после гидравлических испытаний на прочность; выполнение экспериментальных исследований для последующей разработки новой, более эффективной схемы осушки баллонов.

Материалы и методы. Количество необходимого сжатого воздуха и времени осушки баллонов объемом от 1 до 650 л при существующей на судоремонтных предприятиях технологии было определено методом расчета. Полученные при расчетах результаты подтвердили необходимость разработки новой конструктивной схемы осушки. В целях выполнения экспериментальных исследований и поиска оптимального технологического решения данной проблемы были изготовлены насадки («завихрители») трех различных конструкций, которые закручивают поток воздуха, подаваемый в баллон. Для определения опытно-экспериментальным методом наиболее эффективной конструкции «завихрителей» был изготовлен стенд, состоящий из модели баллона, расходомера, манометра, регулирующего клапана и соединительных трубопроводов. Часть корпуса модели баллона была изготовлена из стеклянной трубы для визуализации процесса осушки, имитированного на стенде. Внутри модели баллона устанавливалась стальная трубка, к которой крепили «завихрители» и маячки из тонких шерстяных нитей.

Основные результаты. Экспериментальные исследования показали, что установка внутри баллонов «завихрителей» с тангенциальными соплами и наружным диаметром, равным наружному диаметру воздухоподающей трубки, способствует снижению количества времени, необходимого для осушки, и позволяет уменьшить количество потребляемого сжатого воздуха. В ходе выполнения экспериментов было установлено, что для достижения наибольшей интенсификации процессов тепломассообмена «завихрители» необходимо располагать на расстоянии примерно 5–6 калибров (внутренних диаметров цилиндрической части баллона) друг от друга, для осушки сквозного дна необходимо установить «завихритель» на расстоянии примерно двух калибров от выхода потока воздуха из баллона.

Заключение. Применение закрученных потоков воздуха позволяет исключить операцию вращения баллонов на заводском стенде в процессе осушки их внутренних поверхностей, что снижает экономические затраты на выполнение ремонта баллонов. Новую эффективную схему осушки с применением «завихрителей» предполагается внедрить на судоремонтных предприятиях.

Ключевые слова: баллон воздуха высокого давления, интенсификация тепломассообмена, осушка, «завихритель», сопловые насадки, турбулизация потока, внутренние поверхности.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Куликов К.Н., Лычаков А.И., Карамзина Ю.А. Совершенствование процесса осушки баллонов воздуха высокого давления после ремонта. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 119–123.

УДК 539.8:629.5.083 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-119-123

K. Kulikov[1], A. Lychakov[2], Yu. Karamzina[1]
[1] JSC NIPTC Onega, Severodvinsk, Russia
[2] Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severodvinsk, Russia

IMPROVING THE PROCESS OF DRYING HIGH-PRESSURE AIR BOTTLES AFTER REPAIR

Object and purpose of research. To reduce time and air volume required for drying high-pressure air bottles after hydraulic strength tests; experimental studies for subsequent development of a new, more efficient, layout of drying the bottles.

Materials and methods. The amount of compressed air and time needed to dry air bottles with volume from 1 to 650 l as per the technology currently applied at ship repair yards was determined through calculation. The results confirmed the necessity to develop a new layout for the drying process. To perform experimental studies and search an optimal technological solution to this issue, there were developed nozzles ("vortex generators") of three different designs that swirl the air flow coming into the bottle. To find out the optimal design during the experiments, a test rig was made, consisting of a bottle model, a flow rate meter and a manometer (to regulate valves and connecting pipes). Part of the bottle body was made of a glass pipe to visualize the drying process in simulation conditions. Inside the bottle model, a steel tube was installed, with "vortex generators" and beacons (thin woolen threads) attached to it.

Main results. Experimental studies have shown that "vortex generators" (with tangential nozzles and outer diameter equal to the one of the air feed tube) reduces the amount of both time and compressed air required for drying. The experiments have shown that heat & mass exchange is the most intense when "vortex generators" are installed at the distance of approximately 5-6 calibers (internal diameter of the bottle's cylindrical part) from each other, whereas drying of the through bottom requires installation of "vortex generators" at the distance of approximately two calibers from air flow outlet from the bottle.

Conclusion. Air vortices make it possible not to rotate the bottles at the factory rig during drying of their internal surfaces, thus making the bottles less costly to repair. This new efficiency drying layout based on "vortex generators" is suggested for introduction at ship repair yards.

Key words: high-pressure air bottle, intensification of heat & mass exchange, drying, "vortex generator", duct nozzles, flow swirling, internal surfaces.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Kulikov K., Lychakov A., Karamzina Yu. Improving the process of drying high-pressure air bottles after repair. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 119–123 (in Russian).

УДК 539.8:629.5.083 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-119-123

Баллоны воздуха высокого давления (ВВД) [1, 2] после освидетельствования проходят гидравлические испытания на прочность и подвергаются химической очистке. После гидравлических испытаний баллонов на прочность необходимо выполнить осушку их внутренних поверхностей для защиты от коррозии в период межоперационного хранения до выполнения операции химической очистки. Процесс осушки внутренних поверхностей баллонов осуществляется путем подачи потока нагретого воздуха и требует достаточно большого его количества и длительного времени введения. По существующей технологии для баллонов объемом от 1 до 100 л продолжительность осушки составляет от 10 до 40 мин., для баллонов объемом от 100 до 650 л – от 40 до 90 мин., при этом на осушку баллона объемом 650 л затрачивается более 300 м^3 воздуха высокой чистоты.

Для обеспечения равномерной осушки внутренних полостей баллонов в составе технологического оборудования специализированных участков цехов судоремонтных предприятий предусмотрена установка для вращения баллонов во время осушки, что усложняет технологический процесс осушки и повышает стоимость его проведения.

Таким образом, процесс осушки внутренних поверхностей баллонов требует совершенствования с целью снижения расхода нагретого воздуха и сокращения длительности его проведения.

Постановка задачи
Formulation of task

Процесс осушки влажных материалов, в частности внутренних поверхностей баллонов, определяется в основном взаимодействием влаги с материалом стенок баллонов, высотой микронеровностей внутренних стенок и режимом осушки. В процессе осушки баллонов осуществляется воздействие на влагосодержание внутренней поверхности баллонов, обусловленное смачиванием, где смачивание представляет собой явление, возникающее при соприкосновении жидкости с твердым телом, которое реализуется проникновением жидкости в поры твердых тел.

Интенсивность испарения влаги с внутренней поверхности баллона зависит от:

- площади внутренней поверхности баллона;
- температуры воды;
- влажности воздуха;
- скорости воздушного потока.

Расчет потребляемого количества нагретого воздуха и времени осушки баллонов можно выполнить по методике, изложенной в стандарте [3], с применением формул из справочника [4].

Методика расчета количества нагретого воздуха и времени, необходимых для осушки баллонов ВВД

Procedure for calculating the amounts of time and heated air required to dry high-pressure air bottles

Интенсивность испарения жидкости со свободной поверхности $I_п$ (кг/м^{2}с) можно определить по формуле

$$I_п = \frac{W}{Ft} = \beta_p (p_п - p_с), \quad (1)$$

где W – количество испарившейся жидкости, кг; F – поверхность испарения, м^2; t – время, с; β_p – коэффициент конвективной массоотдачи, кг/Н·с; $p_п$ – давление водяного пара у поверхности испарения, Па ($p_п = 2383$ Па при температуре плюс 20 °С и $p_п = 1740$ Па при температуре плюс 15 °С); $p_с$ – давление водяного пара в подаваемом воздухе, Па.

$$\beta_p = \frac{\beta}{RT}, \quad (2)$$

где β – коэффициент массоотдачи, кг/Н·с; R – газовая постоянная, Дж/Моль·К; T – температура, К.

Для сухого подогретого воздуха высокой чистоты с достаточной для технических расчетов точностью можно принять $p_с = 0$.

Количество тепла q_n, которое необходимо подвести для испарения жидкости с внутренних стенок баллона:

$$q_n = I_п r = \alpha(t_1 - t_2), \quad (3)$$

где r – удельная теплота испарения, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2·К, определяемый по формуле (4); t_1 – температура осушающего воздуха, К; t_2 – температура поверхности испарения (температура воздуха в цехе), К.

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_1 - t_2)}; \quad (4)$$

$$Q = G(h_1 - h_2), \quad (5)$$

где Q – тепловой поток, Вт; F – площадь внутренней поверхности баллона, м^2, рассчитываемая по формуле (7); G – расход воздуха, кг/с; h_1 и h_2 – энтальпия осушающего воздуха на входе и выходе из баллона, Дж/кг.

Отсюда можно определить необходимое время осушки τ, с:

$$\tau = \frac{Wr}{\alpha F(t_1 - t_2)}. \quad (6)$$

Количество влаги W, кг, оседающей в порах на стенках баллона, было определено экспериментально (табл.).

Площадь внутренней поверхности баллона F, м^2 определяется по формуле

$$F = 2F_{торц} + F_{цил} = \pi d_{вн}^2 + \pi d_{вн} L_{цил}, \quad (7)$$

где $F_{торц}$ – площадь торцевой полусферической поверхности, м^2; $F_{цил}$ – площадь цилиндрической части баллона, м^2; $d_{вн}$ – внутренний диаметр баллона, м; $L_{цил}$ – длина цилиндрической части баллона, м.

Интенсивность испарения жидкости $I_п$ с внутренней поверхности баллона можно также рассчитать по формуле

$$I_п = eF(p_п - p_с), \quad (8)$$

где e – эмпирический коэффициент, кг/м^2·с·Бар; так как давление вводится в Па, то надо иметь в виду, что 1 Бар = 98100 Па.

Таблица. Количество влаги, оседающей на стенках баллонов

Table. Amount of moisture settling on bottle walls

Объем баллона $V_б$, л	1	10	20	50	100	200	400	650
Диаметр внутренней поверхности баллона, м	0,082	0,129	0,201	0,201	0,339	0,339	0,419	0,485
Площадь F внутренней поверхности баллона, м^2	0,056	0,310	0,430	0,970	1,300	2,400	3,800	5,700
Количество влаги W, кг	0,022	0,122	0,170	0,380	0,510	0,943	1,180	2,240

Массовый расход поступающего воздуха m (кг/с), требуемый для удаления испаряющейся влаги, можно рассчитать по формуле

$$m = \frac{W}{\tau(X_j - X_u)}, \quad (9)$$

где L – объемный расход поступающего воздуха, м^3/с; W – общее количество испаряющейся влаги, кг; X_j – влагосодержание воздуха в баллоне, определяемое по формуле (11); X_u – влагосодержание поступающего воздуха. X_j и X_u, кг/м^3.

Влагосодержание сухого подогретого воздуха принимаем $X_u = 0$.

Соответственно, объемный расход поступающего воздуха L, требуемый для удаления испаряющейся влаги, можно рассчитать по формуле

$$L = \frac{W}{\tau\rho(X_j - X_u)}, \quad (10)$$

где ρ – плотность осушающего воздуха, кг/м^3; τ – время осушки, с, определяемое по формуле (6).

Влагосодержание воздуха в баллоне X_j рассчитывается по формуле

$$X_j = \frac{W}{\rho V_б}, \quad (11)$$

где $V_б$ – объем баллона, м^3.

Экспериментальные исследования интенсификации процесса осушки баллонов воздуха высокого давления

Experimental studies on intensification of high-pressure air bottle drying process

Значительный разброс значений времени осушки, полученных по вышеприведенной методике, при существующей технологии объясняется целым рядом факторов, в том числе организацией подвода осушающего воздуха в полость баллона. На практике трубка в баллоне при осушке не центрируется по его оси, вследствие этого сдувание влаги со стен баллона происходит неравномерно. Часто воздух для осушки баллонов после химической очистки подается в баллоны без нагрева.

Для повышения эффективности осушки внутренних поверхностей баллонов ВВД следует интенсифицировать процессы тепломассообмена, чего можно достичь путем дополнительной турбулизации течения закрученным потоком нагретого воздуха, подаваемого с большой скоростью. Это позволит уменьшить расход нагретого воздуха и сократить время осушки баллонов. Потенциальные возможности закрученного потока отражены в авторском научном открытии [5] и с успехом были использованы в системах вентиляции плотно насыщенных корабельных помещений.

Для исследования эффективности решений, предлагаемых авторами статьи, была разработана модель баллона ВВД и три варианта сопловых насадок («завихрителей»), закручивающих поток нагретого воздуха. Испытания модели баллона проводились на специально созданном экспериментальном стенде (рис.), в состав которого входила модель баллона, компрессор, расходомер, регулирующий клапан, сопловые насадки и другие элементы. Наружный диаметр «завихрителей» равен наружному диаметру воздухоподающей трубки.

Для обеспечения возможности визуализации процесса осушки цилиндрическая часть корпуса модели баллона была изготовлена из стеклянной трубы с донышками, имитирующими концевые части баллона. Визуализация движения закрученного потока воздуха внутри модели баллона осуществлялась «нитьевым» способом, при котором использовались тонкие шерстяные нити. Шерстяные нити хорошо наблюдались через прозрачную стеклянную стенку цилиндрической части модели баллона.

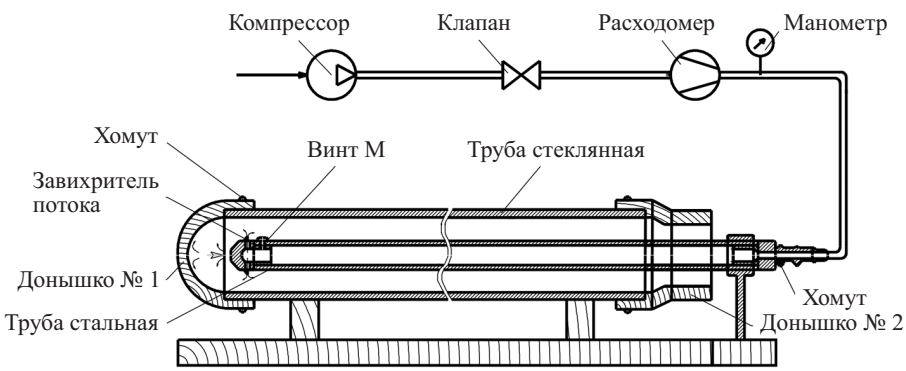

Рис. Схема экспериментальной установки

Fig. Test rig layout

Результаты экспериментальных исследований показали, что на расстоянии примерно 10 калибров (внутренних диаметров цилиндрической части модели баллона) поток выравнивается, становится незакрученным, поэтому для создания местной турбулизации течения необходимо примерно через 5–6 калибров устанавливать «завихрители» с тангенциальными соплами. На расстоянии примерно двух калибров от выхода потока из баллона необходимо устанавливать «завихритель» для обработки сквозного дна.

Заключение

Conclusion

Представлена методика расчета необходимого количества нагретого воздуха и времени его подачи на осушку баллонов.

Исследовано три типа сопловых головок («завихрителей») для интенсификации тепломассообмена при осушке баллонов за счет турбулизации потока. Испытания «завихрителей» различных конструкций на стенде показали эффективность их использования для интенсификации процесса тепломассообмена и сокращения времени осушки внутренних полостей баллонов.

Результаты выполненных исследований позволяют констатировать, что применение закрученных потоков позволит исключить операцию вращения баллонов, упростить технологический процесс осушки и его стоимость, уменьшить необходимый расход нагретого воздуха, сократить время осушки, что в совокупности и составит значительный экономический эффект от предлагаемых решений.

Библиографический список

References

1. ГОСТ 12247–80. Баллоны стальные бесшовные большого объема для газов на Рр 31,4 и 39,2 МПа (320 и 400 кгс/см2). ТУ. Введ. 1980–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1982. [GOST 12247-80. Bottles, steel, seamless, large-capacity, for gases with operational pressure Pp 31.4 and 39.2 MPa (320 and 400 kgf/cm2). TU. Introduced on 1980-01-01. Moscow: Publishing House of Standards, 1982. (in Russian)].
2. ГОСТ 949–73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на Рр ≤ 19,6 МПа (200 кгс/см2). ТУ. Введ. 1975–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1974. [GOST 949-73. Bottles, steel, small and medium volume, for gases with operational pressure Pp ≤ 19.6 MPa (200 kgf/cm^2). TU. Introduced on 1975–01–01. Moscow, Publishing House of Standards, 1974. (in Russian)].
3. Стандарт Общества немецких инженеров (die Vereinigungder Deutschen Ingenieure) VDI 2089 BLATT 1 (2010-01) [Электрон. ресурс] / Сайт «Вентпортал». URL: http://ventportal.com/node/47 (дата обращения 06.07.2017). [Standard of Die Vereinigungder Deutschen Ingenieure, available at http://ventportal.com/node/47 (in Russian)].
4. Теплотехнический справочник. М.: Энергия, 1976. [Heat technology. Moscow: Energiya, 1976. (in Russian)].
5. *Аин Е.М.*, *Горобец А.Г.*, *Никитин В.С.* Явление трансформации закрученного потока жидкости или газа при прохождении через ячеистую пространственную решетку. Авторское свидетельство № 357 от 28.05.2008; заявка № А-450 от 31.07.2007; рег. № 450. [*Ye. Ain*, *A. Gorobets*, *V. Nikitin*. Transformation of swirled fluid or gas flow passing via a celled 3D grid. Author's Certificate No. 357 dt. May 28, 2008, application No. A-450 dt. July 31, 2007, registration number 450. (in Russian)].

Сведения об авторах

Куликов Константин Николаевич, к.т.н., генеральный директор АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега». Адрес: 164509, Россия, Северодвинск, проезд Машиностроителей, д. 12. Телефон: 8 (8184) 52-55-52. E-mail: niptb@onegastar.ru.

Лычаков Александр Иванович, к.т.н., доцент, заместитель директора филиала по научной работе Филиала Северного (Арктического) федерального университета в г. Северодвинске. Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, ул. Капитана Воронина, д. 6. Телефон: +7 (921) 671-17-99. E-mail: a.lychakov@narfu.ru.

Карамзина Юлия Андреевна, инженер-технолог АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега». Адрес: 164509, Россия, Северодвинск, проезд Машиностроителей, д. 12. Телефон: 8 (8184) 52-55-52. E-mail: niptb@onegastar.ru.

About the authors

Kulikov, Konstantin N., Cand. Sc. (Tech), Director General JSC NIPTC Onega. Address: proezd Mashinostoitelei 12, Severodvinsk, 164509, Russia, Tel.: 8 (8184) 52-55-52. E-mail: niptb@onegastar.ru.

Lychakov, Aleksandr I., Cand. Sc. (Tech), Assistant Professor, Deputy Director for Research, Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Address: ul. Kapitana Voronina 6, Severodvinsk, 164500, Russia. Tel: +7 (921) 671-17-99. E-mail: a.lychakov@narfu.ru.

Karamzina, Yulia A., Process Engineer, JSC NIPTC Onega. Address: proezd Mashinostoitelei 12, Severodvinsk, 164509, Russia. Tel.: 8 (8184) 52-55-52. E-mail: niptb@onegastar.ru.

Поступила / Received: 02.02.18
Принята в печать / Accepted: 01.03.18