

В.Н. Павлечко¹, В.С. Францкевич¹, Ю.И. Шалухо²

¹Белорусский государственный технологический университет

²ОАО «КРИОН»

Минск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ БАЛЛОНОВ И ЕМКОСТИ ЖИДКИМИ ПРОДУКТАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Аннотация. Определены расходы жидкого диоксида углерода при наполнении баллонов и огнетушителей соответствующего ряда, в частности, жидких кислорода, азота и аргона при наполнении передвижной емкости KARBONSAN в теплом и охлажденном состоянии внутренней оболочки.

V.N. Pavlechko¹, V.S. Frantskevich¹, Yu.I. Shelukho²

Belarusian State Technological University

OJSC "KRION"

Minsk, Belarus

FEATURES OF FILLING CYLINDERS AND CONTAINERS WITH LIQUID AIR SEPARATION PRODUCTS

Abstract. The consumption of liquid carbon dioxide when filling cylinders and fire extinguishers of the corresponding series, in particular, liquid oxygen, nitrogen and argon when filling a mobile KARBONSAN tank in a warm and cooled state of the inner shell, was determined.

Открытое акционерное общество «КРИОН» является специализированным предприятием по выпуску продуктов разделения воздуха: кислорода, азота, аргона как в жидком, так и в газообразном состоянии, а также пищевых и технических газовых смесей. Сегодня общество полностью удовлетворяет потребности экономики Беларуси в продуктах разделения воздуха. Продукты разделения воздуха широко применяются в различных отраслях экономики республики: металлургии, машиностроении, нефтехимической отрасли, медицине, сельском хозяйстве, атомной энергетике, ракетной технике, для охлаждения лазеров при различных исследованиях в термостатических условиях, для автогенно-сварочных работ, создания защитной инертной среды и др.

В жидком состоянии все вещества имеют относительно высокую плотность и малый удельный объем, поэтому ожижение газов является предпочтительным способом их подготовки к хранению. Плотность вещества в жидком и твердом состоянии в большинстве случаев близка по значению, при этом жидкие продукты гораздо удобнее перемещать

и использовать. Из-за этого хранение газов в жидком состоянии получило широкое распространение промышленности, медицине, авиации и даже в быту.

Общим свойством всех криогенных газов является низкая температура в критической точке и сравнительно высокое критическое давление. В СССР сложилась практика хранения и транспортирования сжиженных криогенных газов при давлении, близком к атмосферному (обычно несколько более высоком), эта практика сохраняется и в Республике Беларусь. За рубежом доминирует альтернативный способ хранения криопродуктов, при котором жидкости хранят и транспортируют при повышенном давлении. Вне зависимости от выбора давления хранения все сжиженные криогенные газы имеют температуру существенно ниже температуры окружающей среды. Приток теплоты к криогенным газам, приводит к существенным потерям от испарения. При их хранении и транспортировании основной задачей является полное исключение или доведение до минимума потерь жидкости.

Расчеты выполнялись для определения норм расхода и потерь при наполнении передвижной емкости KARBONSAN (емкость 25 м³) азотом, кислородом, аргоном, а также для определения нормы расхода и потерь диоксида углерода в баллонах и огнетушителях. Заполнение баллонов жидкой углекислотой происходит следующим образом. Первоначально баллон освобождается от остатков углекислоты путем стравливания их в помещение. Затем баллон соединяется с системой заполнения и в него поступает жидкая углекислота при температуре $T_{CO_2} = -20^{\circ}C$ и давлении $P_{CO_2} = 5,8$ МПа. Часть углекислоты в баллоне испаряется ввиду сниженного давления. После наполнения баллона необходимым количеством углекислоты система заполнения отсоединяется от баллона и из нее отводится жидкая углекислота путем слива и испарения. Таким образом жидкая углекислота расходуется на наполнение баллона жидкостью, на потери с паром и из системы заполнения.

Объем системы заполнения

$$V_{C31} = \pi d_{в1}^2 L_1 / 4.$$

Масса углекислоты в системе заполнения

$$G_{CO_2} = V_{C31} \cdot \rho_{CO_2},$$

где ρ_{CO_2} – плотность углекислоты, кг/м³. $\rho_{CO_2} = 1170$ кг/м³

Между заполнениями баллонов количество углекислоты из системы заполнения теряется.

Масса системы заполнения

$$G_{C31} = p (d_{н1}^2 - d_{в1}^2) \rho_{тр1} / 4,$$

где $\rho_{\text{тр1}}$ – плотность материала трубопровода, кг/м^3 . Для меди $\rho_{\text{тр1}} = 8800 \text{ кг/м}^3$ [2, с. 488].

Баллон перед заполнением имеет температуру $+ 20^\circ\text{C}$, углекислота – 293K ($+20^\circ\text{C}$).

Первоначально жидкая углекислота при давлении $5,8 \text{ МПа}$ поступает в баллон, в котором имеется давление $0,1 \text{ МПа}$, и она частично испаряется. По мере заполнения баллона давление в нем повышается и пар конденсируется. При достижении давления в баллоне $5,8 \text{ МПа}$ весь пар конденсируется и потерями жидкой углекислоты в результате испарения практически можно пренебречь.

Масса пара диоксида углерода до заполнения

$$G_{\text{пCO2нач}} = V_{\text{б1}} \cdot \rho_{\text{пCO2}},$$

где $V_{\text{б1}}$ – объем баллона, м^3 ;

$\rho_{\text{пCO2}}$ – плотность пара диоксида углерода при атмосферном давлении, кг/м^3 . При атмосферном давлении и температуре 20°C

$$\rho_{\text{пCO2}} = (M_{\text{CO2}}/22,4) (293/273),$$

где M_{CO2} – молекулярная масса диоксида углерода, кг/кмоль , при нормальных условиях $M_{\text{CO2}} = 44 \text{ кг/кмоль}$;

$22,4$ – объем 1 кмоль диоксида углерода, $\text{м}^3/\text{кмоль}$.

Объем, занимаемый жидкой углекислотой в баллоне,

$$V_{\text{жCO2}} = G_{\text{жCO2}} / \rho_{\text{жCO2}},$$

где $G_{\text{жCO2}}$ – масса жидкой углекислоты в баллоне, кг ;

$\rho_{\text{жCO2}}$ – плотность жидкой углекислоты, кг/м^3 . При давлении $5,8 \text{ МПа}$ $\rho_{\text{жCO2}} = 763,6 \text{ кг/м}^3$.

Объем, занимаемый паром углекислоты в баллоне,

$$V_{\text{пCO2}} = V_{\text{б}} - V_{\text{жCO2}},$$

где $V_{\text{б}}$ – внутренний объем баллона, м^3 ;

$V_{\text{жCO2}}$ – объем жидкой углекислоты в баллоне, м^3 .

Масса пара диоксида углерода в баллоне

$$G_{\text{пCO2кон}} = V_{\text{пCO2}} \cdot \rho_{\text{пCO2}},$$

где $\rho_{\text{пCO2}}$ – плотность пара диоксида углерода, кг/м^3 . При давлении в баллоне $5,8 \text{ МПа}$ $\rho_{\text{пCO2}} = 201,81 \text{ кг/м}^3$.

Потери жидкой кислоты при заполнении баллона

$$G_{\text{пот1}} = G_{\text{пCO2кон}} - G_{\text{пCO2нач}}.$$

Расход углекислоты при заполнении баллона складывается из ее жидкого количества в баллоне $G_{\text{жCO2}}$, в системе заполнения $G_{\text{жCS1}}$, а также потерь с паром $G_{\text{пот1}}$

$$G_{\text{CO2}} = G_{\text{б1CO2}} + G_{\text{жCS1}} + G_{\text{пот1}},$$

где $G_{\text{б1CO2}}$ – масса жидкой углекислоты в баллоне, кг ;

$G_{\text{жCS1}}$ – масса жидкой углекислоты в системе заполнения, кг ;

$G_{\text{пот1}}$ – потери углекислоты с паром, кг .

Таким образом, были получены суммарные расходы углекислоты при наполнении баллонов.

Далее был выполнен расчет расходов жидких криопродуктов при наполнении емкости KARBONSAN.

Отвод тепла на испарение кислорода при захолаживании внутренней обечайки от плюс 20°C до минус 170°C

$$Q_{к2} = G_{во} \cdot c_{ст} \cdot (t_{н} - t_{к}),$$

где $G_{во}$ – масса внутренней обечайки емкости, кг. Принимаем массу внутренней обечайки емкости, равной 40% массы всей емкости. $G_{во} = 0,4 \cdot G_{е} = 0,4 \cdot 8200 = 3280$ кг;

$c_{ст}$ – удельная теплоемкость нержавеющей стали 12X18H10T, кДж/(кг·К); $c_{ст} = 0,35$ кДж/(кг·К);

$t_{н}$, – начальная температура внутренней обечайки, °C. $t_{н} = 20^{\circ}\text{C}$;

$t_{к}$ – конечная температура внутренней обечайки, °C; $t_{к} = -170^{\circ}\text{C}$ для кислорода.

Потери кислорода при испарении кислорода в емкости

$$G_{ки} = Q_{к2} / r_{к},$$

где $r_{к}$ – удельная теплота испарения кислорода, кДж/кг; $r_{к} = 212,3$ кДж/кг.

$$G_{ки} = 218120 / 212,3 = 1027,41 \text{ кг.}$$

Объем системы заполнения

$$V_{с32} = \pi d_{в2}^2 L_2 / 4,$$

где $d_{в2}$ – внутренний диаметр системы заполнения, м. $d_{в2} = 40$ мм;

L_2 – длина системы заполнения, м. $L_2 = 5$ м.

Потери кислорода на наполнение системы заполнения

$$G_{к2} = V_{с3} \cdot \rho_{к},$$

где $\rho_{к}$ – плотность кислорода, кг/м³. $\rho_{к} = 1068$ кг/м³ для жидкого кислорода.

Кислород испаряется также при захолаживании системы заполнения. Учитываемую массу трубопроводов (рукавов) для перекачивания жидкого кислорода определяем по формуле

$$G_{с3} = \pi (d_{н2}^2 - d_{в2}^2) \cdot \rho_{с3} L_2 / 4,$$

где $\rho_{с3}$ – плотность материала рукава, кг/м³. Для резины $\rho_{с3} = 1500$ кг/м³.

Отвод тепла на испарение кислорода при захолаживании системы заполнения от плюс 20°C до минус 170°C

$$Q_{кс3} = G_{с3} \cdot c_{с3} \cdot (t_{нк} - t_{кк}),$$

где $c_{с3}$ – удельная теплоемкость материала системы заполнения, кДж/(кг град). Для резины $c_{с3} = 1,68$ кДж/(кг град).

Потери кислорода при испарении в системе заполнения

$$G_{кс3} = Q_{кс3} / r_{к}.$$

Общие потери кислорода при испарении в емкости и системе заполнения и жидкости в системе заполнения:

Перед наполнением содержащийся жидкий кислород сливается из емкости и в ней остается только пар кислорода. Масса пара кислорода в емкости перед наполнением

$$G_{\text{пнач}} = V_e \cdot \rho_{\text{пен}},$$

где $\rho_{\text{пен}}$ – плотность пара кислорода, кг/м^3 . При атмосферном давлении и температуре 20°C . $\rho_{\text{пен}} = 32 \cdot 273 / (22,4 \cdot (273 + 20)) = 1,331 \text{ кг/м}^3$.

Расход жидкого кислорода в емкость $G_{\text{жк}} = 21000 \text{ кг}$.

Объем жидкого кислорода в емкости после наполнения

$$V_{\text{жк}} = G_{\text{жк}} / \rho_{\text{жк}},$$

где $\rho_{\text{жк}}$ – плотность жидкого кислорода при давлении $0,3 \text{ МПа}$ и температуре 103К , кг/м^3 . $\rho_{\text{жк}} = 1068 \text{ кг/м}^3$.

Объем пара кислорода в емкости после наполнения

$$V_{\text{пек}} = V_e - V_{\text{жк}};$$

Масса пара кислорода в емкости после наполнения

$$G_{\text{пек}} = V_{\text{пек}} \cdot \rho_{\text{пек}},$$

где $\rho_{\text{пек}}$ – плотность пара кислорода при давлении $0,3 \text{ МПа}$, кг/м^3 и температуре 103К . $\rho_{\text{пек}} = M_k \cdot 0,3 \cdot 273 / (22,4 \cdot 103 \cdot 0,1)$

Масса пара кислорода в емкости после наполнения меньше массы пара кислорода на испарение. Следовательно, некоторое количество кислорода после испарения в емкости и системе заполнения должно быть выведено из емкости.

Для минимизации расход кислорода при наполнении емкости KARBONSAN необходимо охладить ее и обеспечить минимальное количество пара, отводимое из емкости. Это достигается, если количество кислорода, испаряющегося в емкости и системе заполнения, будет равно количеству пара в емкости после заполнения.

Для минимизации расхода кислорода при заполнении жидким кислородом внутреннюю оболочку емкости необходимо охладить до температуры $-160,19^\circ\text{C}$ ($112,81\text{К}$).

Общий расход кислорода равен сумме массы жидкого кислорода при наполнении емкости, массы пара кислорода в емкости, массы пара, испаряющегося в емкости, массы пара, испаряющегося в системе заполнения, массы кислорода, вытекающей из системы заполнения, за вычетом массы пара кислорода в емкости перед ее наполнением.

Согласно расчетам, относительные потери кислорода составляют около 5% .

Таким образом, определены расходы жидкого диоксида углерода при наполнении баллонов и огнетушителей соответствующего ряда. Определены расходы жидких кислорода, азота и аргона при

наполнении передвижной емкости KARBONSAN в теплом и охлажденном состоянии внутренней оболочки.

Список использованных источников

1. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 1: Учебное пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2017. – 95 с.
2. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 2: учебно-методическое пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2018. – 60 с.
3. Епифанова В.И. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование. Т. 1. Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздуходелительных установок. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.

УДК 678.7-1

В.Б. Ходер, Е.И. Кордикова, Г.Н. Дьякова
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ КОМПОЗИЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

Аннотация. В работе показано влияние вязкости композиции на кинетику отверждения и смачиваемость в процессах фотополимеризации в ванне. Представлены исследования влияния дисперсности и содержания наполнителя на вязкость композиционных систем на основе фотополимерной смолы, наполненной измельченными отходами отвержденных смол после технологии лазерной стереолитографии.

V.B. Khodzer, E.I. Kordikova, H.N. Dyakova
Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE VISCOSITY OF THE COMPOSITION ON THE TECHNOLOGICAL FEATURES OF LASER STEREOLITHOGRAPHY

Abstract. The paper shows the effect of the viscosity of the composition on the kinetics of curing and wettability in the processes of photopolymerization in the bath. Studies of the effect of