



**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

**Домашнее задание №_3_
по курсу**

«Производство редких газов»

**Вариант __7__
Группа: Э4-111**

**Выполнил студент:
Жалялетдинов Р.Х.
Проверил:
Куприянов М.Ю.**

Москва 2020 г.

Условие домашнего задания:

1. Составить алгоритм действий и рассчитать смешение в соответствии с вариантом.
2. Составить схему (с условным обозначением вентилей, трубопроводов и т.д.), продумать какое оборудование/машины/процессы необходимы в реальной схеме для осуществления смешения.
3. Как измерить и проконтролировать состав смеси, какими методами можно разделить исходную смесь на начальные компоненты (без расчета)?
4. Обеспечить требуемую чистоту смеси по основным компонентам. Если чистота не задана, определить максимально возможную.

Если необходимо вакуумирование, посчитать проводимость системы, выбрать насос.

Вся тара для смеси и коммуникации изначально открыты на атмосферу.

Концентрации мольные, если не указано другое. Давление и температура по Н.У., если не указано другое. По умолчанию давления указаны избыточные. Обращайте внимание на размерности.

(5.) Дополнительно: посчитать погрешность финальной смеси, посчитать потери газа.

Компоненты для смешения и их параметры:

1. O₂ 6.0, баллон 50 л, 150 бар
2. Xe 5.5, баллон 10 л, 80 бар
3. Kr 6.0, баллон 20 л, 150 бар

Смесь и её параметры:

O₂ 30%, Xe 65%, Kr 5%, чистотой не хуже 5.0, баллон 4 л, 100 бар

1. Алгоритм действий и расчет смешения.

Для выбора узлов и компонентов системы, первоначально необходимо перечислить требования к узлам и аппаратам системы, требования по безопасности эксплуатации системы, сформировать критерии подбора узлов и т.д.

При выборе рамп важно учитывать масштабы и особенности производства, для которого будет использоваться газовая рампа. Необходимо уточнить следующие параметры:

1. Кислородные рампы должны быть обезжирены, чтобы не произошло возгорание остаточных органических соединений.
2. При подборе рампового запорного вентиля нужно учитывать его условный диаметр, так как он будет влиять на пропускную способность рампы, установить вентиль с недостаточным диаметром, то его величины может не хватить для достижения необходимого давления.
3. Редуктор давления подбирается по требуемым давлениям до редуктора (входное) и после редуктора (выходное). Входное давление – это давление в баллонах. После подбора редуктора по давлению важно обратить внимание на пропускную способность.

4. При выборе манометров предельно допустимое рабочее давление не должно превышать 3/4 верхнего предела измерений. Обязательно нужно знать свойства вещества и пределы измеряемого давления.

5. При выборе газосмесительной системы необходимо учесть диапазон производительности, максимальное давление на выходе и другие параметры, описанные в тех документации устройства. Подбор устройства должен удовлетворять условиям поставленной задачи.

Требования безопасности.

Рампы должны отвечать требованиям безопасности по ГОСТу 12.2.008 и ГОСТу 12.2.003. При конструировании, изготовлении, эксплуатации и испытании рамп перепускных необходимо соблюдать:

- «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ03-576-03)
- «Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления» (Приказ ростехнадзора №542 от 15.11.2013)
- «Правила пожарной безопасности в РФ» (Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 N 390 О противопожарном режиме)

После сбочных процедур для всех узлов и устройств, можно расписывать последовательность действий. (Последовательность упрощеная, без ссылок и подбора деталей)

1. Так как система открыта на атмосферу, то ее следует обезжирить, продув сухим сжатым воздухом.

2. Систему следует отвакуумировать и после можно наполнять смесевой баллон первым компонентом. Дозирование будет осуществляться по весу и давлению.

3. Можно обойтись и без газосмесителя, и вместо продумывания коллекторных узлов для каждого из баллонов сделать один общий, последовательно заправляя баллоны один за другим и вакуумированием в промежутках, когда заправлен один из компонентов.

4. Первый баллон будет ксеноновый (заправляется до 65 бар), так как его давление из всех трех наименьшее. (Наиболее рационально при получении смеси обойтись без компримирования).

5. Второй будет криptonовый (заправляется до 70 бар), а после него - кислородный (заправляется до 100 бар). (Полный алгоритм действий расписан далее(в конце))

Расчет смешения:

$$p_{cm} := 100 \text{ bar} + 1 \text{ atm} = 101.013 \text{ bar}$$

$$y_{O_2} := 0.3 \quad y_{X_e} := 0.65 \quad y_{Kr} := 0.05$$

Парциальные давления компонентов:

$$p_{O_2} := p_{cm} \cdot y_{O_2} = 30.304 \text{ bar} \quad p_{Xe} := p_{cm} \cdot y_{Xe} = 65.659 \text{ bar} \quad p_{Kr} := p_{cm} \cdot y_{Kr} = 5.051 \text{ bar}$$

Примем что смесь имеет температуру при нормальных условиях $T := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Коэффициенты сжимаемости и газовые постоянные для каждого из компонентов:

$$V := 4 \text{ l} \quad z_{O_2} := 0.981 \quad z_{Xe} := 0.242 \quad z_{Kr} := 0.989 \quad (\text{Refprop, T, p})$$

Молярные массы компонентов и смеси:

$$\begin{aligned} \mu_{O_2} &:= 32 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} & \mu_{Xe} &:= 131.3 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} & \mu_{Kr} &:= 83.7 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \\ \mu_{cm} &:= y_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + y_{Xe} \cdot \mu_{Xe} + y_{Kr} \cdot \mu_{Kr} = 99.13 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \end{aligned}$$

Газовые постоянные для компонентов:

$$R_{O_2} := \frac{R}{\mu_{O_2}} = 259.827 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad R_{Xe} := \frac{R}{\mu_{Xe}} = 63.324 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad R_{Kr} := \frac{R}{\mu_{Kr}} = 99.337 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Количество молей каждого из компонентов смеси:

$$n_{O_2} := \frac{p_{O_2} \cdot V}{z_{O_2} \cdot R \cdot T} = 5.07 \text{ mol} \quad n_{Xe} := \frac{p_{Xe} \cdot V}{z_{Xe} \cdot R \cdot T} = 44.526 \text{ mol} \quad n_{Kr} := \frac{p_{Kr} \cdot V}{z_{Kr} \cdot R \cdot T} = 0.838 \text{ mol}$$

Массы каждого из компонентов в баллоне со смесью(без учета чистоты компонентов):

$$m_{O_2} := \frac{p_{O_2} \cdot V}{z_{O_2} \cdot R_{O_2} \cdot T} = 0.162 \text{ kg} \quad m_{Xe} := \frac{p_{Xe} \cdot V}{z_{Xe} \cdot R_{Xe} \cdot T} = 5.846 \text{ kg} \quad m_{Kr} := \frac{p_{Kr} \cdot V}{z_{Kr} \cdot R_{Kr} \cdot T} = 0.07 \text{ kg}$$

Масса нетто баллона со смесью: $m := m_{O_2} + m_{Xe} + m_{Kr} = 6.079 \text{ kg}$ $\rho := \frac{m}{V} = 1519.652 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Определять необходимое количество компонентов в смеси буду с помощью весов.

Теперь определяется масса нетто **баллонов с чистыми компонентами**:

$$\begin{aligned} V_{O_2} &:= 50 \text{ l} & V_{Xe} &:= 10 \text{ l} & V_{Kr} &:= 20 \text{ l} \\ p_{O_2} &:= 151.013 \text{ bar} & p_{Xe} &:= 81.013 \text{ bar} & p_{Kr} &:= 151.013 \text{ bar} \\ z_{O_2} &:= 0.936 & z_{Xe} &:= 0.248 & z_{Kr} &:= 0.721 \quad (\text{Refprop, T, p}) \end{aligned}$$

Количество молей каждого из компонентов в начальных баллонах (без учета чистоты компонентов):

$$\nu_{O_2} := \frac{p_{O_2} \cdot V_{O_2}}{z_{O_2} \cdot R \cdot T} = 330.966 \text{ mol} \quad \nu_{Xe} := \frac{p_{Xe} \cdot V_{Xe}}{z_{Xe} \cdot R \cdot T} = 134.023 \text{ mol} \quad \nu_{Kr} := \frac{p_{Kr} \cdot V_{Kr}}{z_{Kr} \cdot R \cdot T} = 171.864 \text{ mol}$$

Массы каждого из компонентов в начальных баллонах (без учета чистоты компонентов):

$$m_{O_2} := \frac{p_{O_2} \cdot V_{O_2}}{z_{O_2} \cdot R_{O_2} \cdot T} = 10.591 \text{ kg} \quad m_{Xe} := \frac{p_{Xe} \cdot V_{Xe}}{z_{Xe} \cdot R_{Xe} \cdot T} = 17.597 \text{ kg} \quad m_{Kr} := \frac{p_{Kr} \cdot V_{Kr}}{z_{Kr} \cdot R_{Kr} \cdot T} = 14.385 \text{ kg}$$

Вводятся учитывание чистоты компонентов:

$$c_{O_2} := 99.9999\% \quad c_{Xe} := 99.9995\% \quad c_{Kr} := 99.9999\% \quad c_{cm} := 99.999\%$$

Тогда после заправки в начальных баллонах должно остаться (с учетом чистоты компонентов):

$$\delta\nu_{O_2} := (\nu_{O_2} - \nu_{O_2}) \cdot c_{O_2} = 325.897 \text{ mol} \quad \delta\nu_{Xe} := (\nu_{Xe} - \nu_{Xe}) \cdot c_{Xe} = 89.496 \text{ mol}$$

$$\delta\nu_{Kr} := (\nu_{Kr} - \nu_{Kr}) \cdot c_{Kr} = 171.026 \text{ mol}$$

В рамках данной задачи расчетом температуры и энтропии смешения можно пренебречь.

Учтем последовательность смешения и определим физические параметры ксенона и промежуточной бинарной смеси Kr+Xe:

Для ксенона:

Требуемая масса ксенона в смеси: $m_{Xe_cm} := m_{Xe} = 5.846 \text{ kg}$ $\nu_{Xe_cm} := \frac{m_{Xe_cm}}{\mu_{Xe}} = 44.526 \text{ mol}$

Плотность газа в смесевом баллоне: $\rho_{Xe_cm} := \frac{m_{Xe_cm}}{V} = 1461.559 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Давление ксенона в смесевом баллоне:

$$p_{Xe_cm} := \text{PropsSI}("P", "T", "D", \rho_{Xe_cm}, "Xenon") \cdot Pa = 65.535 \text{ bar}$$

Для ксенона и криптона:

Требуемая масса криптона в смеси: $m_{Kr_cm} := m_{Kr} = 70.148 \text{ gm}$ $\nu_{Kr_cm} := \frac{m_{Kr_cm}}{\mu_{Kr}} = 0.838 \text{ mol}$

Масса полученной криптоно-ксеноновой смеси: $m_{XeKr_cm} := m_{Kr_cm} + m_{Xe_cm} = 5.916 \text{ kg}$

Количество молей криптоно-ксеноновой смеси: $\nu_{XeKr_cm} := \nu_{Xe} + \nu_{Kr} = 45.364 \text{ mol}$

Мольные концентрации компонентов криптоно-ксеноновой смеси:

$$c_{Xe_XeKr} := \frac{\nu_{Xe}}{\nu_{XeKr_cm}} = 98.153 \text{ 1\%} \quad c_{Kr_XeKr} := \frac{\nu_{Kr}}{\nu_{XeKr_cm}} = 1.847 \text{ 1\%}$$

Плотность газа в смесевом баллоне при находящемся там уже ксеноне:

$$\rho_{XeKr_cm} := \frac{m_{XeKr_cm}}{V} = 1479.096 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Давление в смесевом баллоне: $p_{XeKr_cm} := 6.859 \text{ MPa} = 68.59 \text{ bar}$

Далее приведены таблицы полученных параметров:

Таблица с параметрами веществ в исходных баллонах:

Компонент	V (<i>л</i>)	ν (<i>mol</i>)	m (<i>kg</i>)	ρ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{м}^3} \right)$	p (<i>bar</i>)	z	Чистота
"Хе"	10	134.023	17.597	1759.718	81.013	0.248	99.9995%
"Кр"	20	171.864	14.385	719.25	151.013	0.721	99.9999%
"O2"	50	330.966	10.591	211.819	151.013	0.936	99.9999%

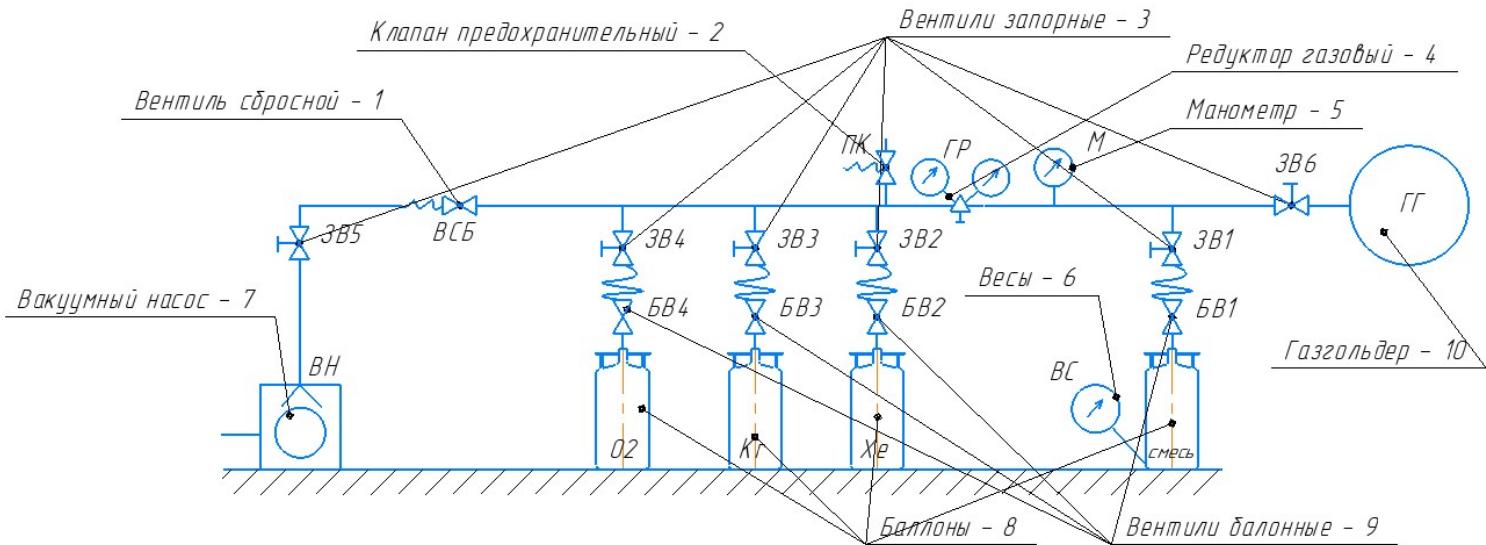
Таблица с параметрами веществ при последовательной заправке компонентами (от первого до конечной смеси):

Компонент (<i>ы</i>)	V (<i>л</i>)	ν (<i>mol</i>)	m (<i>kg</i>)	ρ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{м}^3} \right)$	p (<i>bar</i>)	z	
"Хе"	4	44.526	5.846	1461.559	19.227	0.2407	
"Кр&Хе"	4	45.364	5.916	1479.096	61.173	0.2482	
"Кр&Хе&O2"	4	50.433	6.079	1519.652	101.013	0.5815	- конечная смесь

Таблица с параметрами веществ в исходных баллонах (после смешения) :

Компонент	V (<i>л</i>)	ν (<i>mol</i>)	m (<i>kg</i>)	ρ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{м}^3} \right)$	p (<i>bar</i>)	z	Чистота
"Хе"	10	89.497	11.751	1175.1	62.609	0.287	99.9995%
"Кр"	20	171.026	14.315	715.75	150.02	0.721	99.9999%
"O2"	50	325.896	10.429	208.58	148.24	0.936	99.9999%

2. Схема системы, описание аппаратов и узлов



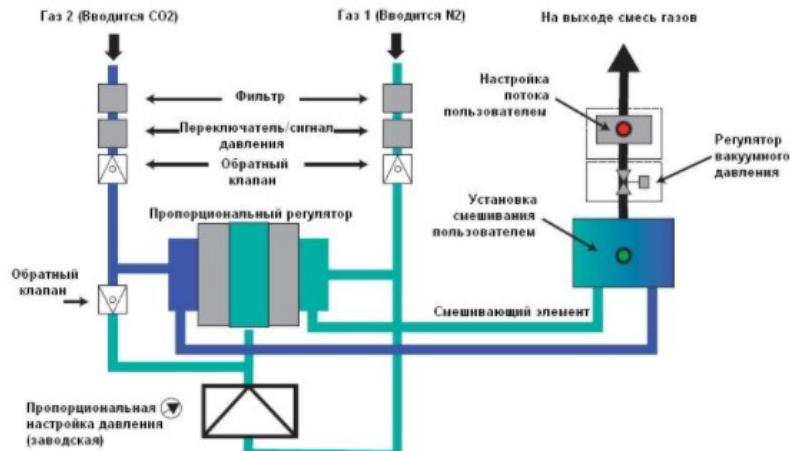
Возможна альтернативная схема для смешения, включающая в себя газосмеситель с регулируемым электрическим соленоидным вентилем (ниже рисунок, описывающий работу). Однако это на порядок увеличит капитальные затраты на сборку конструкции.

При поиске не нашел 3 компонентных газосмесителей которые расчитаны на выходное давление 100 бар. Поэтому, в случае если все таки использовать газосмеситель, придется еще устанавливать компрессор чтобы повышать давление.

Технические характеристики.

Точность	Абсолютная +/- 2 % в диапазоне 15-100%
Ввод/вывод газа	Через заднюю панель
Настройка смешивания	Ручная
Сигналы	Сигнал о давлении на входе с визуальной индикацией для каждого газа на задней панели. Звуковой сигнал при слишком низком давлении на входе.
Корпус	Нержавеющая сталь
Конфигурация.	
MapMix 9001 ME для термоформеров и трейсеров: буфер	Макс. давление на выходе, бар
25 - 250 л, 2 газа	6
100 - 400 л, 2 газа	6
100 - 1000 л, 2 газа	6
20 - 200 л, 3 газа	5
100 - 400 л, 3 газа	5

Схема работы смесителя.



Сбросной вентиль - 1.

Присоединительный размер M1 - 3/4".

Ссылка:

https://predklapan.ru/products/klapan_sbrosa

Клапан предохранительный - 2.

Присоединительный размер M1 - 3/4". Тип DA-08.

Ссылка:

https://predklapan.ru/products/predohranitelnyj_klapan_kriogennyj_tipa_da08

Запорный вентиль - 3.

Мембранный регулировочный вентиль GCE DRUVA MVR-A 3100 G/W

Присоединительный размер М1 - 3/4".

Ссылка:

https://predklapan.ru/products/membrannyj_regulirovochnyj_ventil_gce_druva_mvra_3100_gw

Газовый редуктор - 4.

Присоединительный размер М1 - 3/4". РЕДУКТОР GCE ГАЗОВЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ MULTISTAGE S2+

Ссылка:

https://predklapan.ru/products/reduktor_gce_gazovyj_meditinskij_multistage_s2

Манометр - 5.

Манометр точных измерений (МТИ - 10), Класс точности - 0.4, до 160 бар. Значит погрешность составляет: $+-(0,4 \cdot 1,6) = +0,64$ бар

Ссылка:

https://rosma.spb.ru/manometers/manometry_tochnykh_izmerenij/

Весы - 6.

Весы лабораторные AND GP-100K (Дискретность - $\epsilon = 1$ г, класс точности - 2, внутренняя калибровка, тогда пределы доп. погрешности: $+0,5\epsilon = +0,5$ г (ГОСТ Р 53228-2008))

Ссылка:

https://www.nv-lab.ru/catalog_info.php?ID=3365&Full=1

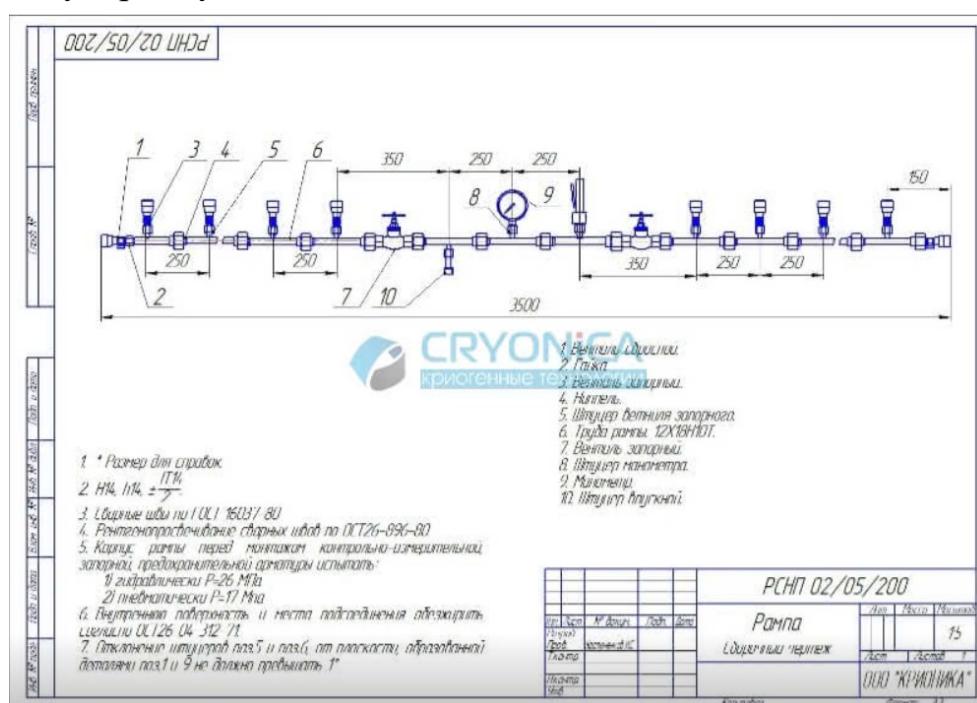
Вакуумный криогенный насос - 7.

Сpirальный насос НВСП-4

Ссылка:

<https://vacma.ru/product/vakuumnye-nasosy/sukhoy-spiralnyy-vakuumnyy-nasos-nvsp-4-skorost-4-3-m3-ch/>

Однако куда более целесообразно взять готовое изделие с готовым полным комплектом документов (паспортами на клапаны, арматурой, сертификатом соответствия техническому регламенту). Нашел готовое решение - составную наполнительницу рампу перепускную рампу на 5 баллонов. РСНП 02/5/200.



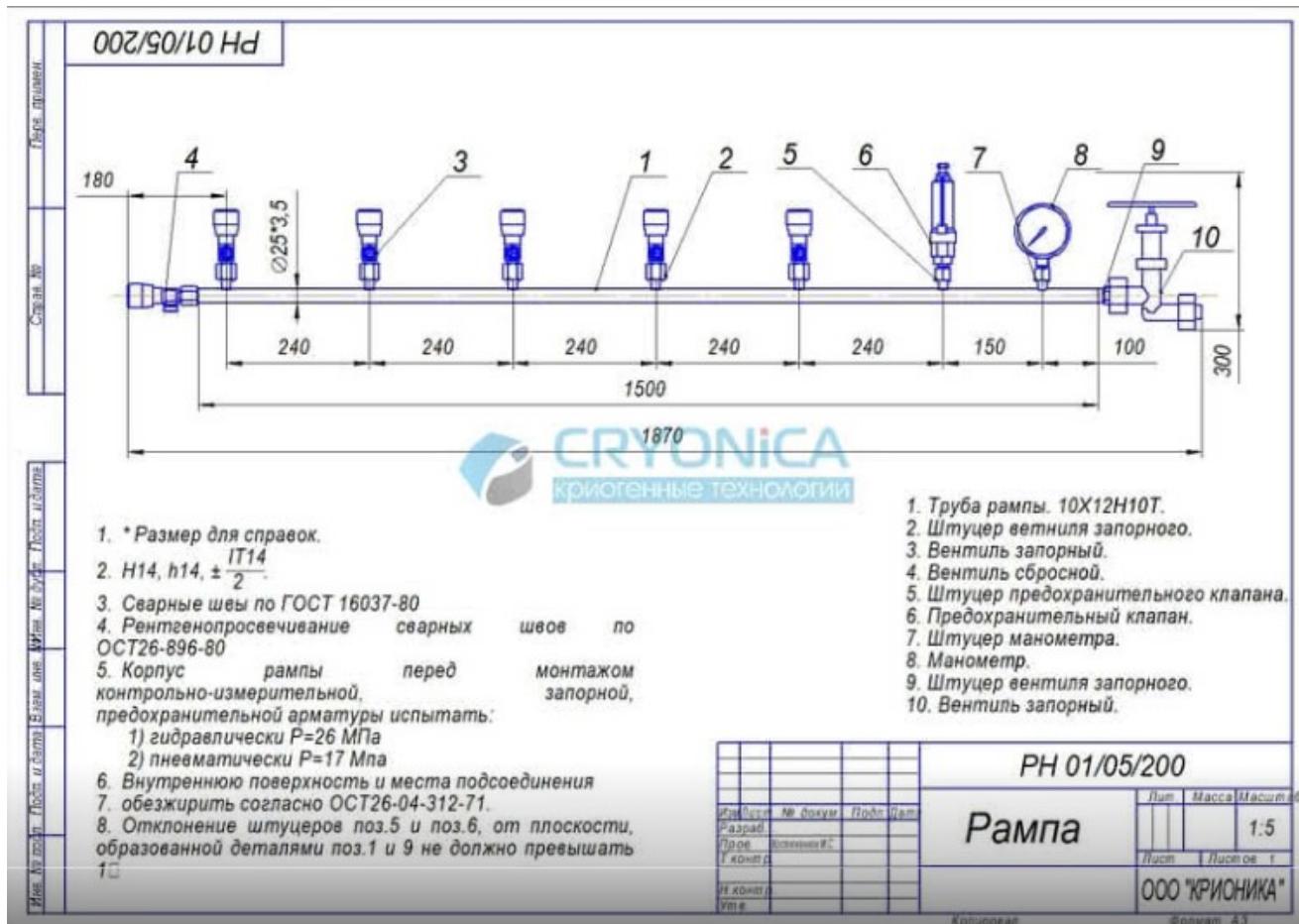
Ссылка на рампу - https://predklapan.ru/products/rsnp_025200

Данная рампа соответствует всем предъявляемым к ней техническим требованиям.

Комплектность:

1. Труба рампы.
2. Левая ветвь.
 - 2.1. Сбросной вентиль.
 - 2.2. Запорные вентили (рабочие).
 - 2.3. Запорный рамповый вентиль.
3. Правая ветвь.
 - 3.1. Сбросной вентиль.
 - 3.2. Запорные вентили (рабочие).
 - 3.3. Запорный рамповый вентиль.
4. Центральная часть.
 - 4.1. Манометр.
 - 4.2. Предохранительный клапан (по согласованию).
 - 4.3. Понижающий регулятор давления(по согласованию).
 - 4.4. Выход газа.

Либо альтернативная версия, с одним коллекторным ответвлением. РН 01/05/200 - рампа наполнительная для подключения пяти баллонов.

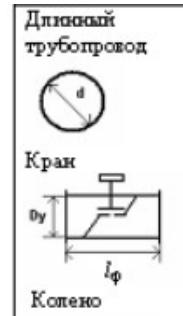


Ссылка - https://predklapan.ru/products/rn_0105200

2.1. Расчет проводимости системы при вакуумировании.

Вакуумный насос подобран (НВСп-4), осталось проверить удовлетворяет ли он требованиям. Размеры и диаметры коллекторов и всех узлов, полости которых занимает газ, будут взяты из подобранный газовой рампы РН 01/05/200.

Предельное остаточное давление, мбар	$3 \cdot 10^{-2}$	(30 Па)
Предельное остаточное давление, мм.рт.ст.	0,022	
Быстрота действия, м ³ /ч	4,3	
Тип насоса	Сpirальный	
Вход Ду	25	
Выход Ду	16	
Мощность двигателя, кВт	0,37	



$$\text{Дл. воздуха при } T = 293 \text{ К} \\ U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (2.22)$$

$$I_{\text{расq}} = (2-3) I_\phi \quad (2.24)$$

pg 78

$$d := 25 \text{ mm} \quad l := 1500 \text{ mm} \quad p_{atm} := 1 \text{ atm} \quad p_{vac} := 50 \text{ Pa}$$

Проводимость определяется по формуле:

$$U := 1.36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{(p_{atm} + p_{vac})}{2} = 17951.823 \frac{l}{s}$$

Поток откачиваемого вакуумным насосом воздуха определяется следующей формулой:

$$Q := U \cdot (p_{atm} - p_{vac}) = (1.818 \cdot 10^6) \frac{\text{Pa}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Поток вакуумируемого газа можно найти через производительность насоса:

$$Q = S_H \cdot p_{o.c.} \quad S_H := \frac{Q}{p_{atm}} = 17.943 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Из основного уравнения вакуумной техники определим эффективную производительность откачки:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{S_0} - \frac{1}{S_H} \quad S_0 := \frac{S_H \cdot U}{S_H + U} = 8973.696 \frac{l}{s}$$

3. Измерение и контроль состава смеси, методы разделения исходной смеси на начальные компоненты (без расчета).

Измерять и контролировать состав смеси в процессе наполнения можно по массе каждого из компонентов. Это реализовывается с помощью электронных лабораторных весов. Так же на газовом редукторе стоит манометр, который позволит фиксировать давление в баллоне.

После заполнения баллона смесью, можно направить пробу в хроматограф или масс-спектрометр и более точно проанализировать состав смеси.

Разделить смесь можно как традиционными криогенными методами - ректификацией, так и адсорбционными методами (метод фракционированной десорбции активированного угля). В книге Бондаренко В.И. Симоненко Ю.М. "Криогенные технологии извлечения редких газов" представлена установка для очистки и разделения ксенон-криптоновой смеси:

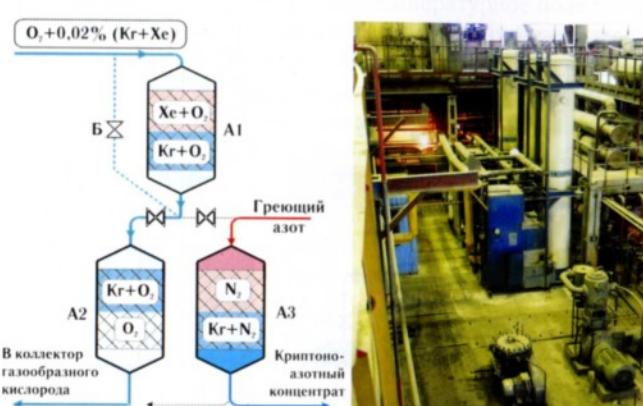


Рис. 8.5. Упрощенная схема адсорбционного блока для извлечения Кр и Хе и внешний вид блока из трех аппаратов в цехе:
A1 — ксеноновый; A2, A3 — криptonовые адсорбера;
Б — байпасная линия A1

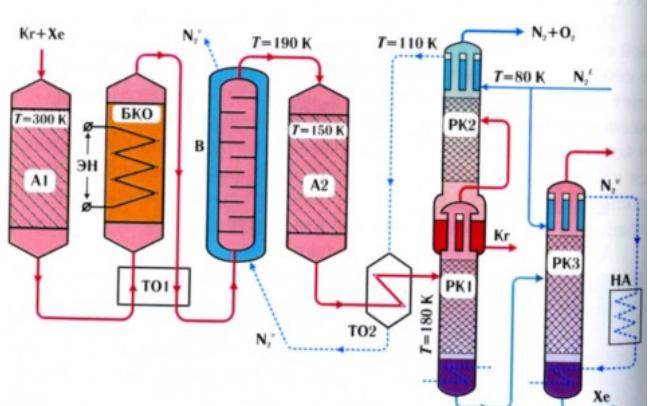


Рис. 8.7. Установка для очистки и разделения криптона и ксенона:
A1 и A2 — адсорбера; БКО — блок каталитической очистки;
B — вымораживатель примесей; ТО1 и ТО2 — теплообменники;
PK1-PK3 — ректификационные колонны; НА — нагреватель азота

4. Обеспечение требуемой чистоты смеси по основным компонентам.

Требуемая чистота смеси - 5.0. Расчет чистоты опять же можно провести по массам компонентов. Тогда избыток массы на примеси должен быть равен:

$$m_{u\delta} := (1 - c_{cm}) m = 0.061 \text{ гт}$$

Массы примесей каждого из компонентов в начальных баллонах и отношение масс требуемых для получения смеси и масс компонентов в начальных баллонах:

$$m_0 prg_{O2} := m_0 O2 \cdot (1 - c_{O2}) = 0.011 \text{ гт} \quad x_{O2} := \frac{m_{O2}}{m_0 O2} = 0.015$$

$$m_0 prg_{Xe} := m_0 Xe \cdot (1 - c_{Xe}) = 0.088 \text{ гт} \quad x_{Xe} := \frac{m_{Xe}}{m_0 Xe} = 0.332$$

$$m_0 prg_{Kr} := m_0 Kr \cdot (1 - c_{Kr}) = 0.014 \text{ гт} \quad x_{Kr} := \frac{m_{Kr}}{m_0 Kr} = 0.005$$

Тогда можно посчитать общую массу примесей, которая получится в конечном смесевом баллоне:

$$m_{np} := x_{O2} \cdot m_0 prg_{O2} + x_{Xe} \cdot m_0 prg_{Xe} + x_{Kr} \cdot m_0 prg_{Kr} = 0.029 \text{ гт}$$

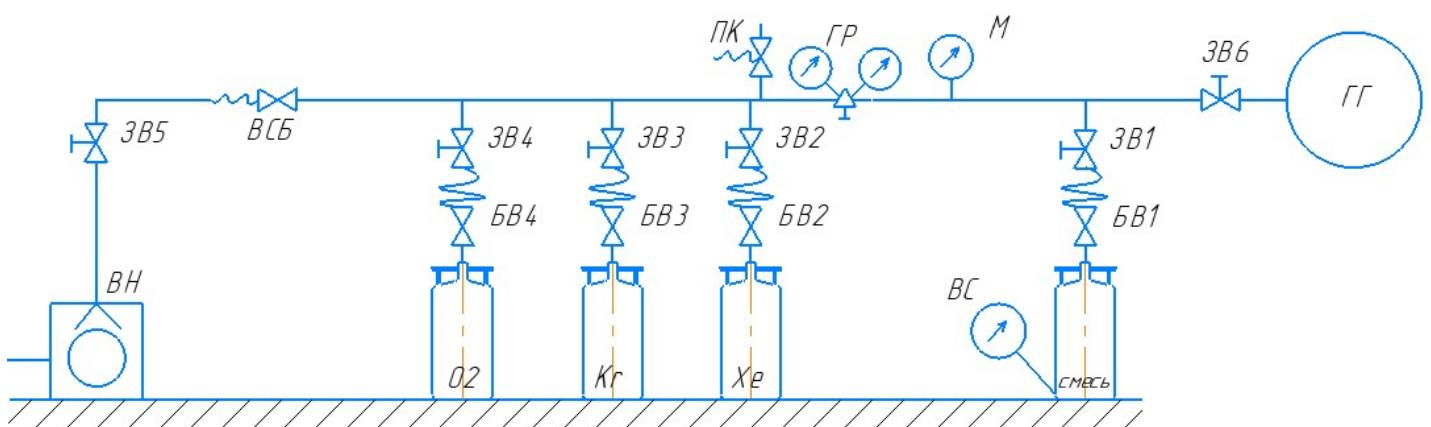
Еще следует учитывать факт несовершенства вакуумирования, наличия потоков десорбции молекул примесей, адсорбированных на внутренних стенках арматуры. Однако, суммарно масса примесей этих явлений на порядок меньше, поэтому примем ее:

$m_{oth} := 0.01 \text{ гт}$

Таким образом, считаю что **чистота смеси обеспечена**, и расчетный запас на примеси составляет:

$$\delta := m_{u\delta} - m_{np} - m_{oth} = 0.021 \text{ гт}$$

1*. Алгоритм действий.



1. Проверить состояние всех клапанов, вентилей и убедиться что они все закрыты
2. Открыть клапаны БВ1 и ЗВ1 смесевого баллона, открыть клапан редуктора ГР. Открыть вентиль вакуумного насоса ЗВ5 и вентиль сброса ВСБ.
3. Включить вакуумный насос и начать вакуумировать до показаний вакууметра 35..50 Па.
4. После вакуумирования, последовательно закрываем клапаны ЗВ1, после БВ1, потом ВСБ и ЗВ5.
5. Система подготовлена к смешению, ОЧЕНЬ плавно открываем ЗВ2, а потом БВ2. Контроль расхода баллона контролируется по весам ВС. Начинаем постепенно призакрывать вентили когда весы ВС1 будут приближаться к значению 5.8 кг. Когда вес будет равен 5.846 кг; БВ2, ЗВ2 и БВ1, ЗВ1 должны быть полностью закрыты.
6. В системе есть избыточное давление, поэтому нужно сбросить избытки газгольдер ГГ. Открываем ЗВ6 и ждем пока манометр не будет показывать давление, близкое к атмосферному. После закрываем ЗВ6.
7. Опять вакуумируем систему, открыв вентиль вакуумного насоса ЗВ5 и вентиль сброса ВСБ до 35..50 Па. После вакуумирования, последовательно закрываем клапаны ВСБ и ЗВ5.
8. Производим смешение ксенона с криptonом. Для этого плавно открываем ЗВ3, а потом БВ3. Контроль расхода баллона контролируется по весам ВС. Начинаем постепенно призакрывать вентили когда весы ВС1 будут приближаться к значению 5.9 кг. Когда вес будет равен 5.916 кг, БВ3, ЗВ3 и БВ1, ЗВ1 должны быть полностью закрыты.
9. В системе опять избыточное давление, поэтому нужно сбросить избытки газгольдер ГГ. Открываем ЗВ6 и ждем пока манометр не будет показывать давление, близкое к атмосферному. После закрываем ЗВ6.
10. Опять вакуумируем систему, открыв вентиль вакуумного насоса ЗВ5 и вентиль сброса ВСБ до 35..50 Па. После вакуумирования, последовательно закрываем клапаны ВСБ и ЗВ5.
11. Производим смешение ксенона и криптона с кислородом. Для этого плавно открываем ЗВ4, а потом БВ4. Контроль расхода баллона контролируется по весам ВС4 и ВС1. Начинаем постепенно призакрывать вентили когда весы ВС1 будут

приближаться к значению 6 кг. Когда вес будет равен 6.079 кг, ЗВ4, ЗВ4 и ЗВ1, ЗВ1 должны быть полностью закрыты.

12. В системе опять избыточное давление, поэтому нужно сбросить избытки газгольдер ГГ. Открываем ЗВ6 и ждем пока манометр не будет показывать давление, близкое к атмосферному. После закрываем ЗВ6.

13. Можно скручивать с поводка баллон со смесью, после уже можно проверять чистоту смеси и соответствие концентраций заявленным с помощью таких методов как хроматография или спектрометрия.

5*. Расчет погрешности финальной смеси (массовый и манометрические методы).

Компонент (ы)	<i>V</i>	<i>v</i>	<i>m</i>	<i>ρ</i>	<i>p</i>	<i>z</i>
(<i>l</i>)	(<i>mol</i>)	(<i>kg</i>)	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	(<i>bar</i>)		
"Хе"	4	44.526	5.846	1461.559	19.227	0.2407
"Кг&Хе"	4	45.364	5.916	1479.096	61.173	0.2482
"Кг&Хе&O2"	4	50.433	6.079	1519.652	101.013	0.5815 - конечная смесь

Манометрический метод:

Делаются 3 последовательных измерения, значит нужно провести итерационный расчет.

Манометр точных измерений(МТИ - 10), Класс точности - 0.4, до 160 бар. Значит погрешность составляет: $+-(0.4*1.6) = +0.64$ бар $\delta p := 0.64 \text{ bar}$

Первый компонент:

$$\delta p_{1min} := p_1 - \delta p - 1 \text{ atm} = 17.574 \text{ bar} \quad \delta p_{1max} := p_1 + \delta p - 1 \text{ atm} = 18.854 \text{ bar}$$

$$\delta p_1 := \frac{\delta p_{1max} - \delta p_{1min}}{z_1} = 5.318 \text{ bar}$$

Второй компонент:

$$\delta p_{2min} := p_2 - \delta p - 1 \text{ atm} = 59.52 \text{ bar} \quad \delta p_{2max} := p_2 + \delta p - 1 \text{ atm} = 60.8 \text{ bar}$$

$$\delta p_2 := \frac{\delta p_{2max} - \delta p_{2min}}{z_2} = 5.157 \text{ bar}$$

Третий компонент:

$$\delta p_{3min} := p_3 - \delta p - 1 \text{ atm} = 99.36 \text{ bar} \quad \delta p_{3max} := p_3 + \delta p - 1 \text{ atm} = 100.64 \text{ bar}$$

$$\delta p_3 := \frac{\delta p_{3max} - \delta p_{3min}}{z_3} = 2.201 \text{ bar}$$

$$\delta p_{sum} := \delta p_1 + \delta p_2 + \delta p_3 = 12.676 \text{ bar} \quad p_{min} := p_3 - \delta p_{sum} = 88.337 \text{ bar} \quad p_{max} := p_3 + \delta p_{sum} = 113.689 \text{ bar}$$

$$n_{min} := \frac{p_{min} \cdot V}{z \cdot R \cdot T} = 24.93 \text{ mol} \quad n_{max} := \frac{p_{max} \cdot V}{z \cdot R \cdot T} = 32.085 \text{ mol} \quad \delta n := \frac{n_{max} - n_{min}}{2} = 3.577 \text{ mol}$$

Итоговая погрешность при манометрическом методе составит:

Массовый метод:

Делаются 3 последовательных измерения, значит суммарная погрешность измерений будет равна сумме погрешностей всех трех измерений.

Весы лабораторные AND GP-100K (Дискретность - $\epsilon = 1 \text{ г}$, класс точности - 2, внутренняя калибровка, тогда пределы доп. погрешности: $+0.5\epsilon = +0.5 \text{ г}$ (ГОСТ Р 53228-2008))

$$\delta m := 0.5 \text{ г}$$

Измерения не влияют на диапазон погрешности, тогда: $m_{sum} := 3 \cdot m = 1.5 \text{ г}$

$$m_{min} := m - \delta m_{sum} = (6.078 \cdot 10^3) \text{ г} \quad m_{max} := m + \delta m_{sum} = (6.081 \cdot 10^3) \text{ г}$$

$$n_{min} := \frac{m_{min}}{\mu_{cm}} = 61.308 \text{ mol} \quad n_{max} := \frac{m_{max}}{\mu_{cm}} = 61.339 \text{ mol} \quad \delta n := \frac{n_{max} - n_{min}}{2} = 0.015 \text{ mol}$$

Итоговая погрешность при массовом методе составит: $n_{cm} = 50.433 \pm 0.015 \text{ mol}$

В итоге можно сделать вывод что использование весов наиболее точно, однако более затратно.