

УДК 621.565

**В.Л. Бондаренко**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Лефортовская наб., 1, факультет «Энергомашиностроение», г. Москва, РФ, 105005  
e-mail: nadia@iceblick.com

**Н.П. Лосяков\*, Ю.М. Симоненко\*\***

ООО «Айсблик», Пастера, 29, г. Одесса, Украина, 65026

\*e-mail: lnp@yandex.ru,

\*\*e-mail: ysim1@yandex.ru

**О.В. Дьяченко\*, Т.В. Дьяченко\*\*, И.А. Бугайчук**

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, Украина, 65082

\*e-mail: diachenko-ov@yandex.ru,

\*\*e-mail: victory04@yandex.ru

## СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ РЕДКИХ ГАЗОВ

*Рассмотрены промышленные и лабораторные методы приготовления газовых смесей. Показаны преимущества и недостатки объёмных и поточных смесителей, названы области их рационального использования. Даны примеры расчёта количества компонентов при получении смесей манометрическим и гравиметрическим методами. Созданы системы для приготовления смесей в виде криогенных жидкостей. Указываются условия фазового равновесия, при которых получают заданные составы продуктов. Исследованные технологии могут найти применение при получении смесей для пищевых и сварочных производств, подводных аппаратов, газового анализа, лазерной промышленности, электроники и медицины.*

**Ключевые слова:** Редкие газы. Газовые смеси. Системы получения смесей.

**V.L. Bondarenko, N.P. Losyakov, Yu.M. Simonenko, O.V. Diachenko, T.V. Diachenko, I.A. Bugaychuk**

## SYSTEMS FOR PREPARATION MIXTURES BASED ON RARE GASES

*The industrial and laboratory methods for gas mixtures preparation are considered. The advantages and defects of three-dimensional and flow mixers are shown; the spheres of their rational using are specified. Examples of calculation of components quantity in mixtures preparation by manometric and gravimetric methods are given. There are developed the systems for mixtures preparation in the form of cryogenic liquids. There are determined the conditions of phase equilibrium, under which the given compositions of the products are received. Investigated technologies can be used at reception of mixtures for food and welding production, undersea devices, gas analysis, lazer industry, electronics and medicine.*

**Keywords:** Rare gases. Gas mixture. Systems of mixtures preparation.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

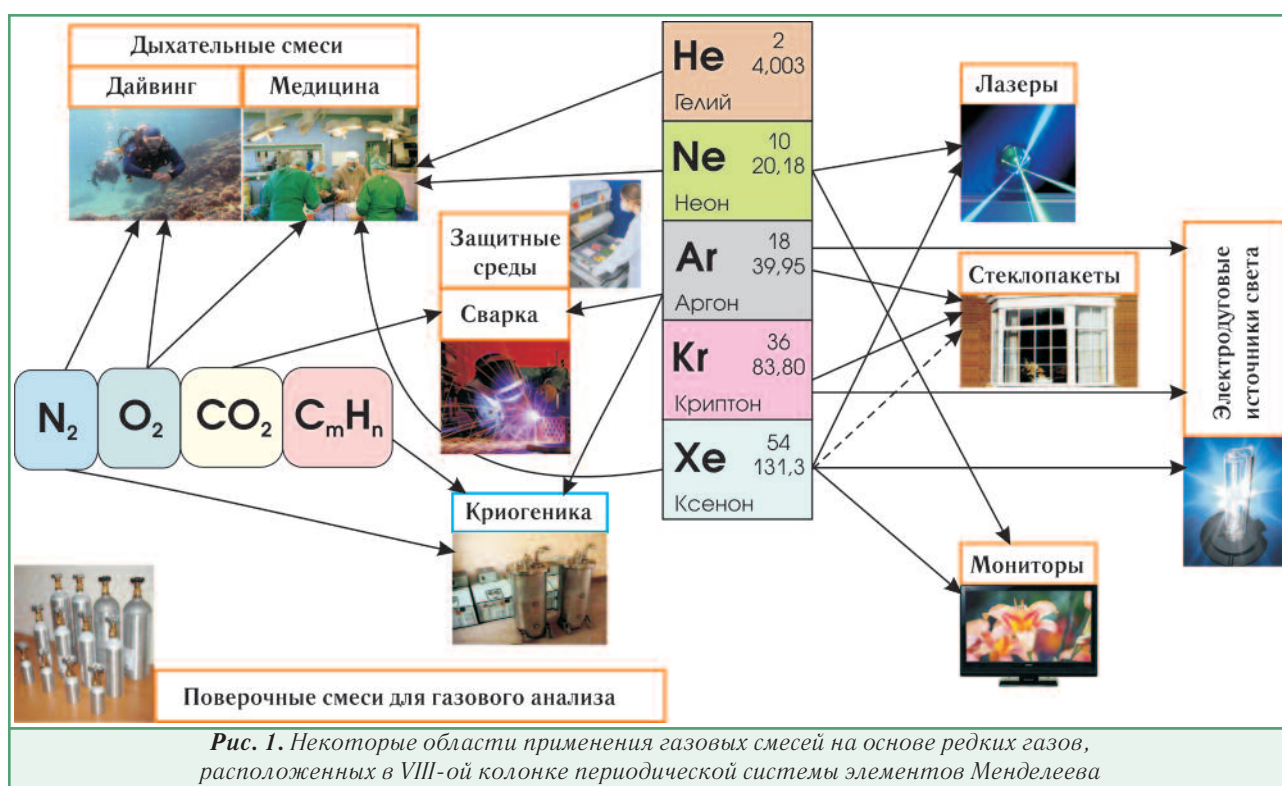
Во многих современных технологиях применяются смеси, в состав которых входят гелий, неон и тяжёлые редкие газы. Эти компоненты обладают рядом уникальных свойств и их введение в состав защитных, лазерных и дыхательных газов позволяет получить ощутимый положительный эффект [1]. Растущие объёмы потребления смесей и многообразие их составов обусловили появление множества смесительных устройств. Однако не все они пригодны для получения газовых сред, в состав которых входят относительно дорогие компоненты (Ne, Kr, Xe и их стабильные изотопы). В работе рассмотрены основные мето-

ды приготовления смесей с заданной концентрацией компонентов, в том числе редких газов.

### 2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Остановимся на некоторых сферах использования многокомпонентных газовых продуктов (рис. 1). Важнейшим предназначением искусственно приготовленных смесей является создание защитной среды. Эта функция позволила внедрить в пищевую отрасль герметичные упаковки с модифицированными газовыми составами. В отличие от вакуумного хранения, инертные среды сберегают натуральные качества продукта и сохраняют его форму. В осветительных приборах ис-

© В.Л. Бондаренко, Н.П. Лосяков, Ю.М. Симоненко, О.В. Дьяченко, Т.В. Дьяченко, И.А. Бугайчук



пользуют смеси на основе тяжёлых инертных газов (Ar, Kr и Xe). Исключение взаимодействия раскалённых нитей с кислородом и снижение тепловых потерь позволяют повысить мощность и продлить срок службы специальных ламп накаливания.

Современные технологии электродуговой сварки базируются на применении многокомпонентных смесей на основе аргона, диоксида углерода, гелия и других промышленных газов. Этим гарантируется высокое качество соединения и повышается производительность сварочных работ. Уменьшается себестоимость сварных соединений за счёт снижения потерь электродного металла на «разбрызгивание» и трудоёмкости обработки области сварного шва. Защитные качества смесей востребованы также при пайке, плавлении и горячей обработке металлов в электронике и прецизионном машиностроении.

Перспективная область применения газовых смесей — эксимерные лазеры (таблицы 1 и 2). Эти приборы являются мощнейшими источниками ультрафиолетового излучения и применяются во многих современных технологиях. Активное тело таких лазеров — многокомпонентная газовая среда на основе галогенов, а также He, Ne, Ar, Kr и Xe. Ксенон в сочетании с другими редкими газами используется также для наполнения ячеек плоских мониторов. Такая панель содержит миллионы капсул, из которых каждые три (зелёная, красная, синяя) образуют одну точку на экране. Управляемый разряд вызывает ионизацию и свечение газа, в результате которых формируется «холодная плазма» (что отразилось в названии телевизионных экранов).

Кислород в сочетании с редкими газами используется в лечебной практике, диагностике и анестезии. Например, кислородно-гелиевая смесь (гелиокс) не-

обходима при лечении дыхательной недостаточности. Ксенон в составе смесей с кислородом применяется для диагностики мышечного кровотока, состояния лёгких; в компьютерной томографии; для лечения невротозов и посттравматических синдромов. Уникальные свойства стабильных изотопов гелия-3, неона-21 и ксенона-129 позволяют использовать их для визуализации в системах ядерного магнитного резонанса при диагностике лёгочной микроструктуры.

**Таблица 1.** Компоненты для приготовления лазерных смесей

Диоксид углерода — азот
Диоксид углерода — азот — гелий
Гелий (<40 %) — азот — диоксид углерода
He + CO + CO <sub>2</sub> + Xe + O <sub>2</sub>

**Таблица 2.** Смесей для эксимерных лазеров

Аргон — гелий — неон
Фтор (5 %) — гелий
Фтор — аргон — гелий
Фтор — аргон — гелий — неон
Фтор — аргон — неон
Фтор — криптон — неон

Гипербарические дыхательные смеси формируются преимущественно на основе гелия и кислорода. Такие среды необходимы для обеспечения глубоководных погружений в автономном снаряжении и кессонных аппаратах. При этом, по мере возрастания давления объёмная доля кислорода в газе снижается до нескольких процентов (рис. 2).

Эталонные (поверочные) газовые смеси используются для метрологического обеспечения газоанали-

тических средств, которые неотъемлемы во многих технологических процессах. Достоверная информация о компонентном составе потоков и стационарных газовых объёмов — основа эффективности и безопасности производств.

Названные примеры охватывают далеко не всю сферу применения комбинированных газовых продуктов, которые также востребованы в строительной отрасли, холодильной технике, энергетике и ряде других отраслей.

### 3. СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

#### 3.1. Дозаторы непрерывного действия

Для получения двух- и многокомпонентных потоков с расходом десятки и сотни м<sup>3</sup>/ч нашли распространение смесительные устройства, в которых концентрации отдельных веществ устанавливаются пропорционально величине гидравлического сопротивления соответствующих каналов. Расход газа через калиб-

**Таблица 3.** Расчётные соотношения для определения сечения дозатора  $F$  при истечении аргона с расходом  $V_0=100$  м<sup>3</sup>/ч [2,3], приведённым к условиям  $p_0=0,1$  МПа и  $T_0=293$  К

Параметр, обозначение, размерность	№ форм.	Численное значение
1. Исходные данные, характеристики газа и режима истечения		
1.1. Атомная масса аргона $M$ , кг/кмоль		39,95
1.2. Удельная газовая постоянная аргона $\bar{R}=R_0/M=8314/M$ , Дж/кг·К	(1)	208
1.3. Массовый расход аргона $G=\frac{10^6 p_0 V_0}{3600 T_0 \bar{R}}=0,0948 \frac{V_0}{\bar{R}}$ , кг/с	(2)	0,046
1.4. Показатель адиабаты $k^*$		1,68
1.5. Критическое отношение давлений $\epsilon_{кр}=\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	(3)	2,06
1.6. Параметры потока перед сужением канала	Начальное давление $p_n$ , МПа (абс.) Температура потока на входе $T_n$ , К	1,0 285
2. Истечение со сверхкритическим отношением давлений при $\epsilon > \epsilon_{кр}$ [давление за соплом $p_k$ не влияет на связь $V_0=f(F)$ ]		
2.1. Давление после сопла $p_k$ , МПа (абс.)		0,4
2.2. Располагаемое отношение давлений $\epsilon=p_n/p_k$	(4)	2,5 (>2,06)
2.3. Сечение, требуемое для протекания заданного расхода $V_0$ , $F=G \frac{\sqrt{\bar{R} T_n}}{p_n} \left(\frac{k+1}{2k}\right)^{1/2} \left(\frac{k+1}{2}\right)^{1/(k-1)}$ , мм <sup>2</sup>	(5)	$\frac{\sqrt{59280}}{1,0} \frac{0,046}{\sqrt{1,254(0,746)^{2,94}}}=15,4$
2.4. Диаметр канала $d=2\sqrt{F/\pi}$ , мм	(6)	4,4
3. Истечение с докритическим отношением давлений при $\epsilon < \epsilon_{кр}$ [давление за соплом $p_k$ оказывает влияние на связь $V_0=f(F)$ ]		
3.1. Давление после сопла $p_k$ , МПа (абс.)		0,625
3.2. Располагаемое отношение давлений $\epsilon=p_n/p_k$	(4)	1,6 (<2,06)
3.3. Сечение, требуемое для протекания заданного расхода $V_0$ , $F=G \frac{\sqrt{\bar{R} T_n}}{p_n} \left(\frac{k-1}{2k}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{2/k} - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{(k+1)/k}\right]^{-1/2}$ , мм <sup>2</sup>	(7)	$243 \frac{0,046}{\sqrt{4,94[(0,625)^{1,19} - (0,625)^{1,6}]}=16,1$
3.4. Диаметр канала $d=2\sqrt{F/\pi}$ , мм	(6)	4,5

**Примечание:** \*1) Принято значение показателя адиабаты для одноатомных газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe)  $k_1=1,67...1,68$ ; для двухатомных ( $O_2, N_2, H_2$ )  $k_2=1,4...1,41$ ; для многоатомных ( $CO_2, CH_4, NH_3$ )  $k_n=1,31...1,32$  [2].

**Таблица 4.** Сечения проточных частей дозаторов  $F$  для различных газов при условиях, соответствующих табл. 3 ( $p_n=1,0$  МПа;  $T_n=285$  К;  $V_0=100$  м<sup>3</sup>/ч)

Параметр, размерность, формула	Гелий	Неон	Азот	Криптон	Ксенон	Диоксид углерода
Сечение по формуле (5) для $p_k=0,4$ МПа, мм	4,9	11,0	13,8	22,3	28,3	17,7
Сечение по формуле (7) для $p_k=0,625$ МПа, мм	5,1	11,5	14,0	23,2	29,4	18,0
Погрешность вычислений по формулам (5) и (7), обусловленная сжимаемостью газов, %	-0,27	-0,23	0,14	2,1	2,8	3,0

рованное отверстие однозначно определяется свойствами вещества и давлениями [1]. Условные обозначения и пример расчёта сечения сопла для аргона представлены в табл. 3 и на рис. 3.

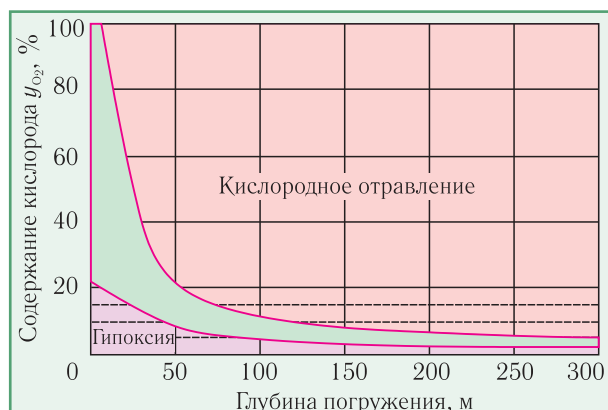


Рис. 2. Состав дыхательной смеси He-O<sub>2</sub> в зависимости от глубины погружения

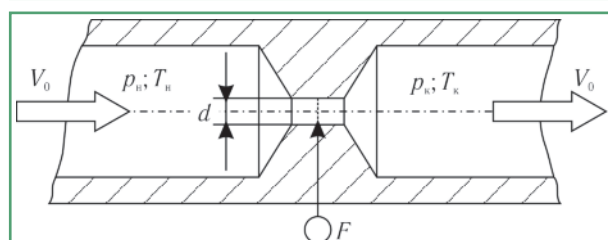


Рис. 3. К расчёту расходных характеристик сопла поточного смесителя (см. табл. 3)

Как следует из табл. 3, для одного и того же начального давления расчёт сечения дозирующего отверстия  $F$  по формулам (5) и (7) даёт близкие результаты. Проверим этот вывод для других газов. Результаты вычислений для условий, идентичных табл. 3, представлены в табл. 4.

Соотношения (5) и (7) справедливы для идеальных газов. Они применимы для большинства веществ, так как в поточных дозаторах обычно используются весьма умеренные давления. При температуре окружающей среды и давлениях  $p < 1$  МПа отклонения в плотности реального газа от идеального едва различимы. Названные отклонения начинают проявляться только у криптона, ксенона и диоксида углерода. Для повышения точности расчёта дозаторов Кг, Хе и СО<sub>2</sub> комплекс  $(\bar{R}T_n)^{1/2}/p_n$  в (5) и (7) предпочтительно заменить на величину  $(\rho_n p_n)^{-1/2}$ . При этом плотность  $\rho_n$  определяется по справочным данным для конкретного вещества при  $p_n$  и  $T_n$ . Влияние сжимаемости на точность вычисления размеров сопла наглядно показано в последней строке табл. 4.

Схема простейшего устройства динамического приготовления двухкомпонентной смеси показана на рис. 4,а. Как следует из табл. 3, важнейшим фактором, во многом обеспечивающим точность концентрации на выходе, является стабильность режимных параметров для компонентов 1 и 2 смеси ( $T_n$ ,  $p'_n$  и  $p''_n$ ). Поэтому весь комплекс арматуры, так или иначе, используется для выполнения этой задачи. На участке

дозирования компонентов (Д1, Д2 и Н2) поддерживается стабильное давление в каждом из каналов при помощи входных редукторов Rn1 и Rn2 типа «после себя». Для защиты этих регуляторов предусмотрены фильтры Ф1 и Ф2. Различие в свойствах и параметрах компонентов приводит к изменению температур потоков после их дросселирования в Rn1 и Rn2. Для выравнивания температур перед дозирующими элементами Д1 и Д2 применяется стабилизатор Т. Колебания давления в выходном канале также могут привести к нарушению баланса системы и необходимости ручной подстройки концентрации с помощью Н2. Этот недостаток компенсируется мембранным регулятором давления Rd12 типа «до себя» и ресивером Р. Однако их нивелирующие функции достаточно ограничены.

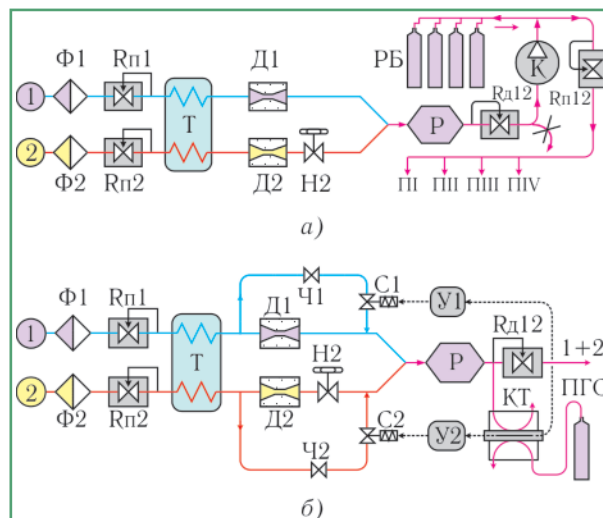


Рис. 4. Схемы приготовления бинарной смеси поточного типа из компонентов 1 и 2 с системой хранения в баллонах (а) или с контуром непрерывного поддержания состава смеси (б): Ф1, Ф2 — фильтры; Rn1, Rn2, Rn12 — типовые редукторы; Т — стабилизатор температуры; Д1, Д2 — дозирующие элементы постоянного сечения; Н2 — дозирующий вентиль компонента 2; Р — ресивер; Rd12 — регулятор давления смеси типа «до себя» [1]; П I-П IV — потребители; К — компрессор высокого давления; РБ — баллонная раampa; КТ — компаратор на основе детектора по теплопроводности; У1, У2 — преобразователи и усилители сигнала; С1 и С2 — управляющая арматура

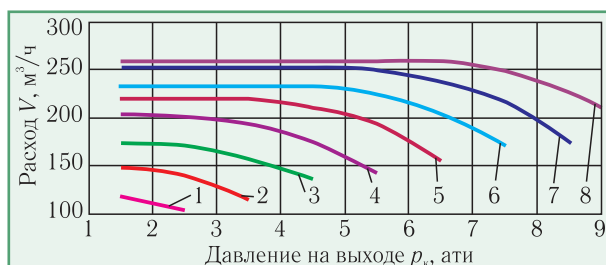
Проходные сечения дюз Д1 и Д2 согласуются не только с определённым составом смеси. Для конкретного уровня давлений ими задается расход потока на выходе согласно соотношениям (5), (7). Стабильная работа объёмного дозатора возможна при условии согласования его расходных характеристик с суммарным потреблением (точки П I-П IV на рис. 4,а). При этом ресивер Р не способен (да и не предназначен) для сглаживания длительных пиковых нагрузок, например, в сварочном производстве. Эту проблему радикально можно решить только с помощью вместительных газгольдеров или хранилища высокого давления. Показанный на рис. 4,а вариант согласования расходов включает компрессор К в баллонную раampa



**Фото 5.** Внешний вид (а) и устройство (б) поточного смесителя марки 8500CA50X2100 фирмы «Thermo Instrument Corporation»; внешний вид смесителя марки MG 200-2ME/3ME фирмы «WITT-Gasetechnik» (в)

РБ. Выдача потребителям смеси с постоянным давлением осуществляется через разрядный редуктор Рп12. Такая схема обеспечивает длительный период стабильной работы смесительного участка, в течение которого практически нет нужды в коррекции баланса с помощью вентиля Н2.

В случае повышенных требований к составу продукта практикуют непрерывный контроль качества. Для этого незначительная часть готового продукта отбирается и проходит через одну из веток компаратора К (рис. 4,б). Во второе плечо прибора, например, сравнивающего теплопроводности потоков, подаётся поверочная смесь из баллона ПГС. При отклонении свойств смеси от эталона мостовая схема компаратора генерирует соответствующий сигнал, который после усиления в блоках У1 (У2) приводит к срабатыванию клапанов С1 или С2, байпасирующих потоки компонентов. Степень управления составом и частотой срабатывания с помощью контура автоматики задаётся вентилями Ч1 и Ч2.



**Рис. 6.** Производительность по воздуху смесителей марки MG 200-2ME/3ME фирмы «WITT-Gasetechnik» при различных давлениях на выходе  $p_k$  и давлениях газа на входе  $p_n$ , атм: 1 — 5; 2 — 6; 3 — 7; 4 — 8; 5 — 9; 6 — 10; 7 — 11; 8 — 12

Ведущими производителями техники для динамического приготовления газовых смесей являются немецкая компания «WITT-Gasetechnik» и американская «Thermo Instrument Corporation». Образцы смесительной техники этих фирм хорошо зарекомендовали себя в различных сферах и, прежде всего, в сварочном производстве. Как правило, смесители снабжаются системой сигнализации, надёжными электро-

магнитными клапанами и удобным регулятором пропорции смешиваемых газов, который проградуирован в процентах одного из компонентов смеси. Некоторые образцы оборудования показаны на фото 5, а расходные характеристики смесителей — на рис. 6.

### 3.2. Методы смешения в замкнутом объёме

Смешение газов в баллонах гарантирует высокое качество получаемой смеси. Однако из-за периодичности процессов наполнения, перемешивания и анализа состава такая операция малопродуктивна.

**Гравиметрический (весовой) метод** (рис. 7,а) основан на взвешивании баллона после добавления каждого вещества [4]. Для повышения точности практикуют метод многократного разбавления. Процедура нескольких последовательных разбавлений особенно необходима при низких (менее 1 %) концентрациях целевых компонентов. При условии использования высокоточных электронных весов и чистых исходных компонентов массовый метод смешения позволяет обеспечить точность состава 0,5 %.

**Манометрический способ** базируется на контроле давления в смесительной камере с известным гидравлическим объёмом [5]. В эту ёмкость последовательно вводятся порции газообразных компонентов. Для уменьшения влияния сжимаемости давление процесса ограничивают несколькими атмосферами. Готовую смесь перекачивают из смесителя в баллон и повторяют процедуру до получения заданного количества продукта (рис. 7,б).

Работа при низких давлениях в смесительной камере не гарантирует высокой точности. Из-за «реальности» компонентов и влияния объёмов арматуры и приборов погрешность однократного смешения по давлению может достигать 5 %. Необходимость последующей коррекции, длительные периоды стабилизации температуры и вероятность попадания в смесь побочных примесей при использовании компрессора превращает данный метод в малопродуктивную и ненадёжную процедуру.

При достаточном располагаемом давлении исходных компонентов существует возможность получать целевые вещества непосредственно в производственном

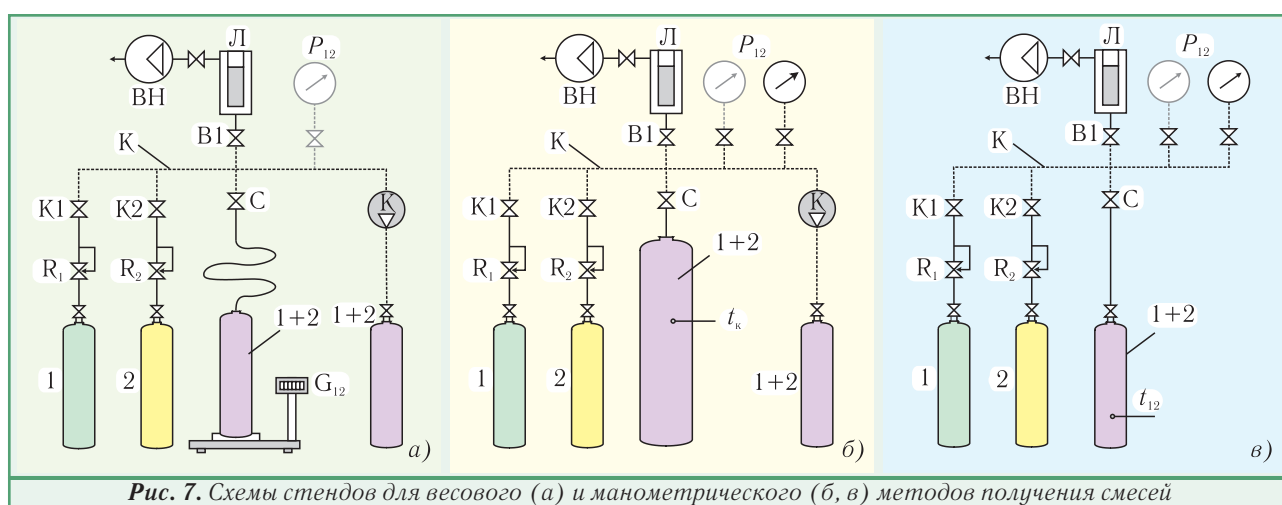


Рис. 7. Схемы стендов для весового (а) и манометрического (б, в) методов получения смесей

Таблица 5. Последовательность приготовления трёхкомпонентной смеси повышенного давления при T=290 К

Компоненты →	Азот	Кислород	Аргон	Смесь
1. Исходные данные				
1.1. Гидравлический объём смесительного баллона $V_{\Sigma}$ , м <sup>3</sup>				0,05
1.2. Заданное количество готовой смеси $m_{\Sigma}$ , кг				6
1.3. Плотность смеси $\rho_{\Sigma} = m_{\Sigma}/V_{\Sigma}$ , кг/м <sup>3</sup>				120
1.4. Требуемая объёмная концентрация смеси $y_i$ , %	78,11	20,96	0,93	100
2. Определение массы компонентов (гравиметрический метод)				
2.1. Молекулярные массы компонентов $\mu_i$ , кг/кмоль	28,01	32	39,95	
2.2. Кажущаяся молекулярная масса смеси $\mu_{\Sigma} = y_{N_2}\mu_{N_2} + y_{O_2}\mu_{O_2} + y_{Ar}\mu_{Ar}$ , кг/кмоль				28,96
2.3. Массовые концентрации компонентов $c_i = \frac{y_i \mu_i}{\mu_{\Sigma}}$ , %	75,56	23,16	1,28	100
2.4. Массы компонентов в составе смеси $m_i = y_i m_{\Sigma}$ , кг	4,533	1,390	0,077	6,0
3. Вычисление давлений компонентов (манометрический метод)				
3.1. Плотность компонентов $\rho_i$ (при условии, что каждый из них помещается в объёме $V_{\Sigma}$ баллона отдельно), кг/м <sup>3</sup>	90,67	27,79	1,54	
3.2. Давления компонентов $p_i$ согласно справочным данным для чистых веществ при $p_i$ и $T=290$ К, бар	77,589	20,639	0,929	
3.3. Расчётное давление смеси $p_{\Sigma} = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar}$ , бар				99,157
3.4. Последовательность подъёма давления в смесительном баллоне, бар	Аргон			I — 0,929
	Кислород+Аргон (20,639+0,929)			II — 21,568
	Азот+Кислород+Аргон (77,589+20,639+0,929)			III — 99,157

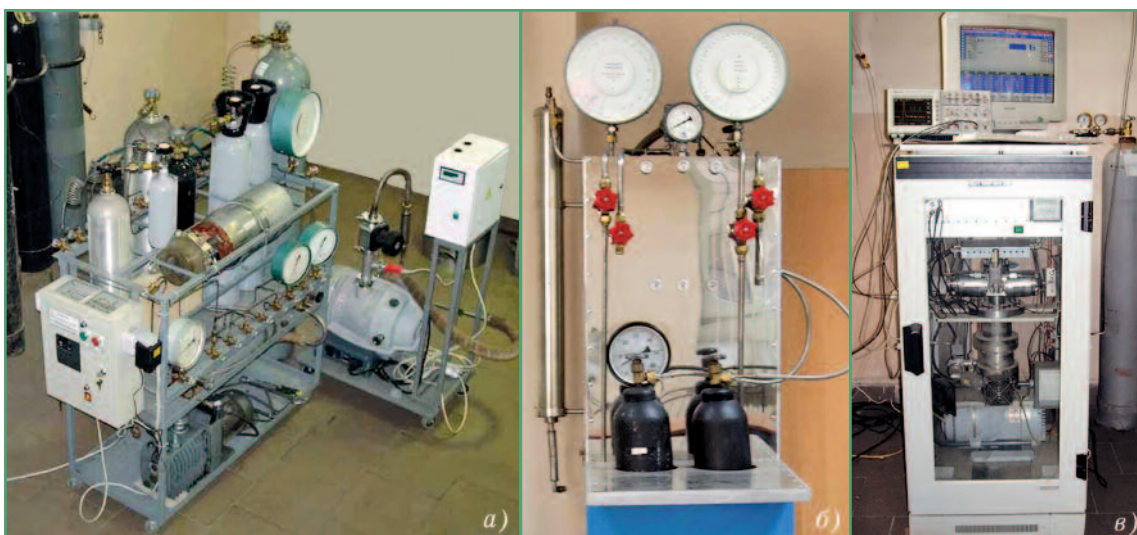
баллоне [3]. Такой способ пригоден для смесей, образованных из нескольких чистых газов, если концентрации отдельных компонентов  $y_i \geq 1$  %. Предполагается, что для каждого из названных веществ имеются справочные данные о физических свойствах. Технология приготовления смеси иллюстрируется табл. 5 на примере получения искусственного воздуха. Данный продукт выбран для наглядности и в связи с наличием информации о свойствах смеси, необходимых для оценки точности расчётного метода.

Фактическая плотность воздуха по справочным данным при расчётном давлении  $p_{\Sigma} = 99,157$  бар и температуре  $T = 290$  К составляет  $\rho_{\Sigma} = 120,85$  кг/м<sup>3</sup> [6]. Отклонение от плотности  $\rho_{\Sigma}$  (см. п. 1.3) достигает  $\Delta = 0,71$  %.

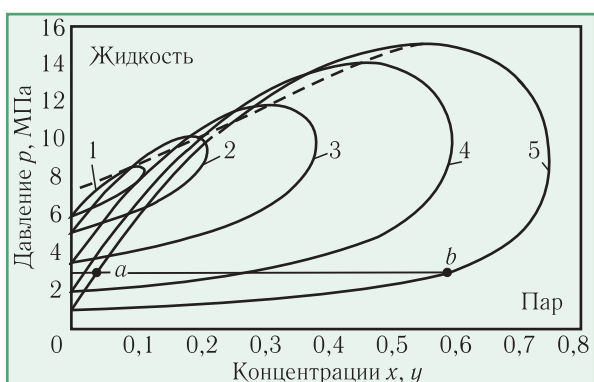
На начальном этапе (строки 5-8, в табл. 5), как и в случае гравиметрического смешения чистых веществ, определяется масса каждого компонента  $m_i$ . Эти величи-

ны для заданного количества продукта  $m_{\Sigma}$  вычисляются через объёмные  $y_i$  и массовые  $c_i$  концентрации по известным соотношениям [1]. Далее (строки 9-12) рассчитываются давления компонентов, при которых манометрическим методом обеспечивается заданная концентрация.

Приемлемая погрешность ( $\Delta = 0,71$  %) расчётной последовательности, использованной в табл. 5, ещё не гарантирует автоматического получения заданного состава смеси. При реализации процедуры потребуется хроматограф для газового анализа, набор манометров с классом точности, как минимум, 0,15 и достаточное количество чистых компонентов с повышенным давлением  $p_i = 100 \dots 200$  бар. Описанный метод апробирован нами при получении смеси  $^{20}\text{Ne} - ^{22}\text{Ne}$  с заданным изотопным соотношением. В большинстве случаев требуемый результат достигался после одного корректирующего шага, который осуществлялся на



**Фото 8.** Отдельные блоки смесителя для получения неона с заданным изотопным соотношением манометрическим методом: а — при использовании компрессора (см. рис. 4,б); б — при прямом смешении; в — при использовании масспектрометра ЭМГ-20-1 для контроля изотопного состава

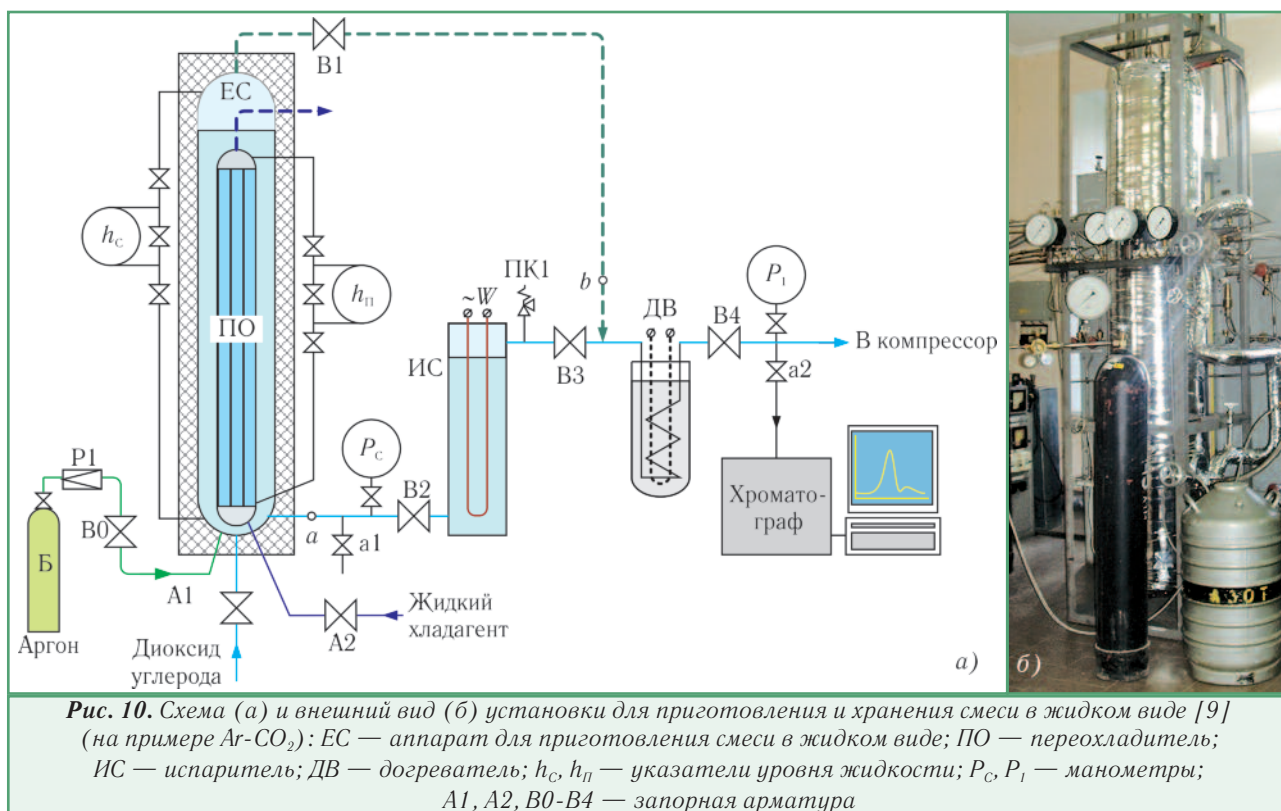


**Рис. 9.** Изотермы равновесия жидкость-пар смеси аргон-диоксид углерода при  $T, K$ : 1 — 295,01; 2 — 288,23; 3 — 273,26; 4 — 253,28; 5 — 233,32

основании контроля изотопного состава. Достоинством рассмотренного способа является исключительно экономное расходование ценных продуктов, например, изотопов редких газов.

На рис. 7,в показана схема стенов для приготовления смесей в замкнутом объёме, а на фото 8 — оборудование, используемое для приготовления смесей манометрическим методом.

В некоторых случаях в качестве исходных веществ для приготовления смеси оператор вынужден использовать не чистые компоненты, а составные вещества, которые уже является своего рода смесями. Методика смешения таких продуктов изложена в ГОСТ Р ИСО 6142-2008 (РФ) [4].



**Рис. 10.** Схема (а) и внешний вид (б) установки для приготовления и хранения смеси в жидком виде [9] (на примере  $Ar-CO_2$ ): ЕС — аппарат для приготовления смеси в жидком виде; ПО — переохладитель; ИС — испаритель; ДВ — догреватель;  $h_c, h_n$  — указатели уровня жидкости;  $P_c, P_1$  — манометры;  $A1, A2, B0-B4$  — запорная арматура

### 3.3. Получение и хранение смесей в жидком виде

Методы, основанные на фазовом равновесии компонентов, позволяют получать значительные количества, преимущественно, бинарных смесей (рис. 9) [7,8]. Для реализации данного способа требуются специальные аппараты, снабжённые теплоизоляцией и контуром стабилизации температуры (рис. 10). Состав смеси задаётся давлением и температурой фаз [9]. Полученный раствор отбирается из ёмкости преимущественно в виде жидкости и газифицируется. Недостатком процесса является весьма ограниченный диапазон возможных концентраций, так как в таких смесях преобладает высококипящий компонент.

В случае, когда требуется получить смесь со значительной долей низкокипящего вещества, отбор ведётся из газовой фазы при непрерывной подпитке низкокипящим компонентом из баллона Б (см. рис. 10). При этом для получения состава, близкого к равновесному, названная подпитка проводится путём барботажа сквозь слой жидкости. В свою очередь, для обеспечения длительной работы необходимо иметь запас жидкого высококипящего вещества для пополнения смесителя ЕС.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторная база ООО «Айсблик» позволяет исследовать любой из названных выше методов получения газовых смесей. В её составе — высокорасходный точный смеситель фирмы «Thermo Instrument Corporation», электронные весы с точностью  $\pm 1$  г, цистерны для хранения жидких криопродуктов и хладагентов, испарители, ёмкости для получения и хранения смесей в жидком виде, библиотека эталонных газовых смесей, уни-

кальные приборы для анализа газового и изотопного состава смесей. Создание комплекса оборудования для приготовления комбинированных газовых продуктов позволило расширить число потребителей редких газов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко В.Л., Симоненко Ю.М.** Криогенные технологии извлечения редких газов. — Одесса: ПО «Изд. центр», 2009. — 232 с.
2. **Кириллин В.А., Сычёв В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 416 с.
3. **Вукалович М.П., Новиков И.М.** Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1968. — 496 с.
4. ГОСТ Р ИСО 6142-2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Гравиметрический метод.
5. ГОСТ Р ИСО 6144-2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Статический объёмный метод.
6. **Вассерман А.А., Казавчинский Я.З., Рабинович В.А.** Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. — М.: Наука, 1966. — 375 с.
7. Isothermal  $P$ ,  $x$ ,  $y$  data for the argon + carbon dioxide system at six temperatures from 233,32 to 299,21 K and pressures up to 14 MPa/ **C. Coquelet, A. Valls, F. Dieu et al.**// Fluid phase equilibria. — 2008. — 273. — P. 38-43.
8. **Wei Y.S., Sadus R.J.** Vapour-liquid and liquid-liquid phase equilibria of binary mixtures containing helium: comparison of experimental with predictions using equations of state// Fluid phase equilibria. — 1996. — 122. — P. 1-15.
9. Альтернативные технологии получения концентратов редких газов/ **В.Л. Бондаренко, Н.П. Лосяков, Т.В. Дьяченко и др.**// Технические газы. — 2011. — № 1. — С. 42-52.

## Никаких компромиссов при работе с криогенными газами

**HEROSE**  


от ДУ 6 до ДУ 25  
с  $-270$  до  $+400$  °C  
от 0,2 до 250 бар



Где безопасность, срок службы и простота обслуживания имеют самый высокий приоритет, там при хранении и транспортировании криогенных газов отлично работают клапаны от HEROSE.

Тщательный выбор материалов, постоянный контроль качества, выходной контроль с проверкой плотности и работоспособности клапанов гарантируют стопроцентно высшее качество «Сделано в Германии».

**Обращайтесь к нам за подробностями!**

**HEROSE GMBH**  
Germany  
Phone: +49 4531 509-0  
Fax: +49 4531 509 120  
info@herose.com

[www.herose.com](http://www.herose.com)