

УДК 622.822

Д.т.н., проф. Ю.Ф. Булгаков (ДонНТУ)

***Применение газоразделительных мембранных модулей  
для создания инертной среды в пожарных участках***

Практика борьбы с подземными пожарами в Украине и за рубежом показала, что для инертизации атмосферы изолированных пожарных участков и снижения концентрации кислорода в очаге горения целесообразно применять газообразный азот. При этом представляет особый интерес использование современных газоразделительных установок непрерывного действия для получения азота непосредственно из шахтного воздуха. По сравнению с традиционными способами получения азота мембранная технология имеет ряд существенных преимуществ, заключающихся в отсутствии фазовых переходов, химических изменений состава разделяемых компонентов, тепловых и динамических нагрузок. Мембранные установки просты и надежны в эксплуатации, отличаются экономичностью, что обуславливает особый интерес горноспасателей к возможности их использования для локализации пожаров. Вместе с тем, в настоящее время, в Украине отсутствуют шахтные газоразделительные установки, а также нет научно-обоснованной методики расчета их параметров. Поэтому в данной статье приведено обоснование параметров таких установок.

В общем виде процесс разделения газовых смесей с помощью селективно проницаемых мембран можно представить в виде трех потоков: потока, входящего в мембрану  $J_0$ , потока, проходящего через мембрану (пермеат)  $J_1'$ , и потока, отходящего от мембраны (ретант)  $J'$ .

Элементарная ячейка асимметричной мембраны для газоразделения (рис. 1.) состоит из диффузионного слоя 1, пористого подслоя 2, пористой подложки 3 и клапанов в подложке 4. Проникающий газовый поток протекает через диффузионный слой перпендикулярно мембране, затем диффундирует через

пористые слои мембраны и подложки и далее по каналам подложки направляется к коллектору.

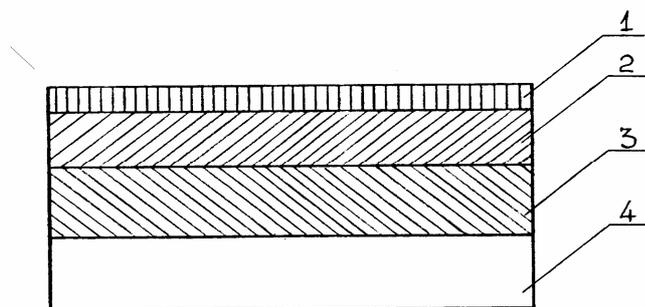


Рис. 1 - Элементарная ячейка асимметричной мембраны

1 - диффузионный слой, 2 - пористый подслой, 3 - пористая подложка, 4 - клапан в подложке.

Разделяющую способность мембраны принято характеризовать значением селективности  $R$  [1].

$$R = \frac{C_2 - C'_2}{C_2} \cdot 100 \% \quad [1]$$

где:  $C_2$  - содержание задерживаемого вещества в потоке,  $J_0$ , %;

$C'_2$  - содержание этого же вещества в поступающем потоке  $J_1'$ , %

Кроме того, разделяющую способность мембран можно охарактеризовать величиной фактора разделения, представляющего собой отношение проходящих через мембрану потоков двух компонентов разделяемой системы

$$F = J_1 / J_2 \quad [2]$$

где:  $J_1$  - расход воздуха, проходящего через мембрану, %;

$J_2$  - расход азота, выходящего из мембраны, %;

Наряду с указанными характеристиками мембраны процесс мембранного разделения определяется коэффициентом проницаемости  $\rho$

$$\rho = \frac{DQ \cdot d}{S \cdot \Delta t \cdot (P_1 - P_2)}, \quad \text{м} \cdot \text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}), \quad [3]$$

где  $\Delta Q$  - объем проникшего через мембрану газа, м<sup>3</sup>;

$\delta$  - толщина мембраны, м;  $S$  - площадь мембраны, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  - время проникновения, с;

$P_1, P_2$  - давление по разные стороны мембраны, МПа.

Согласно теоретическим исследованиям диффузионное проникновение через тонкие мембраны представляют собой сложный процесс, включающий следующие стадии [1]:

- адсорбцию газа на поверхности мембраны;
- растворение газа на поверхности мембраны;
- активную диффузию газа через мембрану;
- выделение газа из раствора на противоположной поверхности;
- десорбцию газа с обратной стороны мембраны.

Считается, что газы через мембраны проникают в молекулярной форме, при этом степень проницаемости для различных газов различная.

Движущей силой процесса газоразделения на полимерных мембранах является разность парциальных давлений компонентов газовой смеси между обеими сторонами мембраны, которая для  $i$  – компонентов может быть выражена в виде [2]:

$$\Delta P_i = P_v \cdot x_i \cdot P_n \cdot y_i; \text{ МПа} \quad [4]$$

где  $P_v, P_n$  – давление газовой смеси над и под мембраной, МПа;

$x_i, y_i$  - содержание  $i$  – компонентов в исходной смеси и в продукте соответственно, %.

Движущая сила характеризует скорость проникания  $i$  – компонента через пленку, которая определяется из выражения [121]:

$$V_i = P_i \cdot \Delta P_i, \text{ Нм}^2/\text{м}^2\text{с} \quad [5]$$

Изучение разделения газовых смесей с помощью мембран привело к созданию целого ряда различных методов расчета газоразделительных процессов. При применении асимметричных мембран, которые характеризуются высокой

газопроницаемостью, процесс движения разделяемого потока приближается к поршневому. При этом скорость течения разделяемого газа в межэлементном пространстве достигает больших значений, что снижает обратное перемешивание и продольную молекулярную диффузию, направленную против движения разделяемого потока. Уравнение материального баланса общего расхода бинарной смеси мембранного аппарата имеет вид

$$G_n = G_k + g, \quad [6]$$

где  $G_n$  - общий расход бинарной смеси, м<sup>3</sup>/с;  
 $G_k$  - расход установки по ретанту, м<sup>3</sup>/с;  
 $g$  - расход установки по пермеату, м<sup>3</sup>/с.

Анализ уравнения [6] показывает, что для определения общего расхода бинарной смеси при заданном расходе установки по ретанту, необходимо знать расход по пермеату.

Расход установки по пермеату определяется решением системы дифференциальных уравнений, описывающих материальный баланс для элемента площади мембранного аппарата, предложенных Чекаловым Л.Н. и Талакиным О.Г. [3]

$$\begin{cases} -d(gx) = q_o \cdot P \cdot dS (x - ry) \\ -[g(1-y)] = q_o \cdot P \cdot dS [1-x-r(1-y)] \end{cases} \quad [7]$$

где  $y$  - содержание отводимых газов в пермеате;  
 $x$  - содержание исходной смеси;  
 $q_c, q_\phi$  - проницаемость соответственно по отводимому газу и флегматизатору, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·сек·МПа;  
 $r$  - отношение величин давлений под и над мембраной;  
 $P$  - давление на мембране, МПа;  $S$  - площадь мембраны, м<sup>2</sup>.

Для случая разделения газовой смеси, подаваемой с постоянным расходом и содержанием в ней отводимого газа, а также неизменной проницаемости мембранного аппарата система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} yg = q_o \cdot P \cdot S (x - ry) \\ (1-y)g = q_{\phi} \cdot P \cdot S [1 - x - r(1 - y)] \end{cases} \quad [8]$$

Зависимость расхода проникающего флегматизатора от содержания отводимой смеси, полученная из системы уравнений [7] имеет вид

$$g = \frac{q_o \cdot P \cdot S (1 - r)}{F(1 - y) + y} \quad [9]$$

Однако, при инертизации среды аварийного участка определяющей является концентрация кислорода и других отводимых газов в ретанте, а не в пермеате. Связь этих концентраций описывается уравнением материального баланса кислорода в процессе газоразделения.

$$G_n x = G_k z + gy, \quad [10]$$

где  $z$  - концентрация кислорода и других газов в ретанте.

Используя уравнения [10] и [6] также можно определять расход проникающей газовой смеси

$$g = \frac{G_k (x - z)}{y - x} \quad [11]$$

Сравнивая уравнения [8] и [11] получим зависимость концентрации кислорода и других газов в пермеате от концентрации этой смеси в ретанте в виде

$$y = \frac{F \cdot G_k (x - z) + x q_o P S (1 - r)}{G_k (F - 1) (x - z) + q_o P S (1 - r)} \quad [12]$$

Однако при решении практических задач по созданию инертной среды на аварийных участках в шахтах необходимо определить количество мембранных аппаратов для получения продукционного газа при заданной величине избыточного давления на мембране, равном давлению в пневмосети. В связи с этим возникает необходимость получить зависимость производительности мембранных установок по ретанту от площади проникновения и давления на мембране, при необходимом содержании кислорода и других газов в ретанте.

Такая зависимость получена из уравнения [12]

$$G_k = \frac{q_0 \cdot P \cdot S (1 - r) (x - y)}{(x - z) (yF - y - F)} \quad [13]$$

Используя формулы 6, 11, 12 и 13 при известной концентрации кислорода можно определить необходимый расход смеси, подаваемой на мембранную установку для получения необходимого расхода ретанта.

Таким образом, в результате решения системы уравнений, описывающей материальный баланс мембранного газоразделительного процесса, получена зависимость расхода проникшей газовой смеси от проницаемости мембраны и давления на ней. Полученная зависимость позволяет рассчитать расход исходной смеси газов, которую необходимо подать на мембрану для получения определенного расхода продукционного газа, а также определить площадь мембраны в зависимости от режима работы установки.

Экспериментальное определение параметров и отработка режимов работы передвижной шахтной мембранной газоразделительной установки проводилось в лабораторных и натуральных условиях.

Установка (рис.2) состоит из компрессора, дозатора пыли, увлажнителя воздуха, тканевого фильтра очистки воздуха, разделительного модуля МГА-20/0,9, системы трубопроводов с запорно-регулирующими задвижками, манометров, патрубков для отбора проб и ротаметров .

Принцип работы установки заключается в селективном мембранном

разделении воздуха на два потока – обогащенных соответственно кислородом и азотом. Для проникновения через мембрану воздух подается от компрессора под избыточным давлением. При этом измеряется расход воздуха, поступающего на вход газоразделительного аппарата, расход пермеата и ретанга, а также содержания кислорода в них.

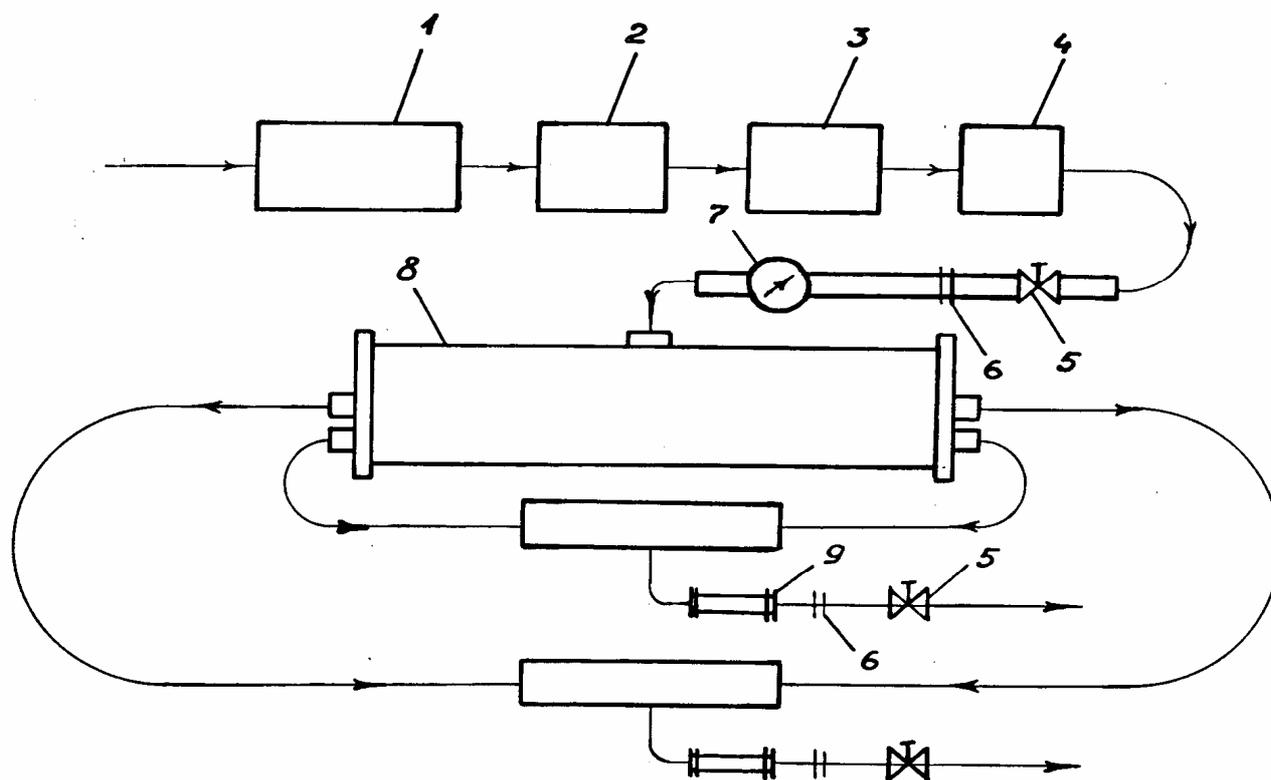


Рис. 2 Схема шахтной установки мембранного разделения воздуха

Методика проведения экспериментальных исследований сводилась к тому, что воздух, поступающий от компрессора, проходя через специальный дозатор «обогащался» угольной пылью, содержащей 80 % частиц крупностью 75 мкм, с выходом летучих веществ 26-28 и зольностью – 10 %. При этом запыленность воздуха на выходе из дозатора составляла 45...50 мг/м<sup>3</sup>. Дополнительно увлажненный до 90-95 % воздух поступал на тканевый фильтр, а затем, после очистки, по системе трубопроводов направлялся в мембранный газоразделительный аппарат МГА-20/0,9, где разделялся в двух секциях на поток, обогащенный кислородом, и поток, обогащенный азотом. В процессе выполнения экспериментов измерялись расход и давление потока воздуха,

поступающего в мембранный аппарат, расход и содержание кислорода и азота в пермеате, а также расход и содержание кислорода и азота в ретанте. Для замеров расходов воздуха, пермеата и ретанта применялись ротаметры типа РМ-40Г. Содержание кислорода в потоках определялось оксиметром «Охусом 25 Д» фирмы Дрегер, а также контролировалось хроматографическим способом в лабораторных условиях.

Первая серия экспериментов была проведена с целью отработки режимов работы установки и определения точности показаний контрольно-измерительной аппаратуры. При этом изменялось давление воздуха и измерялось содержания продуцируемых газов. Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1- Результаты экспериментов

Давление входящего потока, Мпа	Содержание газов, определяемых		
	оксиметром	хроматографом	
	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
0,50	6,5	6,0	93,5
0,42	11,0	11,0	88,5
0,34	14,0	13,5	86,0
0,22	18,0	17,0	82,0
0,05	21,0	20,5	79,0

Как видно из приведенных данных, отклонения в результатах определения содержания кислорода в ретанте, полученных с помощью оксиметра, и хроматографическим методом отклоняются незначительно. При этом оксиметр дает завышенные данные, отклонения которых не превышает + 5,5 %. Кроме того, следует отметить, что с увеличением давления входящего потока содержание кислорода в ретанте снижается, а азота растет. Так, при давлении 0,5 МПа на исследуемой установке содержание кислорода в ретанте составляло 6,0 , а азота – 93,5 %.

Отработка режимов работы установки показала, что контрольно-измерительная аппаратура, газоразделительный модуль и газопроводная арматура работали в нормальном режиме. Работа компрессора была надежной. Поэтому в процессе отработки режимов работы было найдено оптимальное давление равное 0,325-0,37 МПа, которое позволяло поддерживать расход сжатого воздуха в пределах 0,37-0,495 м<sup>3</sup>/мин при обеспечении необходимой безопасности работ. В этих условиях установка проработала порядка 320 часов. При этом было произведено 35 единичных замеров параметров газоразделительной установки. Результаты этих замеров показали, что при выбранных режимах работы установка обеспечивала содержание кислорода в ретанте 11,5-13,0 % или 88,5-87 % азота. Следует отметить, что в начале исследований (эксперименты 1-12 ) содержание кислорода в ретанте колебалось в пределах 11,5-12,5 %, а затем начало расти и в конце выполнения работ возросло до 13 % (опыты 28-36). В дальнейшем режим работы газоразделительного модуля был изменен и аппарат МГА-20/0,9 проработал в течение длительного времени (около 200 часов), обеспечивая содержание азота, равное 99,0; 97,0 и 95,0 % при расходе ретанта 0,5; 1,66 и 4,15 м<sup>3</sup>/мин соответственно. При этом 168 часов непрерывной работы не оказали практически никакого влияния на параметры газоразделения.

Оценка адекватности экспериментальных данных расчетным, выполненная с помощью элементов математической статистики и теории надежности и полученные при этом удовлетворительные результаты дают возможность считать целесообразным использование мембранных установок разделения рудничного воздуха для получения азота непосредственно в шахтных условиях.

#### **Список литературных источников**

1. Дубяга В.Н., Перепечкин Л.И., Каталевский Е.Е. Полимерные мембраны. М.: Химия, 1981.- 230 с.
2. Разделение газов при помощи мембран/ Рег. № 38085/6.- Донецк, 203, 1987. - 23 с. - Пер. с нем.: Докл. Schulz G., Michele H., Werner U., Chemic H.
3. Исследование мембранного процесса обогащения воздуха азотом: Отчет о НИР/ НПО «Криогенмаш»; Рук. Чекалов Л.П.- № ГР 018300053000.- Москва, Балашиха, 1984.- 23 с.