

УДК 66.071.6.081

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Ушаков А.С., курсант гр.2-01, V курс,
Научный руководитель: Янкина К.Ю., к.х.н.,
старший научный сотрудник
ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»»,
г. Воронеж

Тематика добычи газов, таких как кислород и азот чрезвычайно актуальна в условиях введения современных боевых действий. Современные системы воздушных судов требуют использование кислорода и азота, как в жидком, так и в газообразном виде. Кислород необходим для обеспечения правильного сгорания топлива в двигателях, а также для обеспечения жизнеобеспечения экипажа на больших высотах. Азот необходим для охлаждения инфракрасных головок самонаведения боевых ракет, для заполнения и вытеснения газа из технического оборудования из участков трубопроводов. Кроме того, азот заправляется в топливные баки для недопущения их воспламенения и взрыва при их поражении противником. Специальная военная операция и специальные операции в Сирийско-Арабской Республике показали, что от действий авиации в воздухе напрямую зависит исход боевой задачи. Поэтому обеспечение воздушных судов сжатыми и сжиженными газами требует повышения мобильности и эффективности его получения. Модернизация существующего блока разделения воздуха позволит выйти на необходимые боевые параметры, а именно: снизить затраты по времени и силам на ремонт вышедшего из строя газодобывающего оборудования, повысить эффективность газообеспечения воздушных судов, путем снижения времени добычи газов и повышения их качества.

В качестве источника азота на промышленных объектах на сегодняшний день успешно применяются стационарные и передвижные азотные установки, основанные на технологии мембранного выделения азота из воздуха. Технология мембранного газоразделения связана с разработкой аппаратов нового поколения – мембранных модулей (контакторов) [1]. Мембранный модуль представляет собой разделительный аппарат, в котором реализуется селективный массоперенос компонентов между движущейся газовой смесью и жидкостью-адсорбентом, разделенных мембраной. Движущей силой процесса в мембранных модулях является градиент химического потенциала по разные стороны мембраны [2]. Этот процесс

позволяет совместить в одном устройстве (мембранном модуле), компактность и гибкость мембранной технологии с высокой селективностью абсорбционных процессов. В настоящее время в мембранных модулях чаще всего используют полуволоконные мембраны, поскольку они позволяют создать аппараты с наиболее развитой удельной поверхностью. Полые волокна обеспечивают компактность оборудования, низкое сопротивление массопереносу. Также в полых волокнах отсутствует конвективное смешивание фаз и необходимость их дальнейшего разделения.

Целью настоящей работы является поиск оптимального метода расчета мембранного разделения многокомпонентной смеси. Следует отметить, что принцип мембранного разделения состоит в том, что «быстрые» газы, такие как кислород, пропускаются материалом непористой полимерной мембраны больше, чем азот. Поэтому все расчеты будут вестись относительно более «быстрых» молекул. Кроме того, для расчетов будем рассматривать бинарную систему, состоящую только из кислорода «О» и азота «N» с концентрациями 21% и 79%, соответственно.

Анализ работ показал, что в нашей стране нашли свое применение газоразделительные мембранные материалы, состоящие из полифениленоксида, поливинилтриметилсилана, полисульфона покрытого полидиметилсилоксаном или поли(блок-амидом эфира) с факторами разделения 4,8; 3,6; 4,56 и 3,94, соответственно.

Для оценки проницаемости отдельных составляющих газовой смеси применимы уравнения [1]:

$$V_o = K_o S \Delta P_o; \quad (1)$$

$$V_N = K_N S \Delta P_N. \quad (2)$$

где V – расход потока, м³/ч; K – коэффициент проницаемости чистых веществ, нм³/ (МПа·м²·ч); ΔP – разность парциальных давлений, МПа; S – площадь рабочей поверхности (перегородки), м².

Индексы «O» и «N» обозначают компонент кислорода и азота, соответственно.

Разность парциальных давлений для компонента «O», выражается:

$$\Delta P_o = P_x x - P_y y, \quad (3)$$

где P_x и P_y – абсолютные давления над мембраной и после нее, МПа, x – концентрация компонента «O» (кислорода) в питающей смеси, y – концентрация компонента «N» (азота) в пермеате.

Преобразовав формулу (1) получим:

$$V_o = V_y = K_o S (P_x x - P_y y); \quad (4)$$

Концентрацию второго компонента в питающей смеси выразим как

$(1-x)$, в пермеате $-(1-y)$, тогда « N » выразим:

$$\Delta P_N = P_x(1-x) - P_y(1-y); \quad (5)$$

$$V_N = V(1-y) = K_N S [P_x(1-x) - P_y(1-y)]. \quad (6)$$

Введем преобразования $\alpha = K_o / K_N$ и $\varphi = P_y / P_x$ получаем:

$$y^2 \varphi(1-\alpha) + y[1 + (\varphi+x)(\alpha-1)] - \alpha x = 0; \quad (7)$$

Получаем:

$$y_1 = \frac{1}{2} \left[-\frac{B}{A} + \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{C}{A}} \right]; \quad (8)$$

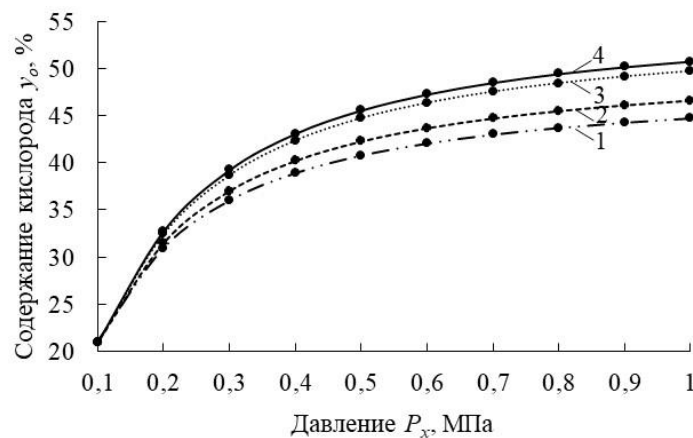
$$y_2 = \frac{1}{2} \left[-\frac{B}{A} - \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{C}{A}} \right], \quad (9)$$

где $A = \varphi(1-\alpha)$; $B = 1 + (\varphi+x)(\alpha-1)$; $C = -\alpha x$

В таблице 1 представлены рассчитанные коэффициенты A , B , C и концентрации y .

Фактор разделения	A	B	C	y (доля O_2 после мембраны)
$\alpha=3,6$	-0,26	1,81	-0,76	$y_1=6,499$; $y_2=0,447$
$\alpha=4,56$	-0,36	2,10	-0,96	$y_1=5,412$; $y_2=0,497$
$\alpha=3,94$	-0,29	1,91	-0,83	$y_1=6,035$; $y_2=0,466$
$\alpha=4,8$	-0,38	2,18	-1,00	$y_1=5,221$; $y_2=0,509$

По рассчитанным коэффициентам A , B , C строим график зависимости давления от содержания кислорода при различных значениях α .



1 – 3,6; 2 – 3,94; 3 – 4,56; 4 – 4,8

Рисунок – 1 Содержание кислорода y_o в пермеатном потоке после мембраны при обогащении воздуха ($x_o=0,21$) в зависимости от давления P_x и фактора разделения α .

Показано, что для мембранных материалов из полифениленоксида с фактором разделения 4,8 обогащение потока кислородом идет эффективнее. Кроме того, мембранный материал из полисульфона, является отечественным материалом, что дает возможность его использовать в нашей разработке.

Таким образом, упрощенные методы анализа достаточно корректно отражают процесс разделения воздуха в мембранах с полыми волокнами.

Список литературы:

1. Бондаренко В.Л. Применение мембранных процессов в технологиях разделения газовых смесей на основе компонентов воздуха // Технические газы. – 2012 – № 2. – С.19–30.
2. Мембранные контакторы в процессах разделения газообразных и жидких веществ / Абдуллин И.Ш., Нефедьев Е.С., Ибрагимов Р.Г. и др. // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18. – №14. – С. 167-173.