

---

---

# ПРИКЛАДНА ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА І ТЕПЛОМАСООБМІН

---

---

УДК 621.59

## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ МОДУЛЕЙ ОЖИЖЕНИЯ ДЛЯ АЗОТНО-МЕМБРАННЫХ УСТАНОВОК

**В.М. Арсеньев, С.М. Ванев, Г.В. Кирик\*, А.Д. Стадник\***

*Сумский государственный университет, г. Сумы;*

*\*Международный институт компрессорного и энергетического машиностроения, г. Сумы*

*Работа посвящена вопросам оценки технических характеристик азотно-мембранных установок, функционирующих в режиме ожижения газообразного азота, получаемого по мембранной технологии разделения воздуха. Приведены рекомендации по оптимизации процесса ожижения азота.*

### І ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области разделения многокомпонентных газовых смесей является применение мембранной технологии, которая базируется на отличии у компонентов смеси величин скорости проникновения через стенки полый полимерной мембраны.

Подобная технология успешно используется для получения газообразного азота из атмосферного воздуха и реализована в азотно-мембранных винтовых станциях серии АМВП и АМВ, производства концерна «Укрросметалл» [1, 2].

В отличие от воздухоразделительных установок с криоректификацией, извлечение азота из воздуха по указанной технологии не сопровождается процессами ожижения воздуха и его компонентов. В связи с этим для реализации задачи получения азота в жидком состоянии требуется дополнять азотно-мембранную установку соответствующим криомодулем (модулем ожижения).

Выбор схемного решения для криомодуля прежде всего зависит от уровня давления азота на выходе из мембранного модуля. Анализ выпускаемых и перспективных станций концерна «Укрросметалл» позволяет их ранжировать на три группы по возможностям создания криомодулей низкого, среднего и высокого давления. Основные показатели ряда установок представлены в таблице 1, где  $V_A$ ,  $V_B$  – объемные производительности по азоту и воздуху при нормальных условиях;  $P_A$  – давление азота на выходе из установки;  $(\ell_o)_A$  – удельный расход энергии на получение 1 кг газообразного азота.

В установках НД-20/33 и СД-10-250 давление на выходе  $P_A$  создается за счет работы дожимного азотного компрессора. Подобным образом можно повышать давление азота и для установок типа АМВ, что, однако, приведет к увеличению удельного расхода энергии.

Получение жидкого азота на базе азотно-мембранных установок может быть использовано как в коммерческих, так и технических целях. В последнем случае реализуются, например, создание резерва азота, аккумуляция холода для улучшения режимных характеристик и другие решения.

Таблица 1 – Режимные параметры азотно-мембранных винтовых установок

Марка установки	$V_A$	$V_B$	$P_A$	$(\ell_o)_A$
	нм <sup>3</sup> /мин	нм <sup>3</sup> /мин	бар	кВт ч/кг
<b>АМВП-0,25/1,2</b>	0,25	2	7	1,0
АМВ-2,5/0,7	2,5	7,35	10	0,405
АМВ-5,5/0,7	5,5	14,8	10	0,324
АМВП-15/0,7	15	42,5	8	0,36
<b>НД-20/33</b>	10	20	33	0,34
<b>СД-10-250</b>	10	20	250	0,567

## II ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРИОМОДУЛЯ

Основным показателем криогенной установки, работающей в ожижительном режиме, является коэффициент ожижения, представляющий собой отношение производительности установки по жидкому продукту к производительности потока сжатого криоагента, обеспечивающего работу установки по выбранному термодинамическому квазициклу [3]. Таким образом, для азотно-мембранной установки с криомодулем коэффициент ожижения записывается в виде

$$X_A = \dot{m}_{Af} / \dot{m}_A, \quad (1)$$

где  $\dot{m}_{Af}$  – массовый расход жидкого азота (производительность установки по жидкому азоту);

$\dot{m}_A$  – массовый расход газообразного азота на выходе из мембранного модуля.

На рисунке 1 представлена схема баланса материальных потоков для азотно-мембранной установки с криомодулем.

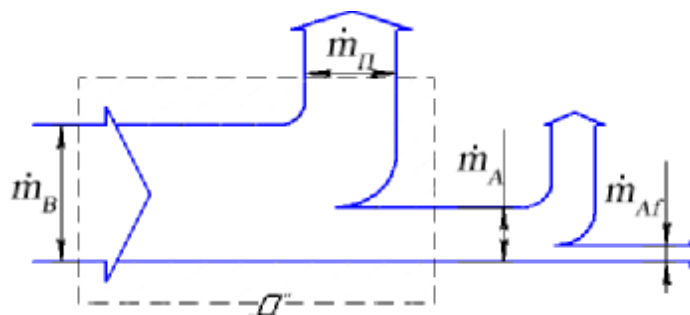


Рисунок 1 – Схема баланса материальных потоков

Согласно данной схеме воздух с массовым расходом  $m_B$  разделяется в мембранном модуле (контур «а») на поток газообразного азота,  $m_A$  и поток газового сброса (пермеата) с расходом  $m_n$ . В криоблоке из потока газообразного азота получается  $\dot{m}_{Af}$  жидкого азота, а поток оставшегося газообразного азота с расходом  $(\dot{m}_A - \dot{m}_{Af})$  может быть рециркулирован в системе, либо быть выведен за ее пределы.

Графическая интерпретация баланса материальных потоков показывает, что уровень возможностей ожижения азота в установке во многом зависит от двух факторов:

степени извлечения газообразного азота из воздуха;  
термодинамического совершенства цикла, по которому реализуется  
ожижение азота с режимной характеристикой  $X_A$ .

Обозначим величиной  $\beta_A$  коэффициент извлечения газообразного азота

$$\beta_A = \dot{m}_A / m_B \quad (2)$$

Для известных объемных производительностей установки по азоту и  
воздуху при нормальных условиях коэффициент извлечения  
газообразного азота имеет вид

$$\beta_A = \frac{\mu_A}{\mu_B} \left( \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_B} \right)_{н.у.}, \quad (3)$$

где  $\mu_A, \mu_B$  – мольные массы для азота и воздуха.

При принятии объемной (мольной) концентрации азота в  
перерабатываемом воздухе  $y_B = 0,781$  можно определить максимальное  
значение коэффициента извлечения

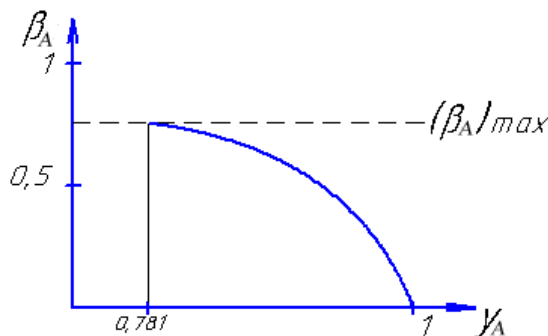
$$(\beta_A)_{\max} = \frac{\mu_A}{\mu_B} \cdot y_B = 0,754.$$

Действительные коэффициенты извлечения газообразного азота  
представлены в таблице 2. Величиной  $y_A$  обозначена концентрация азота  
в потоке азота на выходе из мембранного модуля.

Таблица 2 – Характеристики степени извлечения газообразного азота

Марка установки	$y_A$	$\beta_A$	$\frac{\beta_A}{(\beta_A)_{\max}}$
АМВП-0,25/1,2	0,99	0,125	0,16
АМВ-2,5/0,7	0,95	0,328	0,43
АМВ-5,5/0,7	0,95	0,36	0,48
АМВП-15/0,7	0,95	0,344	0,46
НД-20/33	0,95	0,483	0,64
СД-10/250	0,95	0,483	0,64

Анализ данных по коэффициенту извлечения газообразного азота  
указывает на главный недостаток мембранной технологии  
газоразделения, а именно, невозможность получения компонента (в  
данном случае азота) высокой чистоты с высокой степенью извлечения.



На рисунке 2 представлен  
график зависимости  
коэффициента извлечения от  
объемной концентрации  
получаемого азота при  
использовании  
экспериментальных данных  
для установок АМВП-  
0,25/1,2 и АМВП-15/0,7.

С квадратичной  
погрешностью  $R^2 \cong 1$   
представленная на рисунке 2  
зависимость аппроксимируется

Рисунок 2 – График зависимости  $\beta_A = (y_A)$

нижеследующим уравнением для диапазона концентрации азота  $0,9 \leq y_A \leq 1$

$$\beta_A = 112,85 \cdot y_A^3 + 271,44 \cdot y_A^2 - 217,05 \cdot y_A + 58,464 \quad (4)$$

Для оценки значений коэффициента ожижения были выполнены расчеты термодинамических параметров следующих циклов:

– для криомодулей установок АМВП рассматривался комбинированный цикл низкого давления (цикл П.Л. Капицы) с предварительным охлаждением;

– для криомодуля установки НД-20/33 - комбинированный цикл среднего давления (цикл Ж. Клода);

– для криомодуля установки СД-10/250 – дроссельный цикл высокого давления с одной ступенью предварительного охлаждения (цикл К.Линде).

Результаты расчетов представлены в таблицах 3, 4, 5.

В данной таблице обозначены:

$\ell_o$  – удельный расход энергии на получение 1 кг жидкого азота;

$\eta_S^D$  – изоэнтронный к.п.д. детандера;

$T_2'$  – температура азота после предварительного охлаждения;

$N_D/N_{км}$  – отношение мощности на валу детандера к мощности компрессора для сжатия воздуха.

Таблица 3 – Расчетные параметры криомодуля установки АМВП-0,25/1,2

	$\eta_S^D = 0,3$			$\eta_S^D = 0,4$			$\eta_S^D = 0,5$		
	$T_2', \text{ К}$								
	250	200	150	250	200	150	250	200	150
$\dot{m}_A$ , кг/с	0,0034			0,0034			0,0034		
$X_A$ , кг/кг	0,018	0,033	0,036	0,031	0,048	0,053	0,043	0,062	0,07
$N_D/N_{км}$	0,0024			0,0032			0,004		
$\dot{m}_{Af}$ , кг/час	0,22	0,41	0,44	0,37	0,58	0,65	0,52	0,76	0,86
$\ell_o$ , МДж/кг	298,5	162,4	150,1	178,2	113,8	102,1	126,9	87,6	11,3

Таблица 4 – Расчетные параметры криомодуля установки НД-20/33

	$\eta_S^D = 0,5$	$\eta_S^D = 0,7$
$\dot{m}_A$ кг/с	0,36	
$X_A$ , кг/кг	0,091	0,13
$N_D/N_{км}$	0,021	0,03
$\dot{m}_{Af}$ , кг/ч	44,4	63,5
$\ell_o$ , МДж/кг	19,9	13,6
$\ell_o$ , кВт.ч/кг	5,53	3,78

Таблица 5 – Расчетные параметры криомодуля установки СД-10/250

$\dot{m}_A$	$X_A$	$\dot{m}_{Af}$	$\ell_o$	$\ell_o$
кг/с	кг/кг	кг/час	МДж/кг	кВт.ч/кг
0,136	0,122	59,6	24,3	6,75

Анализ представленных результатов расчета параметров криомодулей указывает на низкую энергоэффективность установок с давлением нагнетания азота 1 – 8 бар при поддержании концентрации в потоке  $y_A=0,99$ . Получаемые при таком уровне концентрации азота массовые расходы не позволяют применять турбодетандеры с к.п.д. 75 – 80%.

### III ВЫВОДЫ

При создании криомодулей азотно-мембранных установок с обеспечением  $y_A=0,99$  требуется увеличение давления азота после мембранного модуля до 20 – 30 бар.

Повышение энергоэффективности получения азота в жидком состоянии на базе мембранной технологии разделения воздуха требует реализации технических решений, связанных с использованием энергии потока газового сброса (пермеата).

Выбор схемного решения криомодуля, его оптимизация в целом и по компонентам должны выполняться на базе показателей энергетического или термозаконоomicкого анализа.

Ключевым звеном при создании криомодулей является газовый или газовой-жидкостной детандер малорасходного типа. Необходимо выполнить работы по оценке применимости для криомодулей детандеров струйного и ротационного принципа (струйно-реактивные, винтовые, вихревые, спиральные и другие типы детандеров).

### SUMMARY

*The work is devoted to questions of an estimation of characteristics nitric-membran's installations functioning in a mode liquation the gaseous nitrogen received on membran's technology of division of air. Recommendations on optimization of process liquation nitrogen are resulted.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережной Ю.В. Разработки концерном «Укрросметалл» азотных мембранных винтовых машин типа АМВП// Компрессорное и энергетическое машиностроение – Сумы, 2005. - № 1 (1). -С. 40-43.
2. Кирик Г.В., Бережной Ю.В., Стадник А.Д. Применение азотных машин для обеспечения безопасной работы предприятий угольной промышленности//Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2007.- №1 ( 7).
3. Архаров А.М. и др. Криогенные системы: Основы теории и расчета // Учебник для студентов вузов по специальности «Криогенная техника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.

**Арсеньев В.М.**, СумГУ, г. Сумы;

**Ванев С.М.**, СумГУ, г. Сумы;

**Кирик Г.В.**, Международный институт компрессорного и энергетического машиностроения, г. Сумы;

**Стадник А.Д.**, Международный институт компрессорного и энергетического машиностроения, г. Сумы

*Поступила в редакцию 25 сентября 2007 г.*