

УДК 621.59

**АНАЛИЗ СХЕМ ОЖИЖЕНИЯ АЗОТА ДЛЯ УСТАНОВКИ
АМВП-0,25/1,2 С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОЖИМНОГО КОМПРЕССОРА**

**В. М. Арсеньев,
С. М. Ванеев,
М. И. Проценко,
Г. В. Кирик*,
А. Д. Стадник*,**

Сумский государственный университет, г. Сумы;

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

В статье предложены расчетные зависимости для оценки энергоэффективности ожигительных циклов высокого давления применительно к криомодулю азотно-мембранной установки. Приведены рекомендуемые значения основных параметров дожимного компрессора для криомодуля.

У статті запропоновані розрахункові залежності для оцінки енергоефективності зріджувальних циклів високого тиску, застосованих для криомодуля азотно-мембранної установки. Наведені рекомендовані значення основних параметрів дожимного компресора для криомодуля.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор схемы для криомодуля азотно-мембранной винтовой установки марки АМВП-0,25/1,2 производства концерна УКРРОСМЕТАЛЛ характеризуется многовариантностью и главным образом зависит от уровня давления газообразного азота на выходе из мембранного блока установки, которое в зависимости от концентрации составляет 7–10 бар [1]. Для установок с таким давлением желаемое преобразование агрегатного состояния криоагента необходимо выполнять на основе совокупности процессов, образующих комбинированный цикл низкого давления.

Однако применение указанного цикла ожигения для рассматриваемой азотно-мембранной винтовой установки является нерациональным решением ввиду низких значений производительности установки по жидкому продукту. Этому способствуют два обстоятельства: низкая степень извлечения газообразного азота в мембранном блоке и невозможность применения эффективных турбодетандеров. Действительно, для установки АМВП-0,25/1,2 при получении азота с концентрацией 99% степень извлечения азота из всего всасываемого на разделение воздуха составляет 16% по массе от максимально возможной величины. В свою очередь, это приводит к низким значениям производительности детандера (12–15) нм³/час и его эффективного к.п.д. 35–45%.

Низкая продуктивность криомодуля по данной схеме обуславливает высокие значения удельного расхода энергии. Одним из направлений для

повышения как производительности, так и энергоэффективности азотно-мембранной установки с криомодулем является дожатие азота после мембранного блока [2]. В этом случае можно реализовать не только комбинированные циклы среднего давления, но и дроссельные циклы высокого давления различных модификаций. В силу низких значений производительности по газообразному азоту дополнительные затраты энергии на дожатие не имеют решающего значения в общем энергобалансе установки. Главное, что достигается при дожатии до 150–250 бар, это упрощение структуры криомодуля при форсированных значениях выхода жидкого азота и повышение надежности системы за счет исключения детандера и теплообменника-ожижителя. В качестве дожимного компрессора для криомодуля могут использоваться машины мембранного типа или поршневые компрессоры с фильтрацией потока нагнетания.

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОССЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ КРИОМОДУЛЯ АЗОТНО-МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ

Ожижение криогенных газов после их сжатия до сравнительно высоких давлений (15–30 МПа) реализуют либо по простому циклу К. Линде с однократным дросселированием, либо по циклу с двойным дросселированием и циркуляцией части потока при промежуточном давлении, [3]. Каждый из этих циклов может быть модифицирован путем введения в схему системы внешнего предварительного охлаждения (СВПО), что, с одной стороны, улучшает режимные характеристики ожижительного процесса, а с другой – существенно усложняет установку. Безусловно, при указанных давлениях можно использовать и комбинированные циклы (П. Гейландта, двух давлений и др.), однако для малорасходных систем их реализация будет связана с проблемами низкой эффективности детандерного оборудования и еще большим усложнением криомодуля.

Наиболее простым конструктивным решением для криомодуля при наличии дожимного компрессора после азотно-мембранной установки (АМУ) является схема, реализующая цикл К. Линде, с однократным дросселированием. Показатели режимных параметров такого цикла главным образом зависят от температуры и давления после компрессора, p_2, T_2 . Для интервала давлений $p_2 = 10 - 20 \text{ МПа}$ и температуры $T_2 = 300 \text{ К}$ величина коэффициента ожижения для азота X аппроксимируется уравнением

$$X = (0,3296 \cdot p_2 + 0,0773) \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

или для интервала $p_2 = 15 - 25 \text{ МПа}$

$$X = (-0,0166 \cdot p_2^2 + 0,9117 \cdot p_2 - 4,916) \cdot 10^{-2}. \quad (2)$$

Энергоэффективность АМУ с криомодулем может быть оценена через величину удельного расхода энергии на получение 1 кг жидкого азота $(l_0)_{Af}$:

$$(l_0)_{Af}^{OD} = \frac{N_{AMU} + N_{DK}}{G_f}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}} \left(\frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \right), \quad (3)$$

где N_{AMU} – суммарная мощность привода компонентов азотно-мембранной установки (воздушного компрессора, вентиляторов и другого оборудования);

$N_{ДК}$ – мощность привода дожимного компрессора;

G_f – производительность установки с криомодулем по жидкому азоту.

Уравнение (3) лучше представить в виде связи с коэффициентом ожижения

$$(l_0)_{Af}^{OD} = (1 + \bar{l}) \cdot \frac{(l_0)_A}{X}, \quad (4)$$

где $(l_0)_A = \frac{N_{AMU}}{\dot{m}_A}$ – удельный расход энергии на получение 1 кг

газообразного азота в азотно-мембранной установке, $\frac{кВт \cdot ч}{кг}$;

\dot{m}_A – массовый расход газообразного азота на выходе из азотно-мембранной установки и сжатого в дожимном компрессоре;

$\bar{l} = \frac{l_{ДК}}{(l_0)_A}$ – относительная удельная работа дожимного компрессора;

$l_{ДК}$ – удельная работа дожимного компрессора с учетом необратимости процессов.

Для компрессоров мембранного типа $l_{ДК}$ обычно рассматривается в изотермном приближении, или

$$l_{ДК} = \frac{R \cdot T_2}{\eta_{ДК}^{ИЗ}} \cdot \ln \frac{P_{ДК}}{P_A}, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная для сжимаемой среды;

P_A – давление азота на выходе из азотно-мембранной установки;

$\eta_{ДК}^{ИЗ}$ – изотермный КПД дожимного компрессора;

T_2 – температура азота перед сжатием в дожимном компрессоре до давления $P_{ДК}$.

Перейдем к рассмотрению цикла ожижения с двойным дросселированием и циркуляцией части потока. Функционирование криомодуля азотно-мембранной установки по данному циклу характеризуется следующими особенностями:

– роль компрессора первой ступени в цикле выполняет непосредственно азотно-мембранная установка;

– в зависимости от требуемой концентрации азота его поток будет поступать во вторую ступень компрессора с вполне определенным давлением $P_{ПР}$ и массовым расходом $\dot{m}_1 = \dot{m}_A$

Таким образом, при расчете рассматриваемого цикла накладываются ограничения в виде фиксированных значений \dot{m}_A и промежуточного давления $P_{ПР}$. Главным параметром, который будет влиять на производительность по жидкому азоту и энергоэффективность ожижения, будет являться доля рециркуляционного потока, обозначаемая величиной $1 - M$.

$$1 - M = \frac{(\dot{m}_{OB})_{P_{PP}}}{\dot{m}_{ДК}}, \quad (6)$$

где $(\dot{m}_{OB})_{P_{PP}}$ – массовый расход обратного потока азота при промежуточном давлении;

$\dot{m}_{ДК}$ – массовый расход потока азота через дожимной компрессор.

На рисунке 1 представлена расчетная схема цикла с двойным дросселированием и циркуляцией части потока.

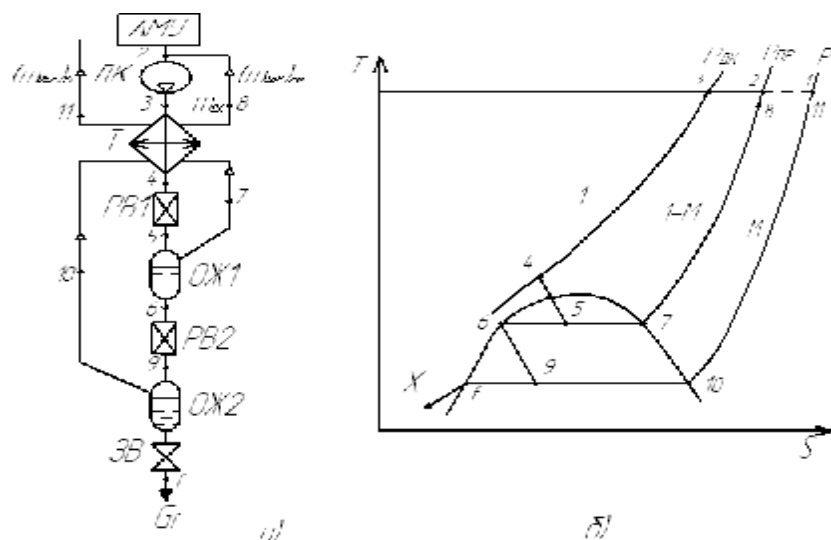


Рисунок 1 – Расчетная схема цикла с двойным дросселированием и циркуляцией части потока:

а) – принципиальная схема; б) – изображение цикла

Обозначения: АМУ – азотно-мембранная установка; ДК – дожимной компрессор; Т – основной теплообменник; PB1, PB2 – регулирующие вентили; OЖ1, OЖ2 – отделители жидкости; ЗВ – запорный вентиль; 1,2,3,...,11 – узловые точки параметров цикла; P_1 – давление выпуска жидкого азота; P_{PP} – промежуточное давление; $P_{ДК}$ – давление после дожимного компрессора; M – доля потока низкого давления; $(\dot{m}_{OBR})_{P_1}$ – массовый расход обратного потока при давлении P_1 .

Для данного цикла уравнение для коэффициента ожижения имеет вид

$$X = \frac{M \cdot i_{11} + (1 - M) \cdot i_8 - i_3 - q_{OC}}{i_{11} - i_f}, \quad (7)$$

где q_{OC} – удельный теплоток из окружающей среды.

Состояния в точках 11 и 8 принимаются с учетом недорекуперации соответствующих потоков в основном теплообменнике.

Удельный расход энергии на получение 1 кг жидкого азота можно представить следующей зависимостью:

$$(l_0)_{Af}^{ДД} = \frac{1}{X} \cdot [(l_0)_A \cdot M + l_{ДК}], \quad (8)$$

или с учетом обозначений для уравнения (4)

$$(l_0)_{Af}^{ДД} = (M + \bar{l}) \cdot \frac{(l_0)_A}{X}. \quad (9)$$

Для равных значений $P_{ПР}$, T_2 и $P_{ДК}$ и соответственно удельной работы дожимного компрессора соотношение удельных расходов цикла с двойным дросселированием и цикла с однократным дросселированием будет характеризоваться выражением

$$Y = \frac{(l_0)_{Af}^{ДД}}{(l_0)_{Af}^{ОД}} = \frac{X^{ОД}}{X^{ДД}} \cdot \frac{M + \bar{l}}{1 + \bar{l}}, \quad (10)$$

где $X^{ОД}$ и $X^{ДД}$ – коэффициенты ожижения для цикла с однократным дросселированием и двойным дросселированием соответственно.

На рисунке 2 представлены расчетные значения рассматриваемого соотношения Y в зависимости от выбора давления нагнетания дожимного компрессора, $P_{ДК}$ и доли потока после второго дросселирования, M .

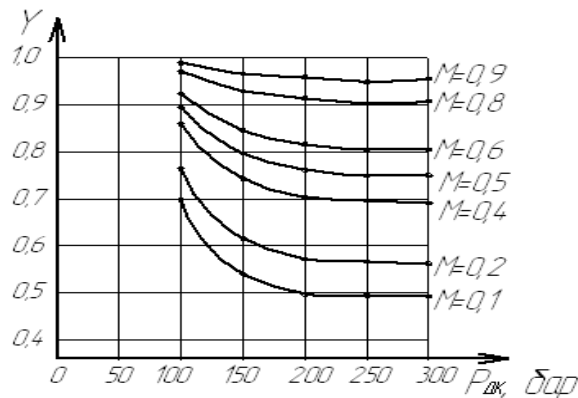


Рисунок 2 – График функции $Y = f(P_{ДК}, M)$

Как следует из данного графика, с ростом доли $1 - M$ энергоэффективность цикла с двойным дросселированием и циркуляцией части потока возрастает. Влияние уровня давления после дожимного компрессора проявляется главным образом в области значений $(1 - M) > 0,5$.

В таблице 1 приведены расчетные значения производительности криомодуля установки АМВП-0,25/1,2 по жидкому азоту.

По приведенным показателям можно установить соответствующие в таблице 1 значения $P_{ДК}$ и M для обеспечения выбранной производительности G_f с позиций ее рационального максимума.

Для указанного выше второго варианта выбора дроссельного цикла ожижения можно использовать данные, представленные в таблице 2. Как показывает график зависимости $Y = f(P_{ДК}, M)$, энергоэффективность цикла с двойным дросселированием для равных термических параметров после дожимного компрессора всегда выше, чем для цикла с однократным дросселированием. По этой причине в таблице 2 приведены значения удельного расхода энергии только для цикла с двукратным дросселированием, рассчитанные по уравнению (9).

Таблица 1 – Показатели выхода жидкого азота

$P_{ДК}, \text{бар}$		100	150	200	250	300
Цикл с однократным дросселированием						
$G_f, \text{кг/час}$		1,7	2,53	3,36	3,77	4,19
Цикл с двойным дросселированием						
$G_f, \text{кг/час}$	$M = 0,9$	1,77	2,69	3,62	4,08	4,54
	$M = 0,8$	1,87	2,90	3,94	4,46	4,98
	$M = 0,6$	2,14	3,52	4,91	5,60	6,29
	$M = 0,5$	2,37	4,02	5,68	6,51	7,34
	$M = 0,4$	2,69	4,77	6,84	7,88	8,92
	$M = 0,2$	4,35	8,50	12,65	14,72	16,80
$M = 0,1$	7,67	15,97	24,27	28,41	32,56	

Таблица 2 – Удельный расход энергии для цикла с двойным дросселированием

$P_{ДК}, \text{бар}$	$(l_0)_{Af}, \text{кВт} \cdot \text{ч/кг}$						
	M						
	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
100	14,02	13,75	13,09	12,68	12,18	10,84	9,89
150	9,64	9,27	8,44	7,95	7,41	6,14	5,38
200	7,40	7,06	6,31	5,88	5,43	4,41	3,84
250	6,72	6,39	5,69	5,30	4,89	3,97	3,47
300	6,14	5,84	5,18	4,82	4,45	3,62	3,17

ВЫБОР ДРОССЕЛЬНОГО ЦИКЛА ДЛЯ КРИОМОДУЛЯ

Выбор того или иного дроссельного цикла при применении дожимного компрессора характеризуется некоторой многовариантностью в зависимости от приоритетов, связанных с практической реализацией функционирования рассматриваемой установки в режиме получения жидкого азота. В этом аспекте выделим следующие варианты:

1. Криомодуль должен обеспечивать максимально возможную производительность по жидкому азоту.
2. Инвестиционные и эксплуатационные расходы по криомодулю должны обеспечивать конкурентоспособную себестоимость вырабатываемого жидкого азота.

При расчете цикла с однократным дросселированием коэффициент ожижения определяют относительно массового расхода газа через компрессор, который в данном случае равен производительности установки по газообразному продукту. Таким образом, реализуя криомодуль по подобному циклу, максимум производительности по

жидкому продукту будет соответствовать максимуму коэффициента ожижения ввиду постоянства параметра \dot{m}_A , равного $\dot{m}_{ДК}$. Если не применять предварительное внешнее охлаждение, то максимализация производительности G_f будет ограничиваться рациональным уровнем давления, создаваемым дожимным компрессором.

Для цикла с двойным дросселированием производительность криомодуля по жидкому продукту зависит как от величины коэффициента ожижения, так и производительности дожимного компрессора, которая, в свою очередь, стремится к максимуму с увеличением доли циркуляционного потока.

Выбор параметров $P_{ДК}$ и M предпочтительно выполнять на базе термоэкономических показателей по аналогии с анализом, представленным в [2].

ВЫВОДЫ

1 Применение дожимного компрессора в составе криомодуля для азотно-мембранной установки расширяет возможности получения жидкого азота в сопоставлении со схемами, реализующими комбинированные циклы низкого давления.

2 Реализация криомодуля по циклу с двойным дросселированием и циркуляцией части потока является более целесообразным решением из всего спектра дроссельных циклов для рассматриваемой установки.

3 Выбор доли обратного потока низкого давления должен быть увязан с экономическими расчетами ввиду значительной стоимости дожимных мембранных компрессоров.

4 Рекомендуемые значения диапазона основных параметров для криомодуля $P_{ДК} = 150...200 \text{ бар}$; $M = 0,45...0,55$.

SUMMARY

THE ANALYSIS OF NITROGEN FLUIDIZATION CIRCUIT FOR AMBII-0.25/1.2 WITH THE APPLICATION OF PRESSING COMPRESSOR

V.M. Arsenyev, S.M. Vaneyev, M.I. Protsenko, G.V. Kirik, A.D. Stadnik**
Sumy State University

**International institute of compressor and power engineering, Sumy*

In the article calculation dependences are offered for the estimation of power efficiency of fluidizing cycles high pressure as it applies to cryomodule of the nitric-diaphragm setting. The recommended values of basic parameters to compressor of finishing pressing out for cryomodule.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арсеньев В.М., Ванеев С.М., Кирик Г.В., Стадник А.Д. Анализ технических возможностей создания модулей ожижения для азотно-мембранных установок // Вестник СумДУ. - 2007. - №3. - С. 5-9.
2. Арсеньев В.М., Ванеев С.М., Проценко М.И., Кирик Г.В., Стадник А.Д. Оптимизация схемного решения криомодуля для азотно-мембранной винтовой установки // Холодильна техніка і технологія. - 2008. - № 2(112). - С. 9 - 13.
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.

Поступила в редакцию 12 декабря 2008 г.