

А. И. Смородин, В. В. Редькин,
О. В. Кемаев, А. А. Коробков

ВЫБОР ПРИНЦИПАЛЬНЫХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ РЕФРИЖЕРАТОРНЫХ И ОЖИЖИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ МНОГОРЕЖИМНЫХ АЗОТНЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рассмотрены принципиальные структурные схемы рефрижераторных и ожижительных установок для крупнотоннажных азотных криогенных систем атомных электростанций. Оптимизация и выбор схем установок проводились по последовательно применяемым критериям надежности и термодинамической эффективности.

E-mail: crio@power.bmstu.ru

Ключевые слова: криогенный цикл, криогенный комплекс, криогенная система, реконденсация, обратная конденсация паров, недогретая криогенная жидкость, влажно-паровой турбодетандер, комплекс технологической защиты.

Одной из основных систем комплекса технологической защиты атомных электростанций (АЭС) является система охлаждения и флегматизации азотом атомных реакторов. Система применяется как при плановых и внеплановых остановах, так и в аварийных ситуациях. В последнем случае, как показал опыт ликвидации аварий на Чернобыльской АЭС и на АЭС в Японии, требуется форсированное охлаждение реактора с расходом азота на порядок больше, чем при флегматизации. Для этой цели на площадках АЭС в аварийном порядке создаются крупнотоннажные системы хранения жидкого азота. Неэффективность такого технического решения для аварийной защиты реактора АЭС в условиях дефицита времени очевидна.

Альтернативным техническим решением, обеспечивающим форсированное охлаждение атомного реактора с последующей флегматизацией, является включение в комплекс технологической защиты (КТЗ) АЭС крупнотоннажной многорежимной азотной криогенной системы (МАКС). Данная система строится по энерготехнологической схеме и включает в себя следующие базовые подсистемы:

- рефрижераторную азотную подсистему для реконденсации паров азота при проведении процессов охлаждения и флегматизации во время плановых и внеплановых остановов на АЭС;
- ожижительную азотную подсистему для получения, накопления и использования жидкого азота для охлаждения и флегматизации атомного реактора в аварийных ситуациях на АЭС;
- подсистему хранения и выдачи жидкого азота;

— подсистему форсированной газификации жидкого азота с реверсивными тепловыми аккумуляторами;

— подсистему аварийного энергоснабжения с газотурбинной установкой (ГТУ) с дополнительной парогазовой камерой сгорания и азотным турбодетандером-электрогенератором, работающим на перепаде давления газифицированного азота.

Теплота отработавших продуктов сгорания топлива ГТУ используется реверсивными тепловыми аккумуляторами, а также для перегрева газифицированного азота перед подачей в турбодетандер-электрогенератор.

Технический уровень системы МАКС зависит от совершенства схемных решений [1, 2] входящих в МАКС подсистем и, в значительной мере, от КПД и надежности машинного оборудования энергетической, рефрижераторной и ожижительной установок.

Целью настоящей работы является выбор принципиальных схемных решений и криогенных циклов, которые могут быть положены в основу создания установки реконденсации паров азота, входящей в рефрижераторную азотную подсистему, и установки получения и ожижения азота, входящей в ожижительную азотную подсистему.

На этапе выбора рефрижераторного цикла для установки реконденсации паров азота сравнивали следующие криогенные циклы:

— одноступенчатый цикл низкого давления ($p_2 = 0,7$ МПа) с газовым турбодетандером (цикл акад. П.Л. Капицы);

— соединенный цикл (Линде–Брайтона) низкого давления с влажно-паровым детандером ($p_2 = 1,0$ МПа).

Для построения принципиальных структурных схем рефрижераторных детандерных установок (РДУ) были выбраны следующие турбоагрегаты:

- турбокомпрессоры низкого давления для сжатия воздуха;
- турбодетандер (компрессорный агрегат низкого давления), работающий как на газовых, так и на влажно-паровых потоках.

Исходные данные для проведения оптимизационных термодинамических расчетов схем РДУ, построенных по этим циклам, представлены в табл. 1.

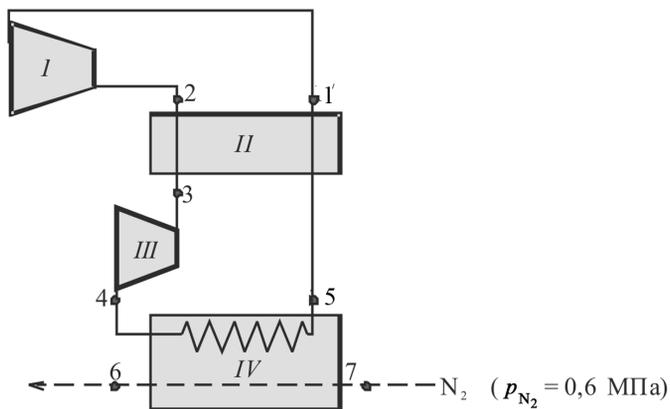
При этом было принято, что внешняя работа турбодетандеров l_d используется для дожатия всего прямого потока криоагента от давления после компрессора p_2 до p'_2 ($p'_2 = 1,15p_2$); паросодержание криоагента на выходе из детандера в схеме Линде–Брайтона $x \geq 0,93$.

На рисунке *a, б* представлены принципиальная схема воздушно-го одноступенчатого регенеративного цикла РДУ с влажно-паровым детандером и sT -диаграмма протекающих в нем процессов. В этом цикле рабочее тело — воздух после охлаждения до температуры

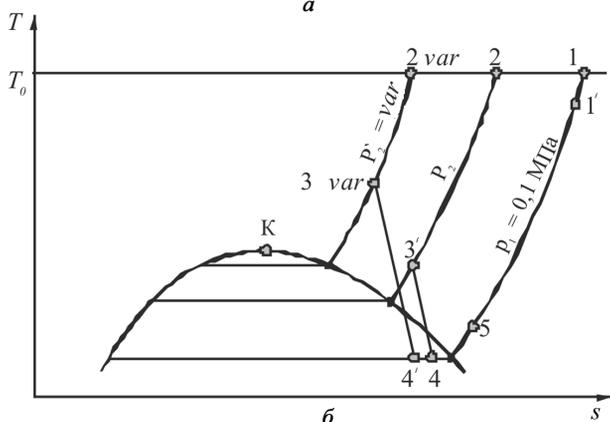
Таблица 1

Детандерный цикл (схема) РДУ	Принимаемые значения							
	p_2 , МПа	q_Σ , кДж/кг	$\eta_{\text{из}}$	η_s	$1 + \delta_y$	x (после т/д)	$\lambda_{\text{ч/к}}$, ч ⁻¹	$\lambda_{\text{т/д}}$, ч ⁻¹
Линде–Брайтона низкого давления с влажно-паровым детандером	1,0	1,5	0,70	0,80	1,03	0,93...0,99	$\frac{1}{10.000}$	$\frac{1}{20.000}$
Одноступенчатый низкого давления (акад. П.Л. Капицы) с газовым турбодетандером	0,7	1,5	0,70	0,80	1,03	1,0	$\frac{1}{10.000}$	$\frac{1}{20.000}$

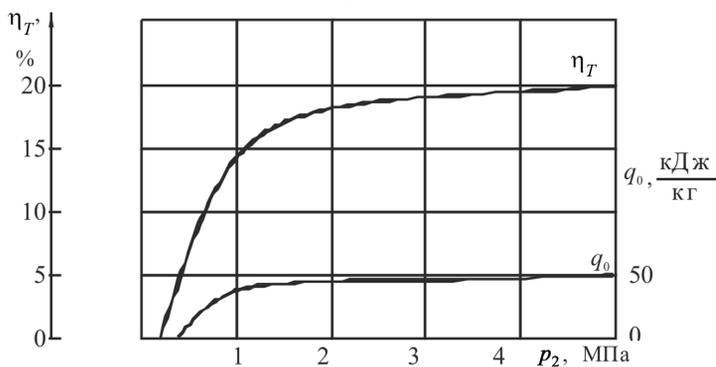
Примечание. Давление обратного потока во всех схемах $p_1 = 0,1$ МПа; q_Σ — приток теплоты из окружающей среды (на 1 кг сжатого криоагента); δ_y — потери сжатого криоагента; $\eta_{\text{из}}$ — изотермический КПД компрессора; η_s — КПД детандера; $\lambda_{\text{ч/к}}$, $\lambda_{\text{т/д}}$ — интенсивности отказов соответственно турбокомпрессоров и турбодетандеров; x — паросодержание.



а



б



в

Рефрижераторная детандерная установка с влажно-паровым детандером ($\Delta T_1 = 10 \text{ К}$; $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $\Delta T_k = 3 \text{ К}$; $T_H = 94,01 \text{ К}$; $p_H = 0,6$; $p_2 = \text{var}(1,0 \dots 3,0 \text{ МПа}$; $x = \text{var}(0,93 \dots 0,99)$):

а — принципиальная схема одноступенчатого цикла воздушной РДУ с влажно-паровым детандером; б — соответствующая sT -диаграмма; в — характеристики цикла: η_T , q_0

83...84 К (двухфазное состояние) используется для конденсации азота при $p = 0,6$ МПа и температуре $T \approx 94$ К.

На рисунке 6 приведены расчетные характеристики воздушного влажно-парового цикла воздушной РДУ: термодинамический КПД η_T и удельная холодильная мощность q_0 .

При работе на низком давлении ($p_2 = 1,2$ МПа) КПД цикла $\eta_T = 15,6$ %.

Повышение p_2 до 3 МПа приводит к незначительному росту эффективности цикла: при $p_2 = 3$ МПа $\eta_T = 18$ %, что на 15 % больше, чем при $p_2 = 1,2$ МПа.

При значении $p_2 = 0,7$ МПа в цикле акад. Капицы с газовым детандером $\eta_T = 10$ %, что примерно на 35 % меньше, чем при $p_2 = 1,2$ МПа в цикле с влажно-паровым детандером.

Для того чтобы отдать предпочтение схеме среднего или низкого давления, сравним интенсивности отказов λ их машинного оборудования. У турбокомпрессоров среднего и низкого давления значения λ существенно не различаются [3, 4]. Интенсивность отказов турбодетандеров среднего давления $\lambda_{т/д}^{с.д.} \approx 1/2000 \text{ ч}^{-1}$, а турбодетандеров низкого давления $\lambda_{т/д}^{н.д.} \approx 1/20000 \text{ ч}^{-1}$ [2, 5].

Сравнение показателей безотказности турбодетандеров среднего и низкого давления предопределяет выбор схемы РДУ низкого давления для комплекса технологической защиты АЭС.

Дополнительное преимущество цикла низкого давления состоит в том, что установки, построенные на его основе, могут быть укомплектованы высокоэффективными пластинчато-ребристыми теплообменниками.

Таким образом, можно считать, что в настоящее время схему с турбомашинной РДУ целесообразно строить на основе цикла низкого давления ($p_2 = 1,0 \dots 1,2$ МПа) с влажно-паровым детандером. Одна из модификаций РДУ с влажно-паровым детандером была положена в основу рабочего проекта установки обратной конденсации паров азота УОК-1000 производительностью 1000 кг/ч, разработанной ОАО “Криогенмаш” для АЭС “Сосновый бор”.

Выбор криогенного цикла и принципиальной структурной схемы крупнотоннажной воздухоразделительной установки для производства и накопления жидкого азота (ВРУ типа Аж) в оживительной подсистеме МАКС АЭС проводился по последовательно применяемым критериям: надежность, термодинамическая эффективность криогенного цикла ВРУ типа Аж.

При сравнении вариантов схем ВРУ типа Аж использовались результаты расчетных исследований [6], проектные данные ОАО “Криогенмаш” [7] и показатели безотказности машинного оборудования [2, 4].

В качестве конкурирующих вариантов криогенных циклов рассматривались:

— цикл среднего давления с турбодетандером, предварительным охлаждением воздуха в холодильной машине и разделением воздуха в узле двукратной ректификации (для установки ОАО “Криогенмаш” ВРУ типа Аж среднего давления [7]);

— цикл “Компаунд” акад. П.Л. Капицы [8] с детандерованием азота низкого давления в циркуляционном цикле и дросселированием технологического потока воздуха среднего давления (для ВРУ типа Аж двух давлений);

— цикл “Компаунд–МВТУ” с детандированием воздуха низкого давления в циркуляционном цикле и двухступенчатым дросселированием технологического потока воздуха среднего давления (для ВРУ типа Аж двух давлений с воздушным турбокомпрессором низкого давления и дожимающим воздушным турбокомпрессором).

На этапе сравнения конкурирующих вариантов принципиальных структурных схем ВРУ типа Аж по критерию надежности рассматривались показатели безотказности машинного оборудования, на базе которого построены схемы установок. Сравнительные показатели безотказности машинного оборудования конкурирующих вариантов схем представлены в табл. 2.

Исходя из требований к безотказности элементной базы АЭС для этапа выбора криогенного цикла и принципиальной структурной схемы по критерию термодинамической эффективности оставлены равнонадежные конкурирующие варианты 2 и 3. Сравнительные показатели термодинамической эффективности криогенных циклов, на базе которых построены эти схемы, приведены в табл. 3.

Сравнение равнонадежных принципиальных структурных схем ВРУ типа Аж–“Компаунд” и Аж–“Компаунд–МВТУ” по удельному расходу энергии ($l_{уд}$) позволяет выбрать для системы МАКС АЭС в качестве основного варианта схему ВРУ типа Аж, построенную по модифицированному криогенному циклу “Компаунд–МВТУ”. При этом следует отметить преимущества, которые показала опытная эксплуатация ВРУ, работающей по схеме “Компаунд”, по сравнению с серийными установками высокого давления [8]:

- быстрый вывод на рабочий режим (не более двух часов);
- простота технологической схемы и использование турбомашинного оборудования позволяет свести к минимуму число персонала;
- пониженное давление сжатия упрощает и удешевляет изготовление аппаратуры холодного блока;
- высокая эксплуатационная надежность и эффективность благодаря использованию турбомашин с высокими КПД.

Таблица 2

Принципиальная структурная схема (цикл)	p_2 , МПа	$\lambda_{т/к}^{н.д.}$, $ч^{-1}$	$\lambda_{т/д}^{с.д.}$, $ч^{-1}$	$\lambda_{т/к}^{н.д.}$, $ч^{-1}$	$\lambda_{т/д}^{с.д.}$, $ч^{-1}$	$\lambda_{хм}$, $ч^{-1}$
1. ВРУ типа Аж, построенная по циклу среднего давления с турбодетандером и холодильной машиной с винтовым компрессором	3,0	—	$\frac{1}{20.000}$	—	$\frac{1}{2000}$	$\frac{1}{5000}$
2. ВРУ типа Аж двух давлений, построенная по циклу “Компаунд” акад. П.Л. Капицы с азотным турбодетандером и турбокомпрессором низкого давления, а также с воздушным турбокомпрессором среднего давления	3,0	$\frac{1}{20.000}$	$\frac{1}{20.000}$	$\frac{1}{10.000}$	—	—
3. ВРУ типа Аж двух давлений, построенная по циклу “Компаунд-МВГУ” с воздушным турбодетандером и турбокомпрессором низкого давления, а также с воздушным дожимающим турбокомпрессором	3,0	$\frac{1}{20.000}$	$\frac{1}{20.000}$	$\frac{1}{10.000}$	—	—

Таблица 3

Криогенный цикл ВРУ-АЖ	$\eta_{\text{из.т/к}}^{\text{с.д}}$	$\eta_{\text{из.т/к}}^{\text{н.д}}$	$\eta_{\text{ад.т/д}}^{\text{н.д}}$	p_2 , МПа	$P_{\text{ж.}N_2}$, МПа	$l_{\text{ул}}$, кВт·ч/лж N_2
1. Цикл “Компаунд” с детандированием азота низкого давления в циркуляционном цикле и дросселированием воздуха среднего давления ($p_2 = 1,9$ и $4,0$ МПа)	0,60 0,70	0,70 0,70	0,80 0,85	1,9 4,0	0,10 0,10	0,96 0,80
2. Цикл “Компаунд-МВГУ” с детандированием воздуха низкого давления в циркуляционном цикле и двухступенчатым дросселированием воздуха среднего давления	0,70	0,70	0,85	4,0	0,50...0,80	0,64

П р и м е ч а н и е. $\eta_{\text{из.т/к}}^{\text{с.д}}$ и $\eta_{\text{из.т/к}}^{\text{н.д}}$ — изотермические КПД турбокомпрессоров среднего и низкого давления; $\eta_{\text{ад.т/д}}^{\text{н.д}}$ — адиабатический КПД турбодетандера низкого давления; $P_{\text{ж.}N_2}$ — давление продуccionного жидкого N_2 ; $l_{\text{ул}}$ — удельный расход энергии.

Перечисленные преимущества относятся также и к выбранным вариантам РДУ и ВРУ типа Аж “Компаунд–МВТУ”, оснащенным высоконадежными турбомашинами низкого давления.

При этом отметим, что повышенная термодинамическая эффективность ВРУ типа Аж “Компаунд–МВТУ” достигается за счет двухступенчатого дросселирования воздуха среднего давления; получения и хранения продукционного жидкого азота при повышенном давлении 0,5...0,8 МПа и при более высокой температуре [9, 10].

Таким образом, выбранные схемные решения турбомашинных РДУ и ВРУ типа Аж “Компаунд–МВТУ” целесообразно использовать при построении надежных и эффективных многорежимных азотных криогенных систем атомных электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М а т ю х и н В. Г. Термодинамический анализ систем криостатирования // Сб. науч. трудов НПО “Криогенмаш”, 1978 г. – С. 28–41.
2. С р а в н и т е л ь н ы й анализ криогенных циклов установок обратной конденсации паров азота / Е.И. Микулин, Н.В. Филин, В.В. Редькин и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1993. – № 2. – С. 14–17.
3. К а д и Ф. Дж. Оптимизация ГХУ для СП ЛЭП по стоимости и надежности // Тр. Амер. общества инженеров механиков. Конструирование и технология машиностроения. – 1977. – № 3. – С. 38–46.
4. Т а р а с о в В. М. Эксплуатация компрессорных установок. – М.: Машиностроение, 1987. – 146 с.
5. Д а в ы д о в А. Б., К о б у л а ш в и л и А. Ш. Расчет и конструирование турбодетандеров. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
6. Б е л ь я к о в В. П. Криогенная техника и технология. – М.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.
7. В о з д у х о р а з д е л и т е л ь н ы е установки нового поколения: Проспект ОАО “Криогенмаш”. Балашиха, 2007 г. – С. 18.
8. К а п и ц а П. Л. Научные труды. Физика и техника низких температур. – М.: Наука, 1989. – 392 с.
9. Х р з В. Новые технологии компании CHART для хранения и распределения криогенных газов // 2-я Междунар. конф. “Промышленные газы”, 2011. – С. 77–86.
10. Р е д ь к и н В. В. Хладоснабжение систем хранения и транспорта сжиженного природного газа с гомологами метана // Газовая промышленность. – 1975. – № 11. – С. 17–18.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012