

УДК 621.59:620.92

ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ АЭС ЗА СЧЕТ КРИОГЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. Н. Потеряев¹, И. А. Сивинских², И. Э. Розаненков³, С. Е. Щеклеин⁴

^{1,2,3,4} Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ poteriaev.stas@yandex.ru

Аннотация. В работе представлено одно из возможных решений повышения маневренности атомных электростанций (АЭС) — использование криогенных технологий накопления энергии. Проанализирован ряд циклов ожижения для поиска наиболее эффективного.

Ключевые слова: жидкий воздух, криоэнергетика, циклы ожижения воздуха, аккумулирование энергии

INCREASED MANEUVERABILITY OF NUCLEAR POWER PLANTS DUE TO CRYOGENIC TECHNOLOGIES

S. N. Poteryaev¹, I. A. Sivinskikh², I. E. Rozanenko³, S. E. Shcheklein⁴

^{1,2,3,4} Ural Federal University named after the First
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

¹ poteriaev.stas@yandex.ru

Abstract. This work presents one of the possible solutions to increase the maneuverability NPP — use of cryogenic energy storage technologies. Several liquefaction cycles analyzed to find the most effective one.

Keywords: liquid air, cryoenergy, air liquefaction cycles, energy storage

Разработка способов повышения маневренности атомных электростанций (АЭС) позволит энергоблокам участвовать в регулировании суточного графика электрической нагрузки, что существенно повысит их конкурентность на рынке, а также повысит надежность энергосистемы в целом. Идеальным способом маневрирования будет

тот, при котором изменения режимов работы самой реакторной установки будут минимальными [1].

Одним из активно развиваемых в мире способов накопления энергии, т. е. создания возможности маневрирования выдаваемой в сеть мощностью, является получение такой энергоемкой среды, как сжиженный воздух (системы LAES).

Рассмотрим установку (рис. 1), разработанную компанией Highview power storage [2], использующую циклы ожизнения методом адиабатического расширения газа в детандере [3].

Процессы, происходящие в установке, делятся на три этапа:

- 1) сжижение воздуха по циклу среднего давления (т. е. «заряд» аккумулятора);
- 2) хранение сжиженного воздуха (с параметрами -196°C , 1 бар);
- 3) получение энергии путем подогрева и регазации воздуха и пропускании его через турбину.

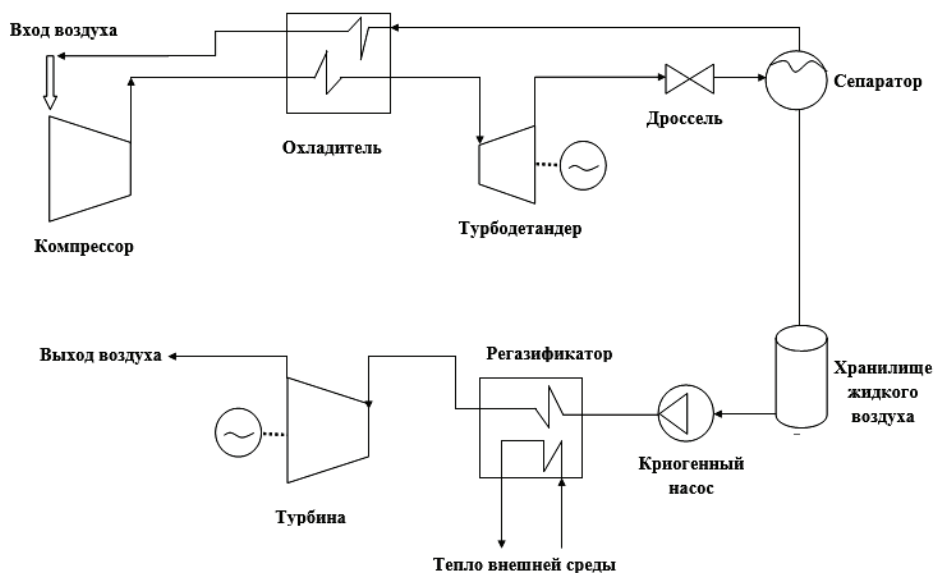


Рис. 1. Схема установки Highview power storage

Эффективность, достигаемая такой установкой, составляет более 50 % (при использовании тепла окружающей среды). При подогреве сбросовым теплом уходящих газов теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) ($110...115^{\circ}\text{C}$) эффективность доходила до 70 % [4].

Для совершенствования такой технологии выполнено моделирование с помощью программы Aspen Hysys [5]. Схема для цикла условно разделена на 2 части: ожижительная часть (рис. 2) и турбинная часть.

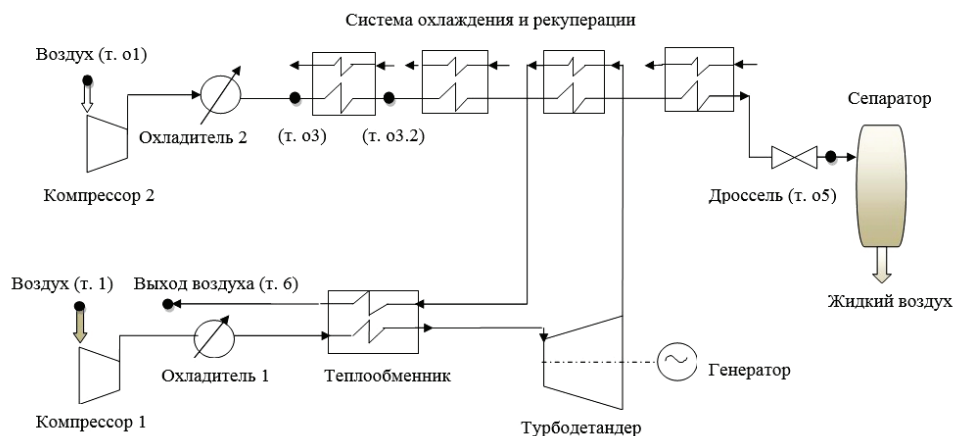


Рис. 2. Схема ожижительной части установки

При построении модели принято, что используется промежуточное охлаждение между ступенями компрессора. Ожижение воздуха происходит следующим образом:

- 1) линия 1...6 является замкнутой, предназначена для отвода основного количества тепла от линии 01...05;
- 2) линия 01...05 является линией ожижения. Этап 03...03.2 моделирует проход воздуха через аккумулятор холода (эффективность $AX = 70\%$).

Перед турбиной жидкий воздух сжимается до давления 70 бар и подогревается до температуры 30 °С. Турбина пятиступенчатая с промежуточным подогревом.

Общую эффективность цикла находим по формуле:

$$\eta_{\text{цикла}} = \eta_{\text{ож}} \eta_{\text{турб}},$$

где $\eta_{\text{ож}}$ — эффективность ожижительной части; $\eta_{\text{турб}}$ — эффективность турбинной части.

Эффективность ожижительной части определяем как:

$$\eta_{\text{ож}} = \frac{l}{0,2},$$

где l — удельная работа на получение 1 кг жидкого воздуха, (кВт · ч)/кг [6]; 0,2 — минимальная работа на получение 1 кг жидкого воздуха [6].

Эффективность турбинной части находим по формуле:

$$\eta_{\text{турб}} = \frac{Q_1}{Q_2},$$

где Q_1 — энергия, выработанная в турбине, кВт; Q_2 — энергия, затраченная на подогрев воздуха, кВт.

Результаты расчетов при разных давлениях сжатия (при использовании тепла окружающей среды) представлены в таблице.

Таблица

Сравнение циклов работы установки

Цикл	Давление сжатия, бар	l , (кВт · ч)/кг	$\eta_{\text{цикла}}$
Цикл среднего давления	40	0,60	0,48
Цикл промежуточного давления	150	0,51	0,59
Цикл высокого давления	200	0,49	0,61

По данным, представленным в таблице, можно сделать вывод, что самым эффективным является цикл на высоком давлении, что совпадает с существующими данными [6]. Подобные криоэнергетические установки (LAES) обладают рядом преимуществ: они не привязаны к географическому положению станции, компактны и просты в строительстве и обслуживании.

Список источников

1. Беркович В. М., Горохов В. Ф., Татарников В. П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций // Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Highview power [Electronic resource]. URL: <https://www.highviewpower.com/> (date of access: 20.10.2020).
3. Физика низких температур / Дж. Доунт [и др.] ; ред. пер. А. И. Шальников. М. : Изд-во иностр. лит., 1959. 937 с.
4. Санников В. Криоэнергетика: криогенная электростанция [Электронный ресурс] // Популярная механика. 2012. № 6. URL: <https://www.>

popmech.ru/technologies/12689-prodavtsy-vozdukha-krioenergetika/ (дата обращения: 08.10.2020).

5. Краснобородько Д. А., Кулишенко Р. Ю., Холоднов В. А. Моделирование экстрактивной ректификации с помощью информационно-моделирующей программы Aspen Hysys. СПб. : СПбГТИ (ТУ), 2018. 62 с.

6. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. М. : Химия, 1967. 847 с.