УДК 621.311.22:628.477

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

М. Ф. ШАГЕЕВ, Э. Р. ЗВЕРЕВА, Р. И. ГИЛЬМУТДИНОВА
Казанский государственный энергетический университет
Казань, Россия

Актуальность проблемы утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) тепловых электрических станций (ТЭС) в условиях Арктической зоны обусловлена высокими экологическими рисками и жесткими логистическими ограничениями. В России ежегодно образуется около 25 млн т ЗШО, при этом уровень утилизации составляет лишь 4 %, что значительно отстает от показателей европейских стран (90 %...100 %) [1]. Для арктических ТЭС проблема усугубляется экстремальными климатическими условиями (температуры – от –40 °С до +30 °С), ограниченной инфраструктурой и высокими транспортными расходами. Целью работы является сравнительная оценка двух путей вовлечения ЗШО в хозяйственный оборот: производство строительных материалов и извлечение редкоземельных металлов (РЗМ). Объектом исследования выбрана Апатитская ТЭЦ (филиал «Кольский» ПАО «ТГК-1», Мурманская область, РФ).

В ходе исследования выполнен теплотехнический расчет котлоагрегата ПК-10п-2 (Е-220-100), сжигающего каменный уголь марки Д (зольность – 15,9 %). Определены низшая теплота сгорания топлива (22 337,7 кДж/кг), КПД котла (82,35 %), расчетный расход топлива (5,8 кг/с). Годовой объем образования ЗШО составил 193 600 т. Рентгенофлуоресцентный анализ золы показал высокое содержание SiO_2 (51,28 %) и Al_2O_3 (23,05 %), что обеспечивает высокую пуццолановую активность для строительного применения. Также выявлено присутствие РЗМ (до 700 г/т), включая церий (191,6 г/т), рубидий (28,6 г/т), скандий (22,1 г/т), потенциальная стоимость которых превышает 80 000 р./т.

Экономическая оценка проводилась с расчетом чистого дисконтированного дохода (NPV), индекса доходности (PI) и срока окупаемости. Для строительного направления (замена 50 % песка в бетоне) при CAPEX 40 млн р. NPV составил 117,02 млн р. при PI = 2,93 и сроке окупаемости 1,24 года. Для извлечения металлов при CAPEX 200 млн р. NPV равен 124,15 млн р., PI = 0,62, срок окупаемости составил 3,01 года.

Для объективного выбора оптимального пути применен многокритериальный анализ методом TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) по семи критериям: чистый дисконтированный доход (NPV); срок окупаемости; капитальные затраты (CAPEX); индекс доходности (PI); годовой чистый денежный поток; экономия на экологических платежах; добавленная стоимость [2]. Веса критериев рассчитаны методом энтропии. Относительная близость альтернативы к идеальному решению определяется по формуле

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-},$$

где D_i^+, D_i^- – расстояния до идеального и анти-идеального решений соответственно.

Результаты показали, что метод энтропии присвоил максимальные веса критериям с наибольшей дисперсией между альтернативами: добавленная стоимость (w_7 = 0,329), CAPEX (w_3 = 0,263) и индекс доходности (w_4 = 0,250). Критерий NPV получил минимальный вес (w_1 = 0,001) из-за близких значений у обеих альтернатив. Строительное направление имеет наибольший коэффициент близости (C_i = 0,560 против 0,440 у извлечения металлов) за счет низких капитальных затрат, быстрой окупаемости и высокого индекса доходности, что минимизирует инвестиционные риски в условиях финансовой нестабильности предприятия.

Практические рекомендации для ПАО «ТГК-1» включают комбинированный подход: на первом этапе (1–2 года) – внедрение строительного направления для быстрого получения дохода и снижения экологической нагрузки; на втором этапе (3–5 лет) – пилотные испытания технологии извлечения РЗМ с постепенным масштабированием при улучшении финансового состояния компании [3, 4]. На региональном уровне реализация строительного направления позволит исключить захоронение 193 600 т ЗШО ежегодно, снизив экологическую нагрузку на хрупкую арктическую экосистему Мурманской области и создав локальный рынок вторичных строительных материалов.

Таким образом, для арктических ТЭС в качестве первоочередной стратегии рекомендуется внедрение строительного направления утилизации ЗШО, что обеспечит быструю окупаемость, снижение экологической нагрузки и соответствие целям Энергетической стратегии РФ до 2050 года (достижение 50 % утилизации к 2036 г.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексное использование золошлаковых отходов / О. В. Афанасьева, Г. Р. Мингалеева, А. Д. Добронравов, Э. В. Шамсутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 7–8. – С. 26–36.

2. Processing of Ash and Slag Waste from Coal Fuel Combustion at CHPPs in the Arctic Zone of Russia with Obtaining Porous Geopolymer Materials / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, S. V. Trofimov [et al.] // Therm. Eng. – 2022. – Vol. 69. – P. 615–623.

3. **Красавцева, Е. А.** Особенности состава и свойств золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ / Е. А. Красавцева, Л. А. Иванова // Арктика: экология и экономика. – 2025. – Т. 15, № 4. – С. 619–627.

4. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций / Э. Р. Зверева, В. П. Плотникова, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 2 (42). – С. 15–26.