

DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61  
УДК 628.477.7:338.22.021.4:519.816

## Выбор способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС с применением метода анализа иерархий Т. Саати

Федорова Н. В.<sup>1</sup>, Ефимов Н. Н.<sup>1</sup>, Федоров Ю. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова  
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

<sup>2</sup> Южный федеральный университет  
Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

Поступила / Received 21.12.2017

Принята к печати / Accepted for publication 16.02.2018

Утилизация золы и шлака угольных ТЭС является проблемой для всех стран, использующих уголь в энергетических целях. В России 20% электроэнергии производится на тепловых электростанциях, сжигающих уголь, и согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 г. не планируется снижать эту долю. Всего в мире в золошлакоотвалах к настоящему времени накоплено свыше 1,5–2 млрд т золошлаковых отходов (ЗШО). Площадь золошлакоотвалов в РФ достигает 28 тыс. га, при этом утилизируется и используется не более 8% годового выхода ЗШО, который составляет около 30–50 млн т. Затраты на содержание ЗШО составляют 5–7% себестоимости производства энергии на угольной ТЭС. В настоящее время разработан ряд способов утилизации золошлаков, учитывающих их физико-химические свойства, особенности формирования и складирования, потребности и возможности переработки техногенного сырья. На рынке спецтехники предлагаются линейки соответствующего оборудования, создаются предприятия и организации, готовые утилизировать золошлаки. Возникает задача многокритериального выбора оптимального способа утилизации. Для решения задач выбора стратегии из ряда альтернативных вариантов с 70-х годов XX века успешно применяется метод анализа иерархий, разработанный американским математиком Т. Саати. Данная работа посвящена применению метода Саати к выбору способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** утилизация золы и шлака угольных ТЭС, выбор стратегии модернизации промышленного объекта, метод анализа иерархий Саати.

### Адрес для переписки:

Федорова Н. В.  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова  
Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132  
e-mail: fedorovanv61@rambler.ru

### Address for correspondence:

Fedorova N. V.  
Platov South State Polytechnic University (NPI)  
Russia, 346428 Rostov Region, Novocherkassk, Prosveschenia Str., 132  
e-mail: fedorovanv61@rambler.ru

### Для цитирования:

Федорова Н. В., Ефимов Н. Н., Федоров Ю. В. Выбор способа утилизации золошлаковых материалов Новочеркасской ГРЭС с применением метода анализа иерархий Т. Саати. *Надежность и безопасность энергетики*. 2018. – Т. 11, №1. – С. 54–61.  
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61.

### For citation:

Fedorova N. V., Efimov N. N., Fedorov Yu. V. [Selection of a method of recycling ash and slag materials of Novocherkassk power plant (Novocherkassk GRES) using the Saaty analytic hierarchy process]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2018, vol. 11, no. 1, pp. 54–61 (in Russian).  
DOI:10.24223/1999-5555-2018-11-1-54-61.

## Selection of a method of recycling ash and slag materials of Novocherkassk power plant (Novocherkassk GRES) using the Saaty analytic hierarchy process

Fedorova N. V.<sup>1</sup>, Efimov N. N.<sup>1</sup>, Fedorov Yu. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Platov South State Polytechnic University (NPI)  
Russia, 346428 Rostov Region, Novocherkassk, Prosveschenia Str., 132

<sup>2</sup> Southern Federal University  
Russia, 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya Str., 105/42

Recycling of ash and slag produced by coal-fired thermal power plants is a problem of all countries that use coal for energy purposes. In Russia, 20% of electric energy is produced by thermal power plants that burn coal. According to the 'Energy Strategy of Russia for the period until 2030' that part is not going to be reduced. Globally, ash dumps have accumulated more than 1.5–2 billion tons of ash and slag waste (ASW) to date. In Russia, ash dumps cover an area of almost 28 thousand hectares. At the same time, less than 8% of the annual ASW output is recycled and reused (30 to 50 million tons). The cost of the ASW handling is 5–7% of the total net price of the energy produced by thermal power plants. Currently there are several methods to recycle the ASW that consider their physical and chemical properties, peculiarities of forming and stockpiling, needs and possibilities for recycling technogenic raw materials. The market of special purpose machines offers ranges of relevant equipment, new factories and companies ready to recycle ASW are being created. This leads to a multivariate problem of choosing the optimal way to recycle the waste. Since the 1970s, the analytic hierarchy process developed by the US mathematician T. Saaty has been used to solve problems of choosing a strategy out of a number of alternative options. This paper is devoted to application of the Saaty process to selection of a method for recycling ash and slag materials produced by Novocherkassk power plant.

KEYWORDS: recycling of ash and slag of coal thermal power plants, choice of strategy of industrial facility modernization, Saaty analytic hierarchy process.

Новочеркасская ГРЭС (НчГРЭС) установленной мощности 2,4 ГВт работает с середины 60-х годов XX века. Основным топливом является уголь Донецкий АШ и природный газ. В отвалах Новочеркасской ГРЭС сейчас накоплено более 52 млн тонн ЗШО,<sup>1</sup> хранение которых связано с рядом экологических, экономических и иных проблем. Площадь золошлакоотвалов увеличивается ежегодно на 1 га. При этом в золошлаках содержится ряд ценных химических элементов и соединений<sup>2</sup>, что позволяет рассматривать их как техногенное сырье, т. е. золошлаковые материалы (ЗШМ). В настоящее время разработан ряд технологий по сепарации и утилизации ЗШМ [1–5]. Крупнотоннажная утилизация ЗШМ возможна в промышленном, гражданском и дорожном строительстве, при мелиорации.

Выбор направления утилизации ЗШМ должен учитывать как состав и физико-химические свойства золошлаков, так и возможности и потребности региона расположения ТЭС. Для выбора стратегии из ряда альтернативных вариантов в различных сферах человеческой деятельности, в том числе при модернизации

промышленных объектов, с 70-х годов XX века успешно применяется метод анализа иерархий Саати [6–14]. Данная работа посвящена применению метода Саати к выбору способа утилизации ЗШМ НчГРЭС.

Принимаем ограничения: стратегию выбора определяет собственник НчГРЭС — ОАО ОГК-2; он же является инвестором, который при минимизации затрат желает получить максимальную прибыль; увеличение площади золошлакоотвалов не допускается, т. е. необходимо утилизировать минимум 80–100 т/ч ЗШМ,

**Цель прогнозирования** — выбор способа утилизации ЗШМ НчГРЭС.

Рассматриваемые **альтернативные проекты** (рисунки 1):

1) БП / WR — без переработки / without recycling (вывоз ЗШМ с целью крупнотоннажного строительства, мелиорации, ликвидации горных выработок, для переработки за пределами ГРЭС),

2) МС / MS — дробление и простейшая пневматическая механическая сепарация смеси ЗШМ / grinding and mechanical separation (получение фракций, применяемых в дальнейшем в строительстве, дорожном строительстве, в очистных сооружениях),

3) УМ / CM — выделение недожога углерода и магнитная сепарация железосодержащей фракции золы / collection of unburned carbon and magnetic separation (возврат недожога в энергетические котлы ГРЭС, продажа магнитной фракции потребителю за пределами Ростовской области), а также дробление и механическая сепарация шлака,

<sup>1</sup> Инвестиционный портал Октябрьского района Ростовской области [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://ostobinvest.ru/region/news/news\\_337.html](http://ostobinvest.ru/region/news/news_337.html). — Заглавие с экрана (дата обращения: 12.12.2017).

<sup>2</sup> Тепловой расчет котлов. Нормативный метод / коллектив авторов; под ред. Н. В. Кузнецова и др. — 2-е изд., перераб. / Репринтное воспроизведение издания 1973 г. — М.: ЭКОЛИТ, 2011. — 296 с.



**Рисунок 1.** Модель проблемы выбора способа утилизации ЗШМ Новочеркасской ГРЭС.

**Figure 1.** The model of the problem of choice of the recycling method for the Novocherkassk TPP ash and slag materials.

4) ЭШ / ES — дооснащение котельных установок с жидким шлакоудалением устройствами для электролиза расплава шлака / electrolysis of molten slag (с последующей продажей металлосодержащих фракций за пределы области), дробление и механическая сепарация кремний содержащего остатка шлака, продажа необработанной золы,

5) КП / CR — комплексная раздельная сепарация золы и шлака по современным технологиям, комплексная переработка ЗШМ / complex recycling.

Поскольку при использовании метода Саати не рекомендуется использовать более 7–9 критериев, разделим оцениваемые показатели на группы критериев (факторы), в каждой из которых выделим не более 5 критериев, и проведем оценку для каждой группы в отдельности, определяя приоритетность альтернативных проектов по каждому критерию, приоритетность критериев в группе и приоритетность факторов методом парных сравнений.

**Группы критериев и критерии:**

– экономические (ЭН): необходимые инвестиции (ИН), срок окупаемости проекта (СО), срок действия проекта (СД), прибыльность проекта (ПБ), конкурентоспособность, востребованность продукции на рынке в регионе и за его пределами (К) / economic (EN): required investments (IN), return on investments (RI), lifetime duration of the project (LD), profitability (PR), competitiveness, demand for products on the market in and out of region (C);

– экологические (ЭЛ): уменьшение площади золошлакоотвалов (ЗО), уменьшение вредных выбросов в

атмосферу (ВА), уменьшение загрязнения водного бассейна (ВБ), уменьшение экологических платежей (ЭП) / ecologic (EL): reduction of the area of ash and slag dumps (AD), reduction of harmful emissions into the atmosphere (AE), reduction of water pollution (WP), decreasing of environmental payments (EP);

– технические и технологические (ТТ): наличие серийно (или под заказ) выпускаемого оборудования (О), наличие готовых проектно-технологических решений (П), адаптивность, приспособленность оборудования и технологий к конкретным условиям эксплуатации (А), техническая сложность (простота) монтажа, сервисного обслуживания и ремонта установки, наличие гарантий поставщиков (ПО), сложность (простота) эксплуатации установки (ПЭ) / technical and technological (TT): presence of the serial (or unique) equipment (E), presence of existing technological solutions (PS), adaptiveness, fitness to the specific operating conditions (A), technical complexity (simplicity) of installation, service and repair of the equipment, presence of suppliers guaranties (SS), the complexity (simplicity) of the equipment usage (SU);

– социальные (С): создание новых рабочих мест (РМ), потребность в квалифицированных кадрах для реализации проекта (КК); наличие в регионе возможности подготовки кадров (ПК) / social (S): creation of new jobs (J), the need for qualified workers for project implementation (QW), availability of training in the region (TA);

– прочие (дополнительные и специфические) критерии (ОС): возможность реализации проекта в природно-климатических условиях региона (с учетом сезонных температур, потребности в воде, рельефе местности и др.) (ПР), влияние последствий реализации проекта на природно-климатические условия региона (ВР), потребность в продукции проекта и возможность ее реализации непосредственно в регионе (ПП), сложность доставки оборудования и комплектующих, монтажа и сервисного обслуживания с учетом состояния инфраструктуры, дорог (ИФ), сложность реализации продукции в регионе, в России, на экспорт с учетом инфраструктуры региона (РП) / other criteria (additional or specific) (OC): the possibility of the project implementation in the climate conditions of the region (including seasonal air temperatures, water resources, area relief etc.) (PI), the impact of project implementation on the climate conditions in the region (IR), the need for the project' products, the possibility of its selling in the region (NP), the complexity of the equipment and components delivery, installation and service, taking into account the infrastructure and road conditions (IF), the complexity of products selling in the region, in Russia or to the other countries, taking into account the region infrastructure (SR).

Неполная многофакторная модель проблемы представлена на рисунке 1. Влияние фактора распространяется только на критерии в пределах конкретной группы. Группы критериев и критерии в пределах групп неравнозначны. Каждый альтернативный проект оценивается по каждому из критериев. Могут быть рассчитаны приоритеты проектов по каждому из критериев, приоритеты проектов факторам, глобальные приори-

теты альтернативных проектов, а также приоритеты факторов и глобальные приоритеты критериев.

Проведем оценку альтернативных проектов по этим рассматриваемым группам критериев. По **экономическим показателям** (таблицы 1 и 2) наиболее предпочтителен проект 1 ввиду низких затрат и малого срока окупаемости. Наименее предпочтителен проект 4 — затраты больше, чем получаемая выгода. Погрешность расчетов допустимая (4,15%).

По **экологическим показателям** (таблица 3) наиболее предпочтительны проекты 5 и 4 — применение современных технологий приносит наибольший экологический эффект. Экологические платежи наиболее снизятся с применением самого простого проекта 1, но доля этих платежей в себестоимости электроэнергии согласно современному законодательству незначительна. На реализацию проекта 3 потребуется вода, что не будет способствовать уменьшению загрязнения водного бассейна. Наименее привлекателен по совокупности экологических признаков проект 2 в значительной степени потому, что при его реализации медленнее будет сокращаться площадь золошлакоотвалов и будет происходить образование вторичных выбросов в атмосферу. Погрешность расчетов незначительно завышена (около 11,89% при предельно допустимом значении 10%).

Несомненным лидером по **техническим и технологическим показателям** (таблица 4) является проект 1, практически не требующий оборудования и проектирования, простой в обслуживании и эксплуатации. На втором месте проект 2, требующий минимум оборудования и проектирования. Наименее привлекателен проект 4, требующий индивидуальной разработки. Погрешность оценки завышена (25,95%). Применение итерационной разновидности метода Саати незначительно снижает погрешность. Рекомендуются уточнить оценки альтернативных проектов по критериям данной группы.

При оценке по **социальным критериям** (таблица 5) проекты 5 и 4 имеют преимущество, так как создают больше рабочих мест. С другой стороны, проекты 1 и 2 не требуют высококвал-

**Таблица 1.** Экономические показатели альтернативных проектов.

**Table 1.** Economic indicators of alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Показатели / Indicators				
	ИН, млн руб / IN, mln rubles	СО, лет / RI, years	СД, лет / LD, years	ПБ, у.е. / PR, c.u.	К, у.е. / C, c.u.
1	1	0,1	50	1	1
2	100	1,5	25	3	5
3	800	3	15	5	6
4	1500	5	15	10	6
5	3000	7	15	100	15

**Примечание к таблице 1:** у.е. — условные единицы. / **Note to table 1:** c.e. — conventional units.

**Таблица 2.** Итоговая матрица расчета экономических приоритетов альтернативных проектов.

**Table 2.** Final matrix of calculating the economic priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities					Итоговая оценка / Final grad
	ИН / IN	СО / RI	СД / LD	ПБ / PR	К / C	
	0,29	0,29	0,14	0,14	0,14	
1	0,37	0,43	0,44	0,03	0,04	0,30
2	0,29	0,28	0,22	0,07	0,12	0,22
3	0,21	0,19	0,11	0,13	0,19	0,17
4	0,11	0,06	0,11	0,24	0,19	0,13
5	0,02	0,03	0,11	0,53	0,47	0,18
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Таблица 3.** Итоговая матрица расчета экологических приоритетов альтернативных проектов.

**Table 3.** Final matrix of calculating the environmental priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities				Итоговая оценка / Final grad
	ЗО / AD	ВА / AE	ВБ / WP	ЭП / EP	
	0,27	0,55	0,12	0,06	
1	0,31	0,09	0,40	0,36	0,20
2	0,07	0,04	0,14	0,21	0,07
3	0,12	0,19	0,03	0,11	0,15
4	0,20	0,34	0,14	0,11	0,26
5	0,31	0,34	0,29	0,21	0,32
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Таблица 4.** Итоговая матрица расчета технических и технологических приоритетов альтернативных проектов.

**Table 4.** Final matrix of calculating the technical and technological priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities					Итоговая оценка / Final grad
	О / E	П / PS	А / A	ПО / SS	ПЭ / SU	
	0,44	0,17	0,28	0,03	0,08	
1	0,37	0,44	0,45	0,45	0,47	0,41
2	0,28	0,25	0,27	0,29	0,25	0,27
3	0,22	0,19	0,12	0,16	0,17	0,18
4	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03
5	0,11	0,08	0,12	0,07	0,07	0,10
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

лифицированных кадров. В целом социальные приоритеты рассматриваемых проектов оказались близкими. По совокупности наиболее высоким приоритетом обладает проект 5. Погрешность оценки низкая (1,66%).

Наиболее приоритетным по **прочим (дополнительным и специфическим) показателям** (таблица 6) является проект 2, который при достаточно низком уровне затрат обеспечивает выпуск востребованной в регионе продукции. Наименее привлекателен проект 4 ввиду его сложности и неопределенности со сбытом продукции. Погрешность оценки допустимая (3,94%).

Таким образом, получены оценки альтернативных проектов по 5 группам критериев. С учетом введенных ограничений, получим комплексную оценку приоритетности критериев и альтернативных проектов (таблицы 7 и 8), приняв следующий сценарий оценки приоритетности групп критериев: полагаем, что для лица, принимающего решение (ЛПР), важность групп критериев распределяется так: экономические — 9, экологические — 3, технические и технологи-

**Таблица 7.** Матрица глобальных приоритетов критериев.

**Table 7.** Matrix of global criteria priorities.

Группы критериев / Groups of criteria									
ЭН / EN		ЭЛ / EL		ТТ / TT		С / S		ПР / OS	
Критерий	Приоритет	Критерий	Приоритет	Критерий	Приоритет	Критерий	Приоритет	Критерий	Приоритет
ИН / IN	0,12	ЗО / AD	0,03	О / E	0,12	РМ / J	0,02	РР / PI	0,07
СО / RI	0,12	ВА / AE	0,05	П / PS	0,05	КК / QW	0,01	ВР / BP	0,035
СД / LD	0,05	ВБ / WP	0,01	А / A	0,08	ПК / TA	0,003	ПП / NP	0,035
ПБ / PR	0,06	ЭП / EP	0,01	ПО / SS	0,01			ИФ / IF	0,01
К / C	0,08			ПЭ / SU	0,02			РП / SR	0,01
Σ	0,43		0,10		0,28		0,03		0,16

**Таблица 8.** Итоговая матрица расчета глобальных приоритетов альтернативных проектов.

**Table 8.** Final matrix of calculating the global priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities					Итоговая оценка / Final grad
	ЭН / EN	ЭЛ / EL	ТТ / TT	С / S	ПР / OS	
	0,43	0,10	0,28	0,03	0,16	
1	0,29	0,20	0,41	0,18	0,23	0,30
2	0,22	0,07	0,27	0,18	0,29	0,23
3	0,18	0,15	0,18	0,17	0,16	0,17
4	0,13	0,26	0,03	0,20	0,13	0,12
5	0,19	0,32	0,10	0,28	0,19	0,18
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

**Таблица 5.** Итоговая матрица расчета социальных приоритетов альтернативных проектов.

**Table 5.** Final matrix of calculating the social priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities			Итоговая оценка / Final grad
	РМ / J	КК / QW	ПК / TA	
	0,61	0,29	0,10	
1	0,03	0,44	0,37	0,18
2	0,11	0,28	0,27	0,18
3	0,17	0,17	0,21	0,17
4	0,31	0,03	0,03	0,20
5	0,40	0,08	0,12	0,28
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00

**Таблица 6.** Итоговая матрица расчета прочих приоритетов альтернативных проектов.

**Table 6.** Final matrix of calculating the other priorities of the alternative projects.

Альтернативные проекты / Alternative projects	Критерии и приоритеты / Criteria and priorities					Итоговая оценка / Final grad
	РР / PI	ВР / IR	ПП / NP	ИФ / IF	РП / SR	
	0,43	0,21	0,21	0,07	0,07	
1	0,39	0,03	0,08	0,40	0,09	0,23
2	0,31	0,07	0,44	0,29	0,42	0,29
3	0,18	0,15	0,17	0,14	0,09	0,16
4	0,09	0,37	0,03	0,03	0,03	0,13
5	0,03	0,37	0,28	0,14	0,36	0,19
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

ческие — 7, социальные — 1, прочие — 5 (верхняя строка табл. 8). Чем выше значение, тем приоритетнее данный фактор для ЛПР. Дальнейший расчет приоритетов факторов производится методом парных сравнений. Ранжирование групп позволяет определить глобальные приоритеты отдельных критериев путем умножения приоритета группы на приоритет критерия в группе. Результаты расчетов приоритетности критериев представлены в таблице 7. Итоговая матрица расчета глобальных приоритетов альтернативных проектов представлена в таблице 8. Нижняя строка таблицы 7 соответствует верхней строке таблицы 8.

Итоговая комплексная оценка приоритетов альтернативных проектов (таблица 8), с учетом принятых ограничений и сценария приоритетности факторов показывает, что с точки зрения собственника выгодно (в первую очередь, экономически) с наименьшим вложением средств организовать вывоз ЗШМ с территории ТЭС, продав необработанные ЗШМ по минимальной цене для дальнейшего ис-

пользования и обработки (проект 1). Но такая продукция может не найти своего потребителя ни в регионе, ни за его пределами. Организовав минимальную предпродажную подготовку ЗШМ (проект 2), собственник существенно расширит круг потенциальных покупателей продукта и ускорит его реализацию. В перспективе, комплексная переработка ЗШМ с использованием современного оборудования и технологий (проект 5) обеспечит собственнику ТЭС возможность выйти с дорогостоящим продуктом за пределы региона. Среди критериев (таблица 7) наибольший глобальный приоритет у критериев минимальности инвестиций и срока окупаемости проекта из экономической группы и наличия необходимого оборудования из технико-технологической группы.

При использовании метода Саати для решения производственных задач критерии нижних уровней допускают численное (минимальная стоимость проекта, максимальная прибыль, количество создаваемых рабочих мест и т. п.) или логическое (наличие оборудования на рынке спецтехники, возможность сбыта продукции в регионе, наличие возможности подготовки кадров в регионе и т. п.) обоснование. Поэтому ранжирование альтернативных проектов по критериям нижнего (нижних) уровня понятно и не вызывает претензий в необоснованности. Ранжирование критериев верхнего уровня (в данном случае — сценарий приоритетности факторов) находится в компетенции ЛПП (собственника, эксперта) и неизбежно носит субъективный характер, что вызывает недоверие к полученным результатам оценки глобальных приоритетов альтернативных проектов. Возникает иллюзия, что изменив оценки критериев верхнего уровня можно «вывести в лидеры» любой проект.

Для того, чтобы уменьшить субъективизм в оценке глобальных приоритетов альтернативных проектов, предлагается исследовать изменение численных значений глобальных приоритетов проектов во всей допустимой области значений приоритетов критериев верхнего уровня (факторов):

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1, 0 \leq p_i \leq 1, i = 1 \dots 5, \quad (1)$$

где  $p_i$  — приоритет  $i$ -того фактора. Глобальные приоритеты альтернативных проектов  $x_i$  в данном случае определяются системой уравнений (равенств):

$$\begin{cases} x_1 = 0,29p_1 + 0,20p_2 + 0,41p_3 + 0,18p_4 + 0,23p_5 \\ x_2 = 0,22p_1 + 0,07p_2 + 0,27p_3 + 0,18p_4 + 0,29p_5 \\ x_3 = 0,18p_1 + 0,15p_2 + 0,18p_3 + 0,17p_4 + 0,16p_5 \\ x_4 = 0,13p_1 + 0,26p_2 + 0,03p_3 + 0,20p_4 + 0,13p_5 \\ x_5 = 0,19p_1 + 0,32p_2 + 0,10p_3 + 0,28p_4 + 0,19p_5 \end{cases} \quad (2)$$

В результате получаем задачу линейной оптимизации: для системы линейных уравнений и неравенств (1, 2) определить значения (интервалы значений) приоритетов факторов  $p_i$ , для которых глобальный приоритет  $i$ -того альтернативного проекта  $x_i$  больше, чем глобальные приоритеты остальных проектов.

При этом часть проектов могут не попасть в лидеры ни при какой комбинации приоритетов факторов.

Решение этой задачи с применением программы Maple показало (рисунок 2), что для альтернативных проектов 1, 2 и 5 существуют такие комбинации приоритетов факторов, при которых данные проекты приобретают глобальный приоритет, превышающий глобальные приоритеты остальных (четырех) проектов. Пример такой комбинации для проекта 1 и представлен в таблице 8.

На рисунке 2 показано при каких комбинациях приоритетов факторов эти проекты достигают максимальной глобальной оценки и каковы при этом оценки приоритетности остальных проектов:

– альтернативный проект 1 (без переработки) достигает глобального приоритета  $x_1 = 0,41$  при  $p_3 = 1$  (технико-технологические критерии),  $p_1 = p_2 = p_4 = p_5 = 0$ , при этом  $x_2 = 0,27$ ,  $x_3 = 0,18$ ,  $x_4 = 0,03$ ,  $x_5 = 0,10$  (рисунок 2в);

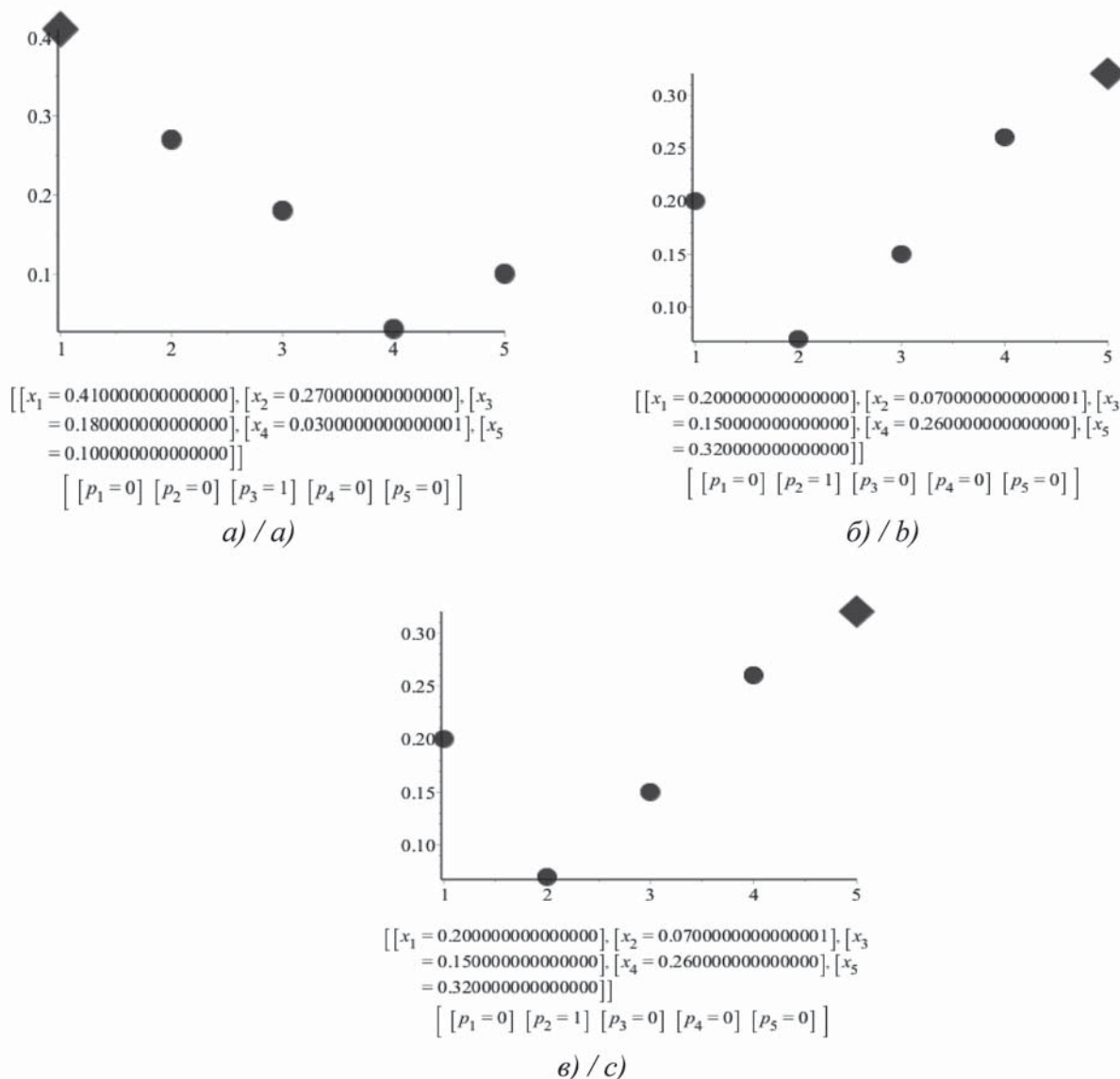
– альтернативный проект 2 (механическая сепарация) достигает глобального приоритета  $x_2 = 0,29$  при  $p_5 = 1$  (прочие показатели),  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = 0$ , при этом  $x_1 = 0,23$ ,  $x_3 = 0,16$ ,  $x_4 = 0,13$ ,  $x_5 = 0,19$  (рисунок 2а);

– альтернативный проект 5 (комплексная переработка) достигает глобального приоритета  $x_5 = 0,32$  при  $p_2 = 1$  (экологические критерии),  $p_1 = p_3 = p_4 = p_5 = 0$ , при этом  $x_1 = 0,20$ ,  $x_2 = 0,07$ ,  $x_3 = 0,15$ ,  $x_4 = 0,26$  (рисунок 2б).

С другой стороны, альтернативные проекты 3 (УМ) и 4 (ЭШ) ни при какой комбинации приоритетов факторов (или субъективных предпочтений ЛПП) объективно не смогут получить максимальный по сравнению с другими проектами глобальный приоритет. При  $p_3 = 1$  альтернативный проект 3 имеет наивысший для данного проекта приоритет, но при этом приоритетность проектов 1 и 2 еще выше (рисунок 2а). При  $p_2 = 1$  альтернативный проект 4 имеет наивысший для данного проекта приоритет, но при этом приоритетность проекта 5 еще выше (рисунок 2в). Это не означает, что от проектов 3 и 4 следует полностью отказаться. Но на данном этапе технического развития их промышленная реализация нецелесообразна. Например, извлечение недожога углерода из летучей золы (часть проекта 3) успешно реализуется фирмой Separation Technologies LLC (USA) [15]. Но для подготовки ЗШМ к крупнотоннажной реализации (полный проект 3) необходимо дополнительное оборудование, площади, персонал, энергоресурсы, что усложняет проект, делает его дороже и снижает его приоритетность в рассматриваемом рейтинге проектов.

## Выводы

В настоящее время существует ряд проектов утилизации золошлаковых материалов угольных ТЭС. Эти проекты могут существенно отличаться по техническим, экономическим, экологическим и прочим параметрам, находиться в стадии опытно-конструкторских разработок или быть подкрепленными серийно выпускаемым на рынке спецтехники оборудованием. Применение



**Рисунок 2.** Соотношения приоритетности альтернативных проектов при достижении максимальных глобальных приоритетов: а) для проекта 1 (БП); б) для проекта 2 (МС); в) для проекта 5 (КП).

**Figure 2.** Priorities of alternative projects in achieving maximum global priorities: а) for Project 1 (WR); б) for project 2 (MS); в) for Project 5 (CR).

метода анализа иерархий Саати позволяет обосновать выбор проекта модернизации НчГРЭС из группы альтернативных проектов на основании обширного набора критериев, учитывающих различные аспекты функционирования и модернизации конкретной ТЭС. Использование на заключительном этапе анализа методов линейной оптимизации позволяет отсеять недостаточно эффективные на данном уровне технического развития проекты и снизить влияние субъективного фактора при выборе стратегии модернизации.

#### Список использованных источников

1. Бакулин Ю. И. Золото и платина в золошлаковых отходах ТЭЦ г. Хабаровска / Ю. И. Бакулин, А. А. Черепанов // Руды и металлы. – 2002. – №3. – С. 60–67.
2. Делицын Л. М. Возможные технологии утилизации золы / Л. М. Делицын, Ю. В. Рябов, А. С. Власов // Энергосбережение. – 2014. – №2. – С. 60–66.

3. Кожуховский И. С. Совершенствование обращения с золошлаковыми отходами [Электронный ресурс] / И. С. Кожуховский, Ю. К. Цыльковский // Экология производства. – 2012. – №10. – Режим доступа: <http://www.ecoindustry.ru/> (дата обращения 16.01.2018).
4. Федорова Н. В. Перспективы использования золы-уноса тепловых электростанций Ростовской области / Н. В. Федорова, Д. А. Шафорост // Теплоэнергетика. – 2015. – №1. – С. 53–58.
5. Федорова Н. В. О возможности использования золошлаковых отходов угольных электростанций Ростовской области в качестве углеродсодержащих сорбентов / Н. В. Федорова, Д. А. Шафорост, Е. А. Кривобок // Экология промышленного производства. – 2016. – №1 (93). – С. 20–24.
6. Saaty T. L. Concepts, theory and techniques: rank generation, preservation and reversal in the analytic hierarchy process / T. L. Saaty // Decision Sciences. – 1987. – V. 18. – P. 157–177.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М: Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. Черноскутов А. И. Оценка уязвимости и защищенности автоматизированной системы военного назначения на основе метода

Саати и его модификаций / А. И. Черноскутов, Э. Ф. Зорин, Б. С. Рыжов // Двойные технологии. – 2010. – №2 (51). – С. 48–52.

9. Прокопов А. В. О применении метода анализа иерархий для оценки эффективности деятельности предприятий и организаций МЧС Украины / А. В. Прокопов, С. С. Щербак // Проблемы чрезвычайных ситуаций. 36. науч. пр. НУЦЗ Украины. – 2010. – Вып. 12. – С. 122–131.

10. Ахметов О. А. Метод анализа иерархий как составная часть методологии проведения оценки недвижимости [Электронный ресурс] / О. А. Ахметов, М. Б. Мжельский // Актуальные вопросы оценочной деятельности. – Новосибирск, 2001. – Режим доступа: <http://www.ocenchik.ru/docse/2129-metod-analiza-ierarhiy-mai-ocenki-> (дата обращения: 12.12.2017).

11. Пьянков А. А. Применение метода комплексной оценки в задачах управления развитием системы вооружения / А.А. Пьянков // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – Москва, 16–19 июня 2014 г. – С. 5429–5437.

12. Жижин К. С. Использование метода анализа иерархий Т. Саати при выборе противопожарной техники [Электронный ресурс] / К. С. Жижин, Н. В. Благородова // Строймного. – 2016. – №2(3). – Режим доступа: <http://stroyrnogo.com/science/economy/ispolzovanie-metoda-analiza-ierarkh/> (дата обращения: 12.12.2017).

13. Применение методов математической статистики к анализу предвестников землетрясений, возможных для наблюдения из космоса [Электронный ресурс] / В. В. Платонов [и др.] // Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/vol2/141-146.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/vol2/141-146.pdf). – Заглавие с экрана (дата обращения: 12.12.2017).

14. Fedorova N. V. Functional Simulation of the Method for the Coal Preparation for Combustion in the Thermal Power Plant [Electronic resource] / N. V. Fedorova, V. A. Mokhov, E. A. Krivobok // Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2015. – №12 (3). – Access mode: <http://www.biotech-asia.org/vol12no3/functional-simulation-of-the-method-for-the-coal-preparation-for-combustion-in-the-thermal-power-plant/> (reference date: 12.12.2017).

15. Titan America [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.titanamerica.com/>. – The title from the screen (reference date: 12.12.2017).

## References

1. Bakulin Yu. I. Gold and platinum in ash and slag wastes of Khabarovsk CHPP / Yu. I. Bakulin, A. A. Cherepanov // 'Ores and Metals' ('Rudy i metally'). – 2002. – №3. – P. 60–67.

2. Delitsyn L. M. Possible technologies for utilization of ash / L. M. Delitsyn, Yu. V. Ryabov, A. S. Vlasov // 'Energy saving' ('Energosberzheniye'). – 2014. – №2. – P. 60–66.

3. Kozhukhovskiy I. S. Improving the treatment of ash and slag waste [Electronic resource] / I. S. Kozhukhovskiy, Yu. K. Tselikovskiy // 'Ecology of production' ('Ekologiya proizvodstva'). – 2012. – №10. – Access mode: <http://www.ecoindustry.ru/> (reference date 12.12.2017).

4. Fedorova N. V. Prospects for using the fly ash produced at thermal power plants in the Rostov region / N. V. Fedorova, D. A. Sha-

forost // Thermal engineering. – 2015. – V. 62. – №1. – P. 51–57.

5. Fedorova N. V. On possibility of using ash and slag waste from coal-fired power stations in Rostov Region as carbon-containing sorbents / N. V. Fedorova, D. A. Shaforost, E. A. Krivobok // 'Ecology of industrial production' ('Ekologiya promyshlennogo proizvodstva'). – 2016. – №1 (93). – P. 20–24.

6. Saaty T. L. Concepts, theory and techniques: rank generation, preservation and reversal in the analytic hierarchy process / T. L. Saaty // Decision Sciences. – 1987. – V. 18. – P. 157–177.

7. Saaty T. Decision making. Analytic hierarchy process // T. Saaty. – Moscow: 'Radio and connectivity' ('Radio I svyaz'), 1993. – 278 p.

8. Chernoskutov, A. I. Estimation of the vulnerability and security of automated military systems using Saaty method and its modifications / A. I. Chernoskutov, E. F. Zorin, B. S. Ryzhov // 'Dual technologies' ('Dvoynye tehnologii'). – 2010. – №2 (51). – P. 48–52.

9. Prokopov A. V. On applying analytic hierarchy process to estimating the activity efficiency of enterprises and The Ministry of Emergency Situations of Ukraine / A. V. Prokopov, S. S. Shcherbak. // 'Problems of emergency states. Digest of The State University of Civil Protection' ('Problemi chrezvychaynykh situatsiy. Zb. nauk. pr. NUTSZ Ukrainy'). – 2010. – Release 12. – P. 122–131.

10. Akhmetov O. A. Analytic hierarchy process as a part of methodology for realty evaluation [Electronic resource] / O. A. Akhmetov, M. B. Mzhelskiy. 'Topical issues of appraisal activity' ('Aktual'nie voprosy otsenochnoy deyatel'nosti'). – Novosibirsk, 2001. – Access mode: <http://www.ocenchik.ru/docse/2129-metod-analiza-ierarhiy-mai-ocenki-> (reference date: 12.12.2017).

11. P'yankov A. A. The application of the complex assessment method to problems of management the development of the weapon system / A. A. P'yankov // 'XII All-Russia meeting on governance issues – 2014' ('XII Vserossiyskoe soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014'). – Moscow, June 16–19, 2014 – P. 5429–5437.

12. Zhizhin K. S. Using the T. Saaty analytic hierarchy process in the choice of fire fighting equipment [Electronic resource] / K. S. Zhizhin, N. V. Blagorodova // 'StroyMnogo', 2016. – №2(3). – Access mode: <http://stroyrnogo.com/science/economy/ispolzovanie-metoda-analiza-ierarkh/> (reference date: 12.12.2017).

13. The application of mathematical statistics methods to the analysis of pre-earthquake conditions observable from space [Electronic resource] / V. V. Platonov [and others] // Access mode: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/vol2/141-146.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/vol2/141-146.pdf). – The title from the screen (reference date: 12.12.2017).

14. Fedorova N. V. Functional Simulation of the Method for the Coal Preparation for Combustion in the Thermal Power Plant [Electronic resource] / N. V. Fedorova, V. A. Mokhov, E. A. Krivobok // Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2015. – №12 (3). – Access mode: <http://www.biotech-asia.org/vol12no3/functional-simulation-of-the-method-for-the-coal-preparation-for-combustion-in-the-thermal-power-plant/> (reference date: 12.12.2017).

15. Titan America [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.titanamerica.com/>. – The title from the screen (reference date: 12.12.2017).

