

МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

АННОТАЦИЯ. Вопрос переработки золошлаковых отходов является важным, поскольку их накопление и хранение вызывает загрязнение окружающей среды и отчуждение больших территорий под хранилища, а также оказывает негативное влияние на здоровье населения. На территории Российской Федерации в настоящее время находится свыше 1,5 млрд т золошлаковых отходов, их площадь достигает 28 тыс. га. В Иркутской области ежегодно образуется большой объем золошлаковых отходов, для их переработки используют современные технологии. В статье предлагается математическая модель оценки эффективности переработки золошлаковых отходов угольных предприятий, учитывающая экономический, экологический и социальный аспекты. Проведены эксперименты на модели по данным Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9. Результаты эксперимента свидетельствуют об эффективности внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Золошлаковые отходы угольных предприятий; задача максимизации эффекта комплексной переработки; математическая модель; результаты эксперимента.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ. Дата поступления 12 августа 2015 г.; дата принятия к печати 31 августа 2015 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2015 г.

MODEL OF INTEGRAL ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF INTRODUCING COMPLEX PROCESSING OF ASH AND SLAG WASTES IN COLLIERY UNDERTAKINGS

ABSTRACT. The problem of processing of ash and slag wastes is important, as their accumulation and storage results in polluting the environment and transferring large territories as storage facilities, as well as has an effect on public health. At present, there are more than 1.5 billion ash and slag wastes on the territory of the Russian Federation, and their area is up to 28,000 hectares. A great amount of ash and slag wastes is annually formed in Irkutsk Oblast, while up-to-date technologies are used to process them. The article offers a mathematical model of assessing efficiency of processing ash and slag wastes in colliery undertakings that takes into account the economic, ecological and social aspects. Experiments on the model using the data of the Novo-Irkutsk CHP plants and the CHP-9 CHP plant. The results of the experiment testify the efficiency of introducing complex processing of ash and slag wastes.

KEYWORDS. Ash and slag wastes in colliery undertakings; task of maximizing the effect of complex processing; mathematical model; results of the experiment.

ARTICLE INFO. Received August 12, 2015; accepted August 31, 2015; available online September 30, 2015.

Проблема переработки золошлаковых отходов угольных энергопредприятий является крайне актуальной, так как за долгие десятилетия работы тепловых электростанций (ТЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) в России накоплен большой объем отходов, и с каждым годом этот объем увеличивается. Накопление и хранение золошлаковых отходов (ЗШО) вызывает проблемы различного рода: загрязнение окружающей среды вследствие пыления с поверхности золошлакоотвалов, загрязнение почв и вод, отчуждение больших территорий под хранилища отходов. Загрязнение воздуха, воды и почв в конечном счете оказывает негативное влияние на здоровье населения, проживающего вблизи энергопредприятий.

Исследования золошлаков, хранящихся в отвалах ТЭЦ и ТЭСР, показали, что в их составе содержится много полезных веществ, что позволяет рассматривать ЗШО в качестве вторичного сырья, переработка которого может принести дополнительный доход, а также позволит сократить объемы золошлакоотвалов, что снизит расходы на их содержание, реконструкцию и расширение [1; 7–10; 13].

Ситуация с накоплением и переработкой ЗШО в Иркутской области. Иркутская энергосистема, установленная мощность которой составляет приблизительно 13 млн кВт, является одной из крупнейших в России. Примерно 70 % производства электроэнергии приходится на Ангарский каскад (Иркутскую, Братскую, Усть-Илимскую ГЭС) и около 30 % электроэнергии вырабатывается на ТЭС, которые сжигают в год 11–13 млн т угля преимущественно из Иркутского угольного бассейна. При этом ежегодно образуется около 1,7 млн т ЗШО. На 13 золоотвалах ОАО «Иркутскэнерго» на 1 января 2014 г. накоплено 85,3 млн т ЗШО. Собственно, золошлакоотвалы как хранилища для размещения ЗШО занимают около 2 000 га [14]. При суммарном годовом выходе ЗШО 1,6–1,8 млн т, из них используется около 20 % (табл. 1). При этом ежегодные затраты компании ОАО «Иркутскэнерго» на содержание золоотвалов и их размещение составляют более 600 млн р., а объем инвестиций, по данным за 2014 г., на строительство и реконструкцию ЗШО — около 20 % от общего объема инвестиций компании (от 443,4 до 850 млн р. в год).

Таблица 1

*Объемы золошлаковых отходов, накопленных в золошлакоотвалах
ОАО «Иркутскэнерго», по состоянию на 1 января 2013 г., т*

Филиал	Наличие на предприятии
ТЭЦ-1	6 677 452
ТЭЦ-5	1 346 959
ТЭЦ-6	3 884 431
ТЭЦ-9	27 773 053
ТЭЦ-10	20 099 320
ТЭЦ-11	8 331 095
ТЭЦ-12	869 548
ТЭЦ-16	9 618
Н-ИТЭЦ	7 954 396
Н-ЗТЭЦ	3 099 025
У-ИТЭЦ	2 936 292
ТИиТС Падун	1 105 080
ТИиТС центр	405 806
<i>Всего</i>	<i>84 492 075</i>

Для увеличения объемов утилизации ЗШО и тем самым сокращения затрат на реконструкции золоотвалов в 2005 г. было создано ЗАО «Иркутскзолопродукт»¹. Одним из приоритетных направлений деятельности компании является производство строительных материалов, в том числе с использованием ЗШО. Вопросами переработки

¹ Применение золошлаковых смесей для рекультивации в Иркутской области // Иркутскзоло-продукт. URL : <http://www.zolprod.irkutskenergo.ru/qa/2230.html>.

ЗШО и, в первую очередь добычи из ЗШО драгоценных металлов и железосодержащего концентрата, в Иркутской области занимается ОАО «Иркутскгеофизика» Восточно-Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья (ВостСибНИИГГиМС). Предприятие ОАО «Иркутскгеофизика» ВостСибНИИГГиМС провело исследование отходов Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9 ОАО «Иркутскэнерго», в результате которого были получены данные относительно химического состава ЗШО. В отходах обеих ТЭЦ обнаружены барий; бериллий; цирконий; марганец; титан; ванадий; хром; никель; кобальт; свинец; мель; цинк; олово; молибден; литий; иттрий; иттербий; лантан; ниобий; стронций; галлий; серебро; мышьяк; сурьма; висмут; вольфрам; тантал; германий; таллий; фосфор; бор; железо; магний; кальций; натрий; калий; кремний; алюминий; ртуть; скандий; золото; кадмий; церий; теллур. Особо выделим содержание железа и золота (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание золота и железа в золошлаковых отходах
Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9 ОАО «Иркутскэнерго»**

Элемент	Символ	Кларк в земной коре, г/т	Содержание, г/т		Коэффициент концентрации
			ТЭЦ-9	Ново-Иркутская ТЭЦ	
Железо	Fe	30 890	40 000	100 000	1,3–3,2
Золото	Au	0,005	0,013	0,014	2,6–2,8

Инженеры предприятия ОАО «Иркутскгеофизика» ВостСибНИИГГиМС разработали проект строительства обогатительных фабрик вблизи крупных золоотвалов, позволяющих извлекать из отходов электроэнергетической отрасли золото и железосодержащий концентрат. Внедрение этого проекта позволит сократить объемы отходов, в большом количестве накопленных на золоотвалах, что снизит их влияние на окружающую среду, а также позволит получить до 500 млн р. дополнительного дохода с одного отвала ежегодно. Помимо экономического эффекта внедрение проекта окажет и социально-экологические эффекты: улучшение экологической ситуации вблизи отвалов, освобождение занятых отвалами территорий, появление новых рабочих мест на обогатительных фабриках, снижение тарифов на тепло и электроэнергию для населения за счет снижения себестоимости производства энергии, происходящей в связи с уменьшением (а в перспективе — и с исчезновением) затрат на содержание, реконструкцию и расширение золошлакоотвалов.

Оценка эффекта от внедрения комплексной переработки. Вопросы переработки ЗШО решают многие авторы: И. Кожуховский [6], Ю. Цыльковский [12]; Т. И. Шишелова, М. Н. Самусева [14], М. Я. Шпирт [15], В. Н. Анисимов [2], И. С. Булгаков, В. К. Кушнеренко [3], В. И. Мязина, Т. В. Коваль, А. А. Черепанов, В. Т. Кардаш. Из иркутских авторов можно выделить В. В. Власову [4], К. В. Федотова [11], Н. И. Никольскую, С. А. Прокопьева. Чтобы заинтересовать потенциальных инвесторов во внедрении переработки ЗШО, необходимо обосновать эффективность проектов, для чего требуются модели оценки эффективности, учитывающие специфику данной предметной области и наиболее полно оценивающие эффект от реализации проекта внедрения их переработки:

1. Оценка экономического эффекта — от внедрения комплексной переработки ЗШО экономический эффект проявляется в прибыли, получаемой от производства и продажи новых видов продукции, в качестве таковых выделим:

- золото;
- железосодержащий концентрат;
- сырье для производства глинозема;
- сырье для производства строительных материалов;
- недожог.

Экономический эффект также проявляется в освобождении территорий, занятых золошлакоотвалами. Предположим, что T — номер года, следующего за годом, в кото-

ром будет израсходована последняя тонна ЗШО из отвала, т. е. в котором энергопредприятие перестанет складировать ЗШО (полностью избавится от золошлакоотвала), а весь объем новых ЗШО будет направлять на переработку. Тогда при $t < T$ (t — номер текущего года с момента запуска проекта) экономический эффект в t -м году можно подсчитать по следующей формуле:

$$\text{Экон. } \mathcal{E}_t = V_{\text{пер}t} \sum_{j=1}^6 k_j,$$

где k_1 — прибыль от продажи золота, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_2 — прибыль от продажи железосодержащего концентрата, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_3 — прибыль от продажи глинозема, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_4 — прибыль от продажи строительных материалов, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_5 — экономия от использования недожога, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_6 — прибыль от освобождения территорий, приходящаяся на 1 т перерабатываемых ЗШО; $V_{\text{пер}t}$ — объем переработки ЗШО в t -м году.

Экономия от использования недожога можно оценить, просто умножив ожидаемый процент недожога (оценивается по данным испытаний на ЗШО) на объем перерабатываемых ЗШО и стоимость единицы объема (1 т) угля, разделив это произведение на первоначальные объемы ЗШО в отвале:

$$k_5 = \frac{ДН ЦУ_t}{V_0},$$

где $ДН$ — доля недожога в ЗШО; $ЦУ_t$ — цена 1 т угля в t -м году (может быть подсчитана путем умножения текущей цены на прогнозный индекс); V_0 — первоначальный объем золы в отвале (перед началом реализации проекта).

Можно предложить различные варианты расчета прибыли от освобождения территорий. Один из вариантов — следующая формула:

$$k_6 = \frac{\mathcal{E}OT}{V_0},$$

где $\mathcal{E}OT$ — эффект от освобождения территорий (проявляется в T -м году) в денежном выражении (может быть оценен экспертно).

При $t < T$ экономический эффект можно оценивать по этой же формуле, если эффект от освобождения территорий продолжает проявляться (например, если территории отданы в аренду) с соответствующей поправкой коэффициента. Если эффект перестает проявляться, то последнее слагаемое в формуле вычисления экономического эффекта зануляется (отбрасывается).

Стоит отметить, что при $t \geq T$ величина экономического эффекта снизится за счет уменьшения объема перерабатываемых ЗШО: при $t < T$ объем годовой переработки должен превосходить объем ЗШО, поступающих в золошлакоотвал за год, чтобы общий объем ЗШО в золошлакоотвале с годами уменьшался и период T в принципе смог наступить.

2. Оценка экологического эффекта — от внедрения комплексной переработки ЗШО экологический эффект проявляется в улучшении экологической ситуации в районе энергопредприятия: уменьшении загрязнения воздуха, происходящего вследствие пыления золы с поверхности отвала, снижении загрязнения вод и почв.

В денежном эквиваленте экологический эффект можно оценить по уменьшению затрат граждан на лечение от болезней, вызванных загрязнением воздуха, вод и почв, снижению затрат на медицинское страхование, увеличению выработки предприятий, на которых работают граждане, проживающие в районе золошлакоотвалов, вследствие сокращения количества пропусков работников по болезни, а также другими способами. Сбор данных для подобных расчетов является отдельной масштабной зада-

чей, к тому же экологический эффект в полной мере начнет проявляться только после T -го периода, поэтому показатели, необходимые для расчета данного эффекта, оцениваются экспертно. Можно предложить следующую формулу расчета экологического эффекта от внедрения комплексной переработки ЗШО в t -м году:

$$\text{Экол. } \mathcal{E}_t = k_7 V_{nep_t},$$

где k_7 — коэффициент, выражающий денежную величину экологического эффекта на 1 т перерабатываемых ЗШО, может быть рассчитан по формуле

$$k_7 = \frac{3Z_0 - 3Z_T / (1+r)^T}{V_0},$$

здесь $3Z_0$ — затраты населения на здоровье в базовом году (перед внедрением комплексной переработки); $3Z_T$ — затраты населения на здоровье в T -м году; r — ставка дисконтирования.

Таким образом, предполагается, что эффект, в полной мере проявляющийся лишь после T -го года, распределяется равномерно по годам в зависимости от объема переработки ЗШО.

3. Оценка социального эффекта — от внедрения комплексной переработки ЗШО социальный эффект проявляется в появлении новых рабочих мест для населения на открывающихся обогатительных фабриках (в денежном выражении — суммарная заработная плата, получаемая населением на новых рабочих местах) и в снижении тарифов на тепло и электроэнергию, происходящем вследствие уменьшения себестоимости производства энергии за счет сокращения (а после T -го года и исчезновения) затрат на хранение ЗШО и модернизацию золошлакоотвалов. Социальный эффект в t -м году может быть оценен с помощью следующей формулы:

$$\text{Соц. } \mathcal{E}_t = k_8 V_{nep_t} + N k_9 V_{nep_t},$$

где N — количество человек, пользующихся услугами данного энергопредприятия; k_8 — коэффициент, выражающий величину заработной платы работников новых обогатительных фабрик на 1 т перерабатываемых ЗШО; k_9 — коэффициент, выражающий величину уменьшения суммарного тарифа на тепло и электроэнергию, приходящуюся на 1 т перерабатываемых ЗШО.

Коэффициент k_8 оценивается экспертно. Предполагается, что суммарная заработная плата растет пропорционально росту объема переработки ЗШО (больше переработка, следовательно, больше фабрика, следовательно, необходимо больше работников). Данный коэффициент может быть рассчитан по формуле

$$k_9 = \frac{\text{Тариф}_0 - \text{Тариф}_T / (1+r)^T}{V_0},$$

где Тариф_T — суммарный тариф на тепло и электроэнергию в T -м году.

Предполагается, что итоговое уменьшение тарифа (до тарифа T -го года) распределяется равномерно на весь период T лет и эффект от этого уменьшения проявляется в каждом году, причем в равном объеме.

Модель интегральной оценки эффективности внедрения комплексной переработки ЗШО. Данную модель будем строить в предположении, что выполняются следующие условия:

– переработки ЗШО одинаковы во всех периодах (за каждый t -й год перерабатывается одинаковый объем ЗШО), т. е.

$$V_{nep_t} = V_{nep} = \text{const}, \forall t;$$

– объемы поступления ЗШО одинаковы во всех периодах (за каждый t -й год в отвал поступает одинаковый объем ЗШО), т. е.

$$Vnocm_t = Vnocm = const, \forall t;$$

– удельные прибыли от продажи новой продукции ($k_1 - k_4$), а также цена на уголь остаются неизменными во всех периодах (могут быть проиндексированы с помощью прогнозных индексов), т. е.

$$k_1 - k_4 = const, \quad ЦУ_t = ЦУ = const, \forall t;$$

– эффект от освобождения территорий (фактически проявляется в T -м году или позже) распределяется равномерно на весь период T и проявляется в каждом t -м году в одинаковой степени;

– экологический эффект, в полной мере проявляющийся лишь после T -го года, распределяется равномерно по годам в зависимости от объема переработки ЗШО;

– суммарная заработная плата, получаемая населением на новых рабочих местах, растет пропорционально росту объема переработки ЗШО (больше переработка, следовательно, больше фабрика, следовательно, необходимо больше работников);

– итоговое уменьшение тарифа (до тарифа T -го года) распределяется равномерно на весь период T лет, и эффект от этого уменьшения проявляется в каждом году, причем в равном объеме.

Описанные предпосылки находят свое отражение в формулах для оценки показателей, используемых для оценки эффективности внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов.

Интегральной оценкой эффективности внедрения (в t -м году) служит сумма трех эффектов:

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}_{кон.} \mathcal{E}_t + \mathcal{E}_{кол.} \mathcal{E}_t + Соц. \mathcal{E}_t.$$

В развернутом виде

$$\mathcal{E}_t = Vnep_t \sum_{j=1}^6 k_j + k_7 Vnep_t + k_8 Vnep_t + Nk_9 Vnep_t,$$

или (если вынести $Vnep_t$ за знак суммирования и затем за скобки)

$$\mathcal{E}_t = Vnep_t \left(\sum_{j=1}^8 k_j + Nk_9 \right).$$

Данная формула позволяет получить интегральную оценку эффекта от внедрения комплексной переработки ЗШО, проявляющегося в t -м году. Для приведения к начальному моменту времени эффект необходимо умножить на величину $1/(1+r)^t$, где r — ставка дисконтирования. Индекс t во всех приведенных формулах можно опустить (по предпосылке 1).

Таким образом, модель интегральной оценки эффективности внедрения комплексной переработки ЗШО для t -го года имеет вид:

$$\mathcal{E}_t^{\partial} = \frac{Vnep \left(\sum_{j=1}^8 k_j + Nk_9 \right)}{(1+r)^t};$$

$$k_5 = \frac{ДН ЦУ_t}{V_0};$$

$$k_6 = \frac{\mathcal{E}OT}{V_0};$$

$$k_7 = \frac{ЗЗ_0 - ЗЗ_T / (1+r)^T}{V_0};$$

$$k_9 = \frac{\text{Тариф}_0 - \text{Тариф}_T}{V_0 (1+r)^T}.$$

Чтобы вычислить суммарный интегральный эффект за T лет, необходимо просуммировать эффекты за все годы данного периода:

$$CЭ = \sum_{t=1}^T \frac{\partial_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^T \partial_t^\theta.$$

Для расчета относительного эффекта (аналог рентабельности) нужно отнести суммарный эффект к суммарным затратам (инвестициям) на строительство и пуск в эксплуатацию фабрики:

$$OCЭ = \frac{CЭ}{CЗ},$$

где $CЗ$ — суммарные затраты.

Ежегодные затраты на работу фабрики не включены в суммарные затраты, так как они уже отражены в числителе: для расчета экономического эффекта используются прибыли, а не выручка, т. е. ежегодные затраты уже учтены.

Задача максимизации эффекта от внедрения комплексной переработки ЗШО. Эффект — явление положительное как для бизнеса, так и для региона в целом, поэтому целесообразно поставить задачу его максимизации.

Предположим, что имеется n энергопредприятий, возле которых планируется построить фабрики по обогащению ЗШО. Для каждого предприятия известны объемы золы в отвалах V_0 , ежегодно поступающие объемы золы в отвал, а также имеются все остальные данные, необходимые для расчета показателя эффективности внедрения комплексной переработки ЗШО.

Поставим задачу максимизации суммарного годового эффекта (для t -го года, для n предприятий) от внедрения комплексной переработки ЗШО при ограничениях на сумму выделяемых на внедрение инвестиций, на величину спроса на строительные материалы, а также при условии, что объемы переработки должны превышать объемы золы, ежегодно поступающей в отвал.

Ограничение на величину спроса вытекает из двух причин: во-первых, строительные фирмы не готовы сразу перейти на использование материалов, произведенных из ЗШО, по различным причинам, а во-вторых, если предположить, что комплексная переработка внедряется на нескольких (или даже на всех) энергопредприятиях региона, то суммарное предложение может превысить спрос, так как объемы сырья для строительных материалов из ЗШО будут велики. Ограничение на объемы переработки обусловлены тем, что в долгосрочной перспективе энергопредприятиям необходимо избавиться от золошлакоотвалов (условие наступления периода T).

Коэффициенты целевой функции ($\lambda_i, i = 1, \dots, n$) вычисляются исходя из принципа «чем больше объем ЗШО в отвале, тем больше вес»:

$$\lambda_i = \frac{V_{0i}}{\sum_{i=1}^n V_{0i}}.$$

Такой принцип необходимо использовать для выравнивания сроков избавления энергопредприятий региона от золошлакоотвалов и, таким образом, выравнивания срока наступления экологического и социального эффектов.

Формализация задачи:

$$F(Vnep_1, \dots, Vnep_n) = \sum_{i=1}^n \lambda_i (\partial_t^\theta)_i \rightarrow \max;$$

$$k_{10} \sum_{i=1}^n Vnep_i \leq H;$$

$$ДСМ \sum_{i=1}^n V_{пер_i} \leq ПСМ_i;$$

$$V_{пер_i} - V_{ном_i} \geq НУ_i,$$

где k_{10} — коэффициент, указывающий долю затрат на строительство фабрики, приходящуюся на 1 т перерабатываемых ЗШО; $ДСМ$ — предполагаемая доля строительных материалов в общем объеме переработки; $ПСМ_i$ — потребность потребителей в стройматериалах в t -м году; $НУ_i$ — норма уменьшения объема золошлакоотвала i -го энергопредприятия.

Норма уменьшения объема золошлакоотвала i -го энергопредприятия может определяться на основе запаса ЗШО в отвале, например:

$$НУ_i = НУ V_{0i}$$

где $НУ$ — желаемая минимальная доля от исходного объема золы, которая должна быть переработана за год.

Если инвестиции поступают отдельно для каждого предприятия (например, от разных инвесторов), то первое ограничение преобразуется в n ограничений вида

$$k_{10} V_{пер_i} \leq И_i, i = 1, \dots, n.$$

Данная задача является задачей линейного программирования. Решив ее, можно получить оптимальные объемы переработки ЗШО для каждого из энергопредприятий, т. е. вычислить оптимальные мощности обогатительных фабрик, предназначенных для комплексной переработки ЗШО, которые необходимо построить рядом с золошлакоотвалами данных энергопредприятий.

Проведение экспериментов на модели по данным Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9. Решим задачу максимизации эффекта 1-го года для двух ТЭЦ: Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9. Сведем исходные данные в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для решения задачи максимизации эффекта от внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов на Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9

Показатель	Ново-Иркутская ТЭЦ	ТЭЦ-9
V_0	7 954 396	27 773 053
$V_{ном}$	221 000	170 000
$НУ$	0,05	0,05
$ДСМ$	0,4	0,4
$ПСМ$	600 000	600 000
$И$	300 000 000	300 000 000
k_1	284,152	284,152
k_2	250	250
k_3	3062,5	3062,5
k_4	230	230
k_8	11,916528	11,916528
k_{10}	139,42	139,42
$ДН$	0,2	0,2
$ЦУ$	4 000	4 000
$ЭОТ$	60 000 000	200 000 000
$ЗЗ_0$	6 000 000	14 000 000
$ЗЗ_T$	0	0
$Тариф_0$	$0,72 \cdot 156 \cdot 12 = 1\,347,84$	$0,72 \cdot 156 \cdot 12 = 1\,347,84$
$Тариф_T$	1 078,272	1 078,272
N	307 240	280 651
r	0,0759	0,0759

Посчитаем остальные показатели, необходимые для расчета экономической, экологической и социальной эффективности (табл. 4).

Таблица 4
Расчетные коэффициенты для решения задачи максимизации эффекта от внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов на Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9

Показатель	Ново-Иркутская ТЭЦ	ТЭЦ-9
k_5	0,000 100 573	2,88049 E-05
k_6	7,542 998 865	7,201 224 871
k_7	0,754 299 887	0,504 085 741
k_9	3,38892 E-05	9,7061 E-06
$HU_{1,2}$	397 719,8	1 388 652,65

Имея все необходимые данные, построим задачу максимизации эффекта:

$$F(Vnep_1, Vnep_2) = \lambda_1 Vnep_1 \frac{\left(\sum_{j=1}^8 k_{j(1)} + N_{(1)} k_{9(1)}\right)}{(1+r)} + \lambda_2 Vnep_2 \frac{\left(\sum_{j=1}^8 k_{j(2)} + N_{(2)} k_{9(2)}\right)}{(1+r)}.$$

Нижние индексы указывают на то, что показатель рассчитан для соответствующего предприятия: 1 — Ново-Иркутская ТЭЦ; 2 — ТЭЦ-9; $\lambda_1 = 0,222\ 641\ 029$; $\lambda_2 = 0,777\ 358\ 971$.

Получим два соотношения, которые имеют смысл эффективности переработки 1 т ЗШО:

$$\frac{\left(\sum_{j=1}^8 k_{j(1)} + N_{(1)} k_{9(1)}\right)}{(1+r)} = 3\ 585,164;$$

$$\frac{\left(\sum_{j=1}^8 k_{j(2)} + N_{(2)} k_{9(2)}\right)}{(1+r)} = 3\ 577,468.$$

Подставив значения, получаем задачу максимизации эффекта от внедрения комплексной переработки ЗШО Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9 (в 1-м году):

$$F(Vnep_1, Vnep_2) = 798,2Vnep_1 + 2\ 780,98Vnep_2 \rightarrow \max;$$

$$139,42Vnep_1 + 139,42Vnep_2 \leq 300\ 000\ 000;$$

$$0,4Vnep_1 + 0,4Vnep_2 \leq 600\ 000;$$

$$Vnep_1 \geq 459\ 631,88;$$

$$Vnep_2 \geq 1\ 003\ 191,59.$$

Решив ее, найдем оптимальные объемы переработки ЗШО и максимальное значение целевой функции:

$$Vnep_1^* = 459\ 631,88; Vnep_2^* = 1\ 040\ 368,12;$$

$$F(Vnep_1^*, Vnep_2^*) = 2\ 944\ 684\ 879.$$

Таким образом, рядом с Ново-Иркутской ТЭЦ необходимо построить обогатительную фабрику, перерабатывающую 459 631,88 т ЗШО в год, а рядом с ТЭЦ-9 — фабрику, перерабатывающую 1 040 368,12 т ЗШО в год. Оптимальное значение целевой функции не отражает суммарный эффект, так как была произведена корректировка на коэффициенты λ_1 и λ_2 .

Зная оптимальные объемы переработки ЗШО, посчитаем эффекты от внедрения комплексной переработки ЗШО за 1-й год эксплуатации (табл. 5).

Таблица 5

**Эффективность внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов
на Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9**

Показатель	Ново-Иркутская ТЭЦ	ТЭЦ-9
Экон.Э ₁	1 762 318 302	3 988 618 702
Экол.Э ₁	346 700,274 9	524 434,734 6
Соц.Э ₁	10 262 955,37	15 231 566,03
Э ₁	1 772 927 957	4 004 374 703
Э ₁ ^р	1 647 855 709	3 721 883 728

Суммарный эффект за 1-й год эксплуатации от внедрения комплексной переработки ЗШО на данных ТЭЦ составляет 5 369 739 437 р.

Подсчитаем, за сколько лет рассматриваемые ТЭЦ смогут избавиться от золошлакоотвалов. Для этого вычислим T .

Текущий объем золы в отвале (V_t) в t -м году

$$V_t = V_0 - V_{\text{пер}t} + V_{\text{нос}t}.$$

При $t = T$ текущий объем золы в отвале $V_t = 0$:

$$0 = V_0 - V_{\text{пер}T} + V_{\text{нос}T}.$$

Отсюда T можно вычислить так:

$$T = \left[\frac{V_0}{V_{\text{пер}} - V_{\text{нос}}} \right] + 1.$$

Здесь квадратные скобки обозначают целую часть числа. Тогда для Ново-Иркутской ТЭЦ $T = 34$ года, для ТЭЦ-9 $T = 32$ года.

По результатам расчетов модели видно, что в целом внедрение комплексной переработки ЗШО угольных энергопредприятий обеспечивает большой денежный эффект. Подавляющую часть денег приносит продажа новых видов продукции, использование недожога и освобождение территорий — доля экономического эффекта в общем эффекте равна 99,4 % для Ново-Иркутской ТЭЦ и 99,6 % для ТЭЦ-9. Несмотря на очень маленькую долю в общем эффекте, экологический и социальные эффекты в абсолютном выражении также весьма велики.

Внедрение комплексной переработки ЗШО на рассмотренных ТЭЦ при заданных параметрах приведет к избавлению от золошлакоотвалов, т. е. к реализации стратегической цели претворения в жизнь концепции «угольные ТЭЦ и ТЭС без золошлакоотвала» через 34 года. По результатам экспериментов на модели оказалось, что на этот срок (параметр T) большое влияние оказывает задаваемый минимальный объем переработки ЗШО (параметр НУ).

Плюсом разработанной модели для определения оптимальных объемов переработки ЗШО является учет выравнивания сроков избавления от золошлакоотвалов — взвешивание удельных эффектов коэффициентами, вычисляемыми на основе объемов золы в золошлакоотвалах, накопленных к моменту внедрения комплексной переработки ЗШО. Как видно из результатов расчетов, сроки избавления от отвалов Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-9 почти равны. Важным моментом для выравнивания сроков, как уже отмечалось ранее, является также выбор параметра нормы уменьшения НУ объема золошлакоотвала.

Сложность применения модели заключается в поиске исходных данных: сведения о составе золы, если они вообще имеются, не предоставляются в государственные статистические органы, а имеющиеся редко содержат данные о содержании в золе драгоценных металлов; также многие параметры необходимо оценивать экспертно либо заниматься масштабными исследованиями для сбора этих данных (например, о затра-

тах населения на лечение болезней, вызванных загрязнением окружающей среды золой из отходов).

Возможными путями повышения оптимальных объемов переработки и, соответственно, достижения эффекта от внедрения комплексной переработки ЗПО являются следующие корректировки модели:

- отказ от ограничения спроса на строительные материалы — при единичном внедрении комплексной переработки ЗПО объемы получаемых строительных материалов, скорее всего, не будут превышать спрос на них; данное ограничение характерно для массового внедрения комплексной переработки (например, на всех ТЭЦ региона);

- исключение использования параметра НУ (назначение его нулем) — данная корректировка также может сильно повлиять на разность сроков избавления от отходов, но может положительно сказаться на суммарном эффекте;

- отказ от выравнивания сроков — данная корректировка может увеличить оптимальные объемы переработки, но сроки избавления от отходов в таком случае могут отличаться в разы;

- введение вместо ставки дисконтирования ставок — различных ставок для каждого года (для более точного приведения эффекта к настоящему моменту).

Включение данных корректировок является задачей дальнейших исследований по моделированию эффективности внедрения комплексной переработки ЗПО. В целом по результатам моделирования видно, что данное направление исследований является перспективным и внедрение комплексной переработки ЗПО угольных энергопредприятий принесет большой суммарный эффект, складывающийся из экономического, экологического и социального эффектов.

Список использованной литературы

1. Аксеньюшкина Е. В. Математика-2: нелинейное и линейное программирование : учеб. пособие / Е. В. Аксеньюшкина, Н. В. Тарасенко, С. В. Тимофеев. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2009. — 122 с.
2. Анисимов В. Н. Глубокая безотходная переработка природно-техногенных месторождений автономными мобильными технологическими комплексами / В. Н. Анисимов // Полиуретановые технологии. — 2008. — № 2. — С. 22–28.
3. Анисимов В. Н. Новый технологический комплекс по переработке отходов обогащения металлосодержащих руд / В. Н. Анисимов, И. С. Булгаков, В. К. Кушнеренко // Горный журнал. — 2007. — № 6. — С. 18–22.
4. Власова В. В. Разработка технологий комплексного извлечения полезных компонентов из золошлаковых отходов ТЭС Иркутской области : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.13 / В. В. Власова. — Иркутск, 2005. — 182 с.
5. Зоткин А. Г. Зола ТЭС — эффективный компонент бетона / А. Г. Зоткин. — URL : <http://www.zolprod.irkutskenergo.ru/qa/2082.html/>.
6. Кожуховский И. Угольные ТЭС без золошлакоотвала: реальность и перспективы: национальная ассоциация производителей и потребителей золошлаковых материалов / И. Кожуховский, Ю. Цельковский. — URL : <http://zoloshlaki.ru/news/publikatsii-v-smi/ugolnye-tes-bez-zoloshlakootvala-realnost-i-perspektivy/>.
7. Лысенко Д. В. Комплексный экономический анализ хозяйственной деятельности : учеб. для вузов / Д. В. Лысенко. — М. : Инфра-М, 2008. — 320 с.
8. Мельник М. В. Анализ финансово-хозяйственной деятельности предприятия : учеб. пособие / М. В. Мельник, Е. Б. Герасимова. — М. : Форум : Инфра-М, 2008. — 192 с.
9. Орлов В. А. Оценка эффективности бюджетных расходов в процессе реализации муниципальных целевых программ / В. А. Орлов // Бизнес в законе. — 2011. — № 5. — С. 234–237.
10. Потапенко В. А. Комплексная оценка природного и техногенного ресурсных потенциалов Подмосковского бурогоугольного бассейна / В. А. Потапенко, Ю. Н. Кузнецов, С. С. Гавришин // Горная промышленность. — 2012. — № 4 (104). — С. 104.
11. Федотов К. В. Технология эффективной переработки золошлаковых отходов тепловых электростанций / К. В. Федотов, Н. И. Никольская, В. В. Власова // Обогащение руд : сб. науч. тр. — Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2002. — С. 15–28.

12. Целыковский Ю. К. Некоторые проблемы использования золошлаковых отходов ТЭС в России / Ю. К. Целыковский // Энергетик. — 1998. — № 7. — С. 29–34.
13. Шишелова Т. И. Мониторинг золоотвалов ТЭЦ и пути снижения их негативного влияния на окружающую среду / Т. И. Шишелова, М. Н. Самусева. — URL : http://www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7782490.
14. Шишелова Т. И. Об организации и осуществлении мониторинга подземных вод на золоотвалах ТЭЦ ОАО «ИРКУТСКЭНЕРГО» / Т. И. Шишелова, М. Н. Самусева // Успехи современного естествознания. — 2003. — № 12. — С. 110–111.
15. Шпирт М. Я. Безотходная технология. Утилизация отходов добычи и переработки твердых горючих ископаемых / М. Я. Шпирт. — М. : Недра, 1986. — 255 с.

References

1. Akseniyushkina E. V., Tarasenko N. V., Timofeyev S. V. *Matematika-2: nelineinoe i lineinoe programmirovaniye* [Mathematics-2: non-linear and linear programming]. Irkutsk, Baikal State University Economics and Law Publ., 2009. 122 p.
2. Anisimov V. N. Deep waste-free processing of natural and technogenic deposits via autonomous mobile technological complexes. *Poliuretanovye tekhnologii = Polyurethanic technologies*, 2008, no. 2, pp. 22–28. (In Russian).
3. Anisimov V. N., Bulgakov I. S., Kushnerenko V. K. A new technological complex of processing wastes of metallic ores benefaction. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*, 2007, no. 6, pp. 18–22. (In Russian).
4. Vlasova V. V. *Razrabotka tekhnologii kompleksnogo izvlecheniya poleznykh komponentov iz zoloshlakovykh otkhodov TES Irkutskoi oblasti. Kand. Diss.* [Developing technologies of complex extraction of commercial components from CHP plant ash and slag wastes. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2005. 182 p.
5. Zotkin A. G. *Zola TES — effektivnyi komponent betona* [CHP plant ash is an effective component of concrete]. Available at: <http://www.zolprod.irkutskenergo.ru/qa/2082.html/>. (In Russian).
6. Kozhukhovskiy I., Tselykovskiy Yu. *Ugol'nye TES bez zoloshlakootvala: real'nost' i perspektivy: natsional'naya assotsiatsiya proizvoditelei i potrebitelei zoloshlakovykh materialov* [Coal CHP plants without ash-and-slag disposal areas: reality and prospects: National Association of Producers and Consumers of Ash and Slag Materials]. Available at: <http://zoloshlaki.ru/news/publikatsii-v-smi/ugolnye-tes-bez-zoloshlakootvala-realnost-i-perspektivy/>. (In Russian).
7. Lysenko D. V. *Kompleksnyi ekonomicheskii analiz khozyaistvennoi deyatel'nosti* [Complex economic analysis of economic activities]. Moscow, M. Infra-M Publ., 2008. 320 p.
8. Melnik M. V., Gerasimova E. B. *Analiz finansno-khozyaistvennoi deyatel'nosti predpriyatiya* [Analysis of company's financial and economic activities]. Moscow, Forum, Infra-M Publ., 2008. 192 p.
9. Orlov V. A. Assessing efficiency of budget expenses in the process of implementing municipal target programs. *Biznes v zakone = Business in Law*, 2011, no. 5, pp. 234–237. (In Russian).
10. Potapenko V. A., Kuznetsov Yu. N., Gavrishin S. S. Strategic assessment of the natural and technogenic mineral resources of the Moscow Brown Coal Basin. *Gornaya promyshlennost' = Mining Industry Journal*, 2012, no. 4 (104), p. 104. (In Russian).
11. Fedotov K. V., Nikolskaya N. I., Vlasova V. V. Technology of effective processing ash and slag wastes of thermal electric power stations. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation]. Irkutsk State Technical University Publ., 2002, pp. 15–28. (In Russian).
12. Tselykovskiy Yu. K. Some problems of utilizing ash and slag wastes of CHP plants in Russia. *Energetik = Energetik*, 1998, no. 7, pp. 29–34. (In Russian).
13. Shishelova T. I., Samuseva M. N. *Monitoring zolootvalov TETs i puti snizheniya ikh negativnogo vliyaniya na okruzhayushchuyu sredu* [Monitoring CHP plant ash-disposal areas and ways of decreasing their negative impact on environment]. Available at: http://www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7782490. (In Russian).
14. Shishelova T. I., Samuseva M. N. On development and maintenance of monitoring subsoil waters in ash-disposal areas of the CHP plant of JSC of «Irkutsk energo» *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*, 2003, no. 12, pp. 110–111. (In Russian).
15. Shpirt M. Ja. *Bezotkhodnaya tekhnologiya. Utilizatsiya otkhodov dobychi i pererabotki tverdykh goryuchikh iskopaemykh* [Non-waste technology. Utilizing wastes of extraction and processing of solid combustible minerals]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 255 p.

Информация об авторах

Деренко Сергей Николаевич — студент, Санкт-Петербургский гуманитарный университет профсоюзов, 192238, г. Санкт-Петербург, ул. Фучика, 15, e-mail: ser_der@inbox.ru.

Никифорова Ирина Аркадьевна — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой математики и эконометрики, Байкальский государственный университет экономики и права, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, e-mail: ia-nikiforova@mail.ru.

Authors

Sergey N. Derenko — student, Saint-Petersburg Humanitarian University of Trade Unions, 15 Fuchik St., 192238, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: ser_der@inbox.ru.

Irina A. Nikiforova — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Chair of Mathematics and Econometrics, Baikal State University of Economics and Law, 11 Lenin St., 664003, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: ia-nikiforova@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Деренко С. Н. Модель интегральной оценки эффективности внедрения комплексной переработки золошлаковых отходов угольных предприятий / С. Н. Деренко, И. А. Никифорова // *Baikal Research Journal*. — 2015. — Т. 6, № 5. — DOI : [10.17150/2411-6262.2015.6\(5\).17](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2015.6(5).17).

Reference to article

Derenko S. N., Nikiforova I. A. Model of integral assessment of efficiency of introducing complex processing of ash and slag wastes in colliery undertakings. *Baikal Research Journal*, 2015, vol. 6, no. 5. DOI : [10.17150/2411-6262.2015.6\(5\).17](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2015.6(5).17). (In Russian).