



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>

УДК 622:621.31

**Внутренний и перекрестный сопоставительный анализ
потребления электроэнергии на угольных разрезах****С.А. Топно^{1,2}  , Б.С. Умре²  , М.В. Аваре²  , Л.К. Саху¹  **¹ CSIR – Центральный институт горного дела и научно-исследовательских работ
по изучению и использованию топлива, Исследовательский центр Нагпура, г. Нагпур, Индия² Национальный институт технологии им. М. Висвесарая, г. Нагпур, Индия✉ seematopno@rediffmail.com**Аннотация**

На угольных разрезах потребляется большое количество электроэнергии. Электрические экскаваторы, насосы и установки для перегрузки угля потребляют 75 % от общего объема электроэнергии. В данной работе представлена схема моделирования для проведения сопоставительного анализа (как внутреннего, так и перекрестного) потребления электроэнергии на предприятии. Для разработки модели сопоставительного анализа потребления электроэнергии на конкретном предприятии был применен статистический подход (метод линейной регрессии). Удельное потребление электроэнергии (УПЭ) используется в качестве контрольного показателя оценки энергоэффективности конкретного предприятия и нескольких угольных предприятий в Индии на основе полевых исследований. Также проведен сезонный анализ потребления электроэнергии. Согласно полученным результатам контрольный показатель УПЭ составляет 0,50 кВт-ч/т, а потенциал энергосбережения для одного предприятия – 10,7 %. Для нескольких угольных предприятий контрольный показатель УПЭ составляет 0,52 кВт-ч/т. Сделан вывод о том, что УПЭ в значительной степени зависит от производственной мощности, а разработанные метод и модель горных работ позволяют выполнить сопоставительный анализ и достичь эффективного энергопотребления на разрезах.

Ключевые слова

электрический, сопоставительный анализ, внутренний анализ, перекрестный анализ, удельное энергопотребление, потребление энергии, разрез

Благодарности

Авторы выражают благодарность директору Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива за разрешение опубликовать данную работу. Авторы также выражают благодарность руководителю исследовательской группы и научным сотрудникам Исследовательского центра Нагпур Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (группа топливоведения) за оказанную поддержку. Мы искренне благодарны д-ру А.К. Сони, главному научному сотруднику Исследовательского центра Нагпур Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (группа геотехнологий), за ценные замечания и предложения по редактированию текста данной статьи. Мы также благодарим факультет электроники и информационных технологий и заведующего кафедрой электротехники Национального института технологии им. М. Висвесарая, все руководство предприятий SECL, BCCL и WCL, у которых были получены соответствующие данные в ходе исследований энергоэффективности и сопоставительного анализа.

Для цитирования

Topno S.A., Umre B.S., Aware M.V., Sahoo L.K. Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine

S.A. Topno^{1,2}  , B.S. Umre²  , M.V. Aware²  , L.K. Sahoo¹  ¹ CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India² Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India seematopno@rediffmail.com

Abstract

Electrical energy consumption in the opencast coal mine is very high. Electric shovels, pumps and coal handling plants consume 75% of the total electricity consumption of an opencast coal mine. In this paper, a modelling framework has been developed for electrical energy use benchmarking (internal as well as cross-sectional) of the mine. To develop a mine specific model for benchmarking electrical energy use statistical approach (linear regression method) has been applied. Specific power consumption (SPC) is used as a benchmarking index to assess the operating energy performance of a specific mine and multiple coal mines of India based on the field studies. Seasonal analysis of the electrical energy usage has also been analysed. Our results show the benchmark SPC as 0.50 kWh/t and the energy-saving potential as 10.7% for a single mine and the benchmark SPC of multiple coal mines as 0.52 kWh/t. The result concludes that SPC widely depends on its capacity and mining method and the developed model are useful for benchmarking and targeting for efficient electrical energy use in opencast mine.

Keywords

electrical, benchmarking, internal, cross sectional, specific power consumption, energy use, opencast mine

Acknowledgements

The authors duly acknowledge to the Director, CIMFR for permitting to publish this paper. The authors also extend their thanks to Head of the research group and other scientific staff of CSIR-CIMFR, Nagpur Research Centre (Fuel science group) for their support. We are extremely and sincerely thankful to Dr A.K. Soni, Chief Scientist, CSIR-CIMFR, Nagpur Research Centre (Mining technology group) for his valuable inputs and suggestions to improve the text and language content of this paper. Our thanks and acknowledgement are also due to the Department of Electronics and Information Technology and HOD, Electrical Department of VNIT; All mine authorities of SECL, BCCL and WCL mines from where relevant data have been collected during energy efficiency and benchmarking studies.

For citation

Topno S.A., Umre B.S., Aware M.V., Sahoo L.K. Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>

Терминология

УПЭ	Удельное потребление электроэнергии, кВт-ч/т
УПЭ _к	Контрольный показатель УПЭ, кВт-ч/т
УПЭ _{к,п}	Контрольный показатель УПЭ предприятия, кВт-ч/т
УПЭ _{min}	Минимальное УПЭ, кВт-ч/т
$E_{п}$	Годовое потребление энергии, кВт-ч
$E_{с}$	Энергосберегающий потенциал, %
$Q_{т}$	Годовой общий объем производства, т/год
$Q_{уголь}$	Годовой общий объем производства угля, т/год
$Q_{вскр}$	Перегрузка вскрышных пород, т/год
$\rho_{вскр}$	Насыпная плотность вскрышных пород, т/м ³
$V_{вскр}$	Объем вскрышных пород, м ³ /год

Подстрочные и надстрочные индексы

a, e, p	Агрегат, оборудование, прогрессивный
i, j, k, r	Месяц, год, оборудование, предприятие

Список сокращений

Tr	Трансформатор
SECL	South Eastern Coalfields Ltd
BCCL	Bharat Coking Coal Limited
WCL	Western Coalfields Limited
CIMFR	Центральный институт горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (Central Institute of Mining & Fuel Research)
CSIR	Совет научных и промышленных исследований (Council of Scientific and Industrial Research)



Введение

Добыча угля представляет собой энергоемкое производство на предприятии, ведущем открытую разработку. Добыча угля в Индии составляет 78 % от общего объема производства минерально-сырьевого сектора. В 2019–2020 гг. в Индии открытым и подземным способом было добыто 730,87 млн т угля¹. Около 94 % от общего объема добычи угля в Индии приходится на открытые горные работы². Наш анализ показал, что удельное потребление электроэнергии (УПЭ) для передовых практик открытых разработок с положительным градиентом в Индии составляет 123 МДж/т [1]. УПЭ трех крупных разрезов в Китае варьируется в пределах 90–225 МДж/т [2]. УПЭ семи канадских карьеров составляет от 97 до 256 МДж/т³. Потребление электроэнергии в горнодобывающей отрасли Индии равняется приблизительно 2,39 % от общего объема промышленного энергопотребления⁴, а горнодобывающей отрасли США – около 12 %⁵.

Поскольку энергопотребление на разрезах велико и включает в себя такие энергоемкие операции, как бурение, погрузку, транспортировку, откачку, перевалку угля и т.д., мониторинг и оценка энергопотребления имеют первостепенное значение. Сопоставительный анализ энергопотребления является мощным инструментом оценки энергоэффективности технологических процессов, установок, коммерческих зданий и т.д. Сопоставительный анализ (или перекрестный сопоставительный анализ) может быть проведен путем сравнения энергетических показателей аналогичных предприятий, включая передовой опыт в определенных отраслях. Проведение сопоставительного анализа также возможно на основе анализа временных рядов. Для проведения сопоставительного анализа энергопотребления в промышленных секторах Бойд с соавторами применяли статистический подход [3]. Кук и Рэндал использовали статистический метод для установления контрольного показателя энергопотребления путем расчета потребления и производства энергии [4]. Эти подходы определяются как «статистический сопоставительный анализ энергопотребления». Сопоставительный анализ энергопотребления на основе моделей для стекольной отрасли был рассмотрен в работе Сардешпанде и др. [5]. Биркенс и др. сравнивали удельное потребление электроэнергии стекловаренными печа-

ми с целью проведения сопоставительного анализа их энергоэффективности [6]. Тан и др. разработали методику проведения сопоставительного анализа энергоэффективности для обрабатывающей отрасли [7]. Внутренний сопоставительный анализ отрасли проводился с использованием линейного регрессионного анализа месячного энергопотребления и производства. Аналогичный сопоставительный анализ, основанный на передовых практиках в области энергоэффективности, был проведен для торговых центров в регионе побережья Персидского залива Джуайди и др. [8]. Приведенный выше анализ указывает на необходимость проведения внутреннего сопоставительного анализа, а также перекрестного анализа с целью экономии энергии и повышения энергоэффективности. Этот факт был подтвержден Вангом и др., которые отметили отсутствие литературы по энергоэффективности и сопоставительному анализу предприятий [9]. Наше исследование было выполнено на базе предприятий угольной промышленности Индии. Такие методы, как анализ временных рядов, внутренний и перекрестный сопоставительные анализы, были основаны на 4–5-летних полевых данных.

Дальнейший анализ показывает, что Саху и др. [10, 11] выполнили оценку энергоэффективности автосамосвалов на разрезах. В качестве показателя энергоэффективности для оценки энергоэффективности систем водоотведения на предприятиях [12], а также для сопоставительного анализа энергоэффективности энергоемких производств на Тайване [13] был использован показатель УПЭ. Топно и др. использовали УПЭ в качестве показателя эффективности для сопоставительного анализа потребления электроэнергии на угольных предприятиях [14, 15]. В настоящей работе предпринята попытка провести сопоставительный анализ потребления электроэнергии на угольных разрезах с целью определения эффективности работы разреза в различные периоды (по годам). Основная цель исследования – оценить передовые методы работы и установить цели на предстоящий год. Также изучались энергетические показатели для различных условий работы в течение всего года, чтобы установить практический эталон для открытых горных работ. Для проведения сопоставительного анализа была разработана схема моделирования с использованием статистического подхода, применимого к горному делу. В дальнейшем модель была расширена на использование электроэнергии на аналогичных открытых разработках в Индии. Модель была протестирована на крупном угольном разрезе в Индии с использованием данных временных рядов с помощью статистического подхода. Анализировались совокупные годовые данные, а также данные об оборудовании с целью прогнозирования контрольного показателя УПЭ. Полученный таким образом контрольный показатель дал нам минимальную мощность, необходимую для процесса добычи, в качестве передовой практики в горном деле за последние годы. Потенциал энергосбережения (предприятия) обеспечивает постоянное совершенствование и повышение эффективности. Настоящая работа представляет собой

¹ Ministry of Coal, Government of India. URL: <https://coal.gov.in/index.php/major-statistics/production-and-supplies>

² I bid.

³ Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC). Benchmarking the energy consumption of Canadian open-pit mine. Report No. 2005. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/publications/industrial/mining/open-pit/Open-Pit-Mines-1939B-Eng.pdf>

⁴ Government of India, Ministry of Statistics and Programme Implementation, Energy statistics 2018: Central statistics office. URL: <http://mospi.nic.in/publication/energy-statistics-2018>

⁵ US Energy information and administration, US Industrial sector energy consumption by type of Industry. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>

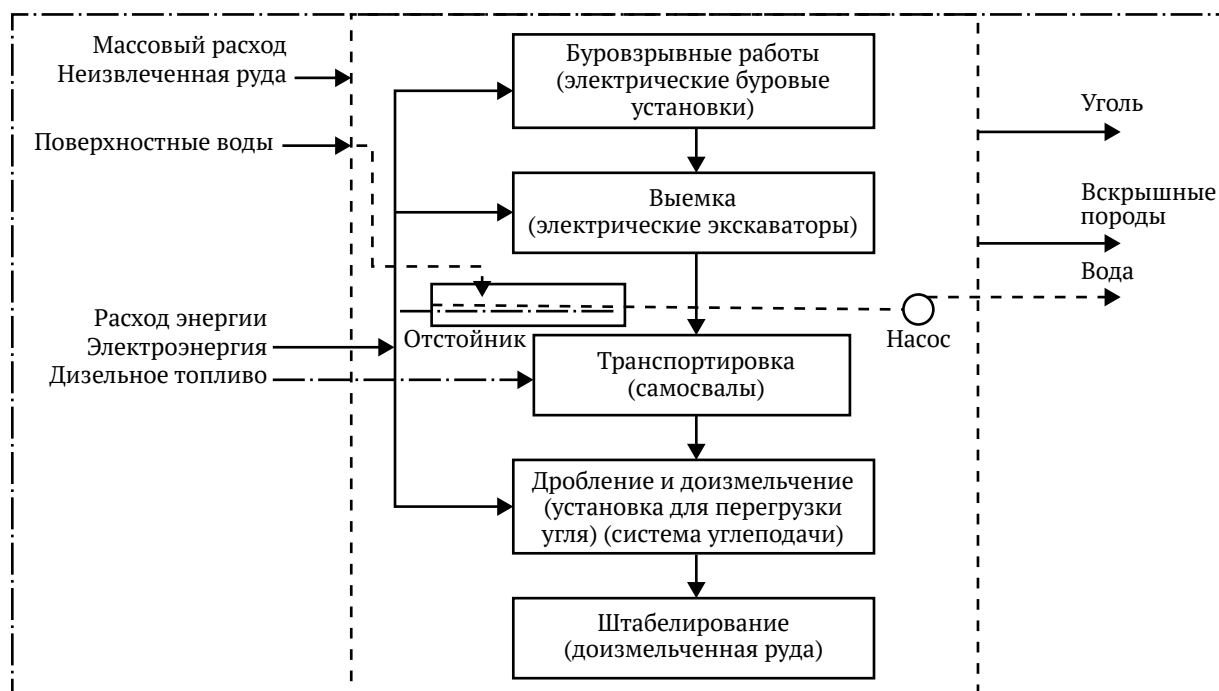


Рис. 1. Процесс открытой разработки [14]

расширенное исследование в виде сопоставительного анализа энергоэффективности энергопотребления на разрезах, проведенное Топно и др. [14]. В дополнение к сопоставительному анализу предприятий был проведен перекрестный сопоставительный анализ.

1. Процесс добычи и энергопотребление

Процесс добычи угля открытым способом включает в себя буровзрывные работы, выемку, транспортировку, дробление и сортировку угля (рис. 1). Процесс добычи угля на предприятии может быть как традиционным, так и ручным или механизированным. Основное рабочее оборудование на крупных разрезах включает в себя мощные электрические канатные экскаваторы для проведения погрузочных работ, самосвалы большой грузоподъемности для транспортировки руды, дизельные экскаваторы, бульдозеры и электронасосы для водоотведения. В качестве оборудования для перевалки угля на карьерах используются дробилки и виброгрохоты, позволяющие получить уголь требуемой фракции. Для работы всех основных агрегатов необходима энергия. При проведении горных работ на угольных разрезах основными источниками энергии являются электроэнергия и дизельное топливо (используемое в качестве топлива для машин). Потребление электроэнергии в разрезе, работающем по технологии «экскаватор–самосвал», составляет 52 % от общего объема энергии, поставляемой на предприятие.

1.1. Использование электроэнергии в карьере

Энергоснабжение предприятия обеспечивается за счет дизельного топлива и электроэнергии. Для проведения в действие большей части или всего тяжелого землеройно-транспортного оборудования в качестве

энергоносителя используют в основном дизельное топливо. К электрооборудованию, являющемуся предметом нашего исследования, относятся кабельные экскаваторы, буровые установки, дробилки, насосы установок для перегрузки угля, а также рудничное освещение. Профиль энергопотребления угольных разрезов (комбинация «экскаватор–самосвал») с установкой для перегрузки угля в процентном соотношении представлен на рис. 2. Доля экскаваторов и установок для перегрузки угля с электрическим приводом наиболее высокая (более 50 % от общего потребления электроэнергии на предприятии). На долю насосов приходится 18 % энергопотребления, что влияет на удельное энергопотребление предприятия. Энергопотребление также зависит от количества осадков, выпадающих в районе предприятия, и применения насосов, т.е. времени их работы.

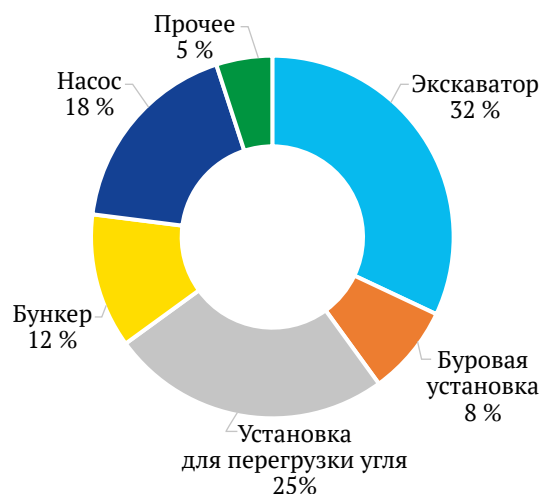


Рис. 2. Энергетический профиль

1.2. Распределение электроэнергии

Распределение электроэнергии, как и потребление энергии, имеет большое значение. «Высоковольтные» и «средневольтные» системы передачи электроэнергии являются двумя наиболее важными системами распределения электроэнергии практически на всех карьерах. Большинство карьеров запитываются от высоковольтных распределительных линий, поскольку потребители электроэнергии, как правило, расположены вдали от распределительных сетей. В данном случае питание осуществляется от подстанции 132/33 кВ через понижающие трансформаторы (2 шт. по 36 МВА). Первичное напряжение 33 кВ является обычным для такого горнодобывающего оборудования, как электрические экскаваторы и буровые установки. Оборудование для перемещения угля, насосы и освещение запитываются по линиям среднего/низкого напряжения 6,6 кВ/3,3 кВ/440 В. Однолинейная схема распределения электроэнергии показана на рис. 3.

2. Методика

Сопоставительный анализ энергопотребления угольных разрезов проводился с использованием «статистического подхода». При этом применялись два следующих метода:

1. Внутренний сопоставительный анализ (в пределах предприятия).

2. Перекрестный сопоставительный анализ.

2.1. Внутренний сопоставительный анализ

Для сопоставительного анализа УПЭ была разработана статистическая модель, использующая данные о потреблении электроэнергии в прошлом и общие данные производства. На технологической схеме метода показаны этапы работы (рис. 4), а на рис. 5 опи-

саны этапы построения модели. Следует отметить, что энергия расходуется на перевалку как вскрышных пород, так и угля (полезного ископаемого). Общий объем производства учитывается при оценке энергоэффективности и проведении внутреннего сопоставительного анализа, т.е. в пределах предприятия.

Ниже приведена формула, используемая для расчета УПЭ и месячного/годового прогрессивного показателя потребления энергии для технологического процесса, оборудования или предприятия. Для более детального понимания используются уравнения (1)–(8).

Прогрессивный показатель УПЭ для каждого процесса/оборудования

УПЭ за каждый прогрессивный год ($j = 1, 2, \dots, 4$) для всех видов оборудования/процессов (буровых установок, электроэкскаваторов, установок для перегрузки угля, насосов) рассчитывается по уравнению

$$\text{УПЭ}_{j,k} = \frac{\sum_{k=1}^n E_{c,j,k}}{Q_{t,j}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

где единица оборудования k соответствует экскаваторам ($k = 1$), буровым установкам ($k = 2$), установкам для перегрузки угля ($k = 3$), бункерным насосам и прочему оборудованию; E_c – общегодовое потребление энергии для каждой единицы оборудования/процесса $k = 1, 2, \dots, n$; Q_t – общий объем производства (сумма объемов производства угля Q_y и перевалки вскрышных пород $Q_{\text{вскр}}$) для $j = 1, 2, \dots, 4$:

$$Q_t = Q_y + Q_{\text{вскр}}, \quad (2)$$

где

$$Q_{\text{вскр}} = \rho_{\text{вскр}} V_{\text{вскр}}. \quad (3)$$



Рис. 3. Распределение электроэнергии в угольном разрезе

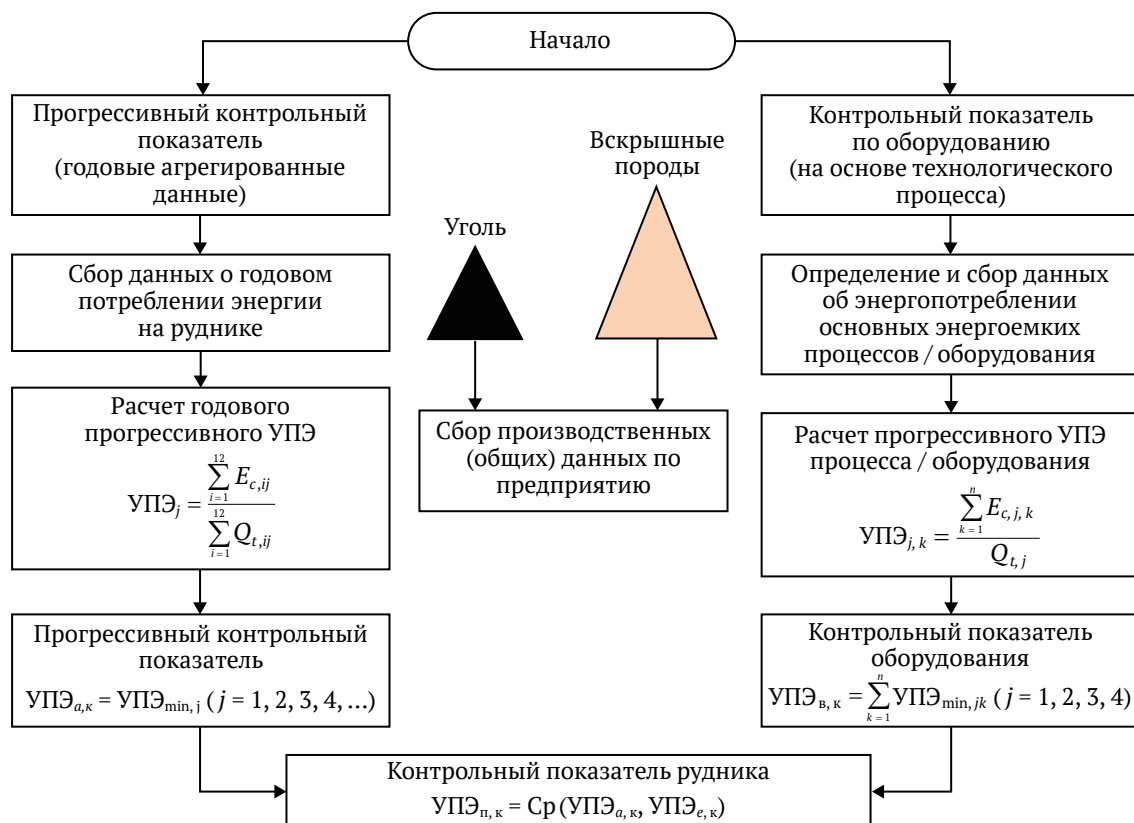


Рис. 4. Методика проведения сопоставительного анализа

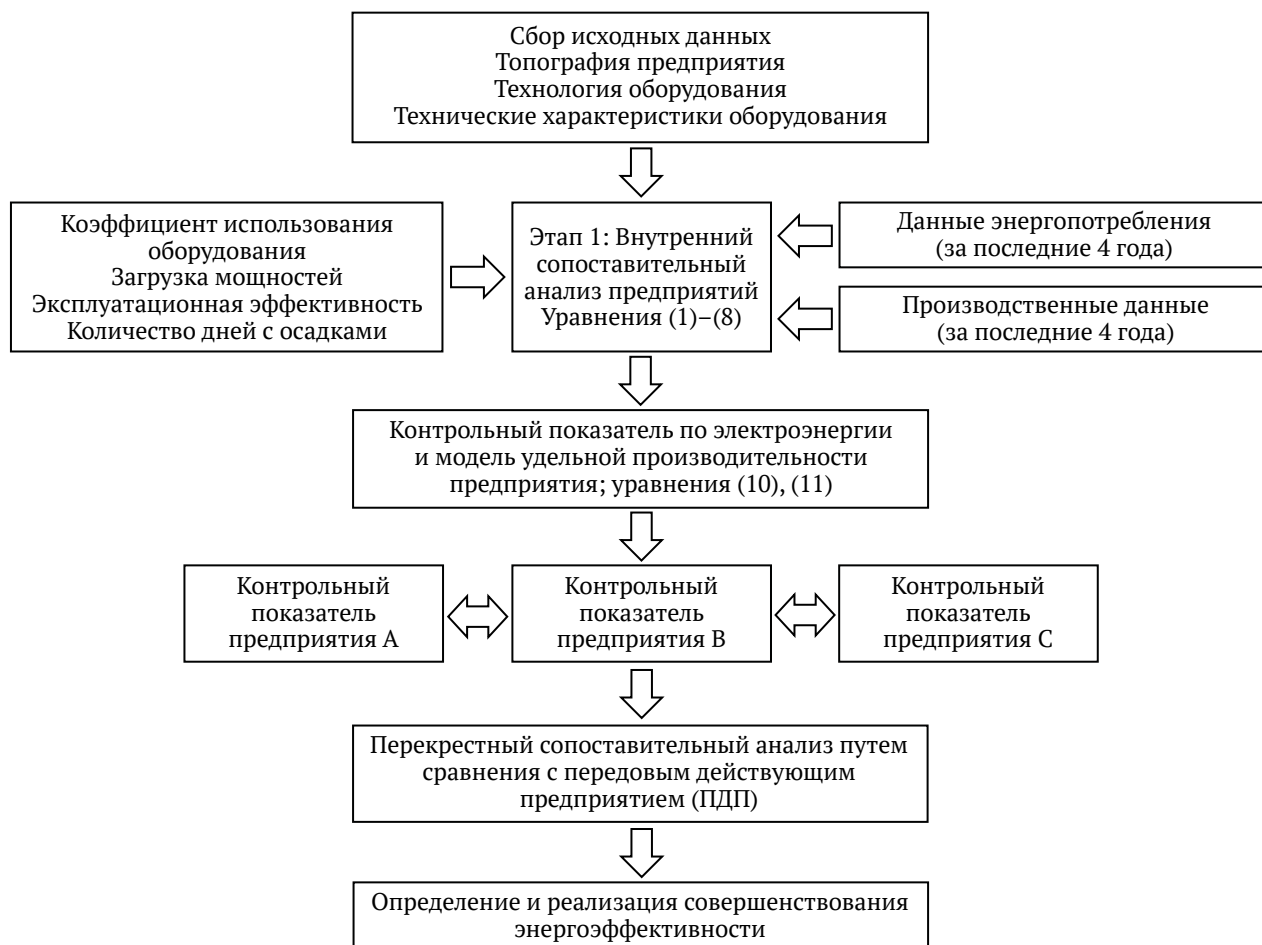


Рис. 5. Шаги и этапы статистической модели



Месячный и годовой прогрессивный показатель УПЭ предприятия

УПЭ в кВт-ч/т определяется как отношение общего энергопотребления E_c к общему объему производства Q_t за конкретный месяц/год. Для его оценки использовались агрегированные данные по месячному/годовому энергопотреблению и общему объему производства. Для анализа отклонений были изучены месячный и годовой прогрессивные показатели УПЭ, т.е. УПЭ_i и УПЭ_j.

Месячный УПЭ имеет вид

$$\text{УПЭ}_i = \frac{E_{c,i}}{Q_{t,i}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 12), \quad (4)$$

где $E_{c,i}$ – потребление энергии за i -й месяц года; $Q_{t,i}$ – общий объем производства за соответствующий месяц.

Годовой прогрессивный УПЭ (УПЭ_j) j -го года задается как

$$\text{УПЭ}_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} E_{c,ij}}{\sum_{i=1}^{12} Q_{t,ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, 4). \quad (5)$$

Контрольный показатель предприятия

Контрольный показатель УПЭ предприятия (УПЭ_{п,к}) на предстоящий год рассчитывается на основании среднего контрольного показателя, полученного по прогрессивному УПЭ для каждого технологического процесса/оборудования, а также по годовому прогрессивному УПЭ предприятия.

Прогрессивный контрольный показатель УПЭ оборудования/технологического процесса (УПЭ_{е,к}) оценивается следующим образом:

$$\text{УПЭ}_{в,к} = \sum_{k=1}^n \text{УПЭ}_{\min,jk} \quad (j = 1, 2, \dots, 4). \quad (6)$$

Годовой контрольный показатель УПЭ предприятия получают путем сравнения прогрессивного УПЭ за последние 4 года и рассчитывают следующим образом:

$$\text{УПЭ}_{а,к} = \text{УПЭ}_{\min,j} \quad (j = 1, 2, 3, 4). \quad (7)$$

Таким образом, общий контрольный показатель предприятия представлен следующим уравнением:

$$\text{УПЭ}_{п,к} = \text{Ср}(\text{УПЭ}_{е,к}, \text{УПЭ}_{а,к}). \quad (8)$$

2.2. Перекрестный сопоставительный анализ

Перекрестный сопоставительный анализ по УПЭ может быть выполнен или смоделирован с использованием уравнения (9). Данное уравнение может быть использовано только для подобных угольных предприятий, в которых применяется комбинация «экскаватор–самосвал». Влияние оказывают система разработки (добычи), используемое оборудование, перемещаемые уголь/руда/материал, а также применяемые способы эксплуатации электрического оборудования:

$$\text{УПЭ}_k = \text{УПЭ}_{\min,r} \quad (r = 1, 2, 3, \dots, m). \quad (9)$$

3. Ситуационное исследование

Для оценки угольного разреза Дипка, крупнейшего угольного разреза в Корбе, штат Чхаттисгарх, Индия, к сопоставительному исследованию был применен статистический подход. Предприятие принадлежит государственной компании M/s South Eastern Coalfields Ltd (SECL) и считается важным угледобывающим предприятием Индии. Исходные данные по энергопотреблению и производству (количеству материала, перемещаемому добычным оборудованием, и инженерным объектам) были получены в ходе визитов на разрез Дипка в различные периоды в процессе проведения исследования. Подключенная электрическая нагрузка разреза составляет 38,49 мВт, включая следующее: электрические экскаваторы с емкостью ковша 42 и 10 м³, насосы мощностью 3,3 кВ/440 В, установка для перегрузки угля, бункеры и прочие энергопотребители. Годовая потребляемая мощность разреза составляет 49 гВт-ч (2014–2015 гг.). Установленная производственная мощность разреза – 25 млн т/год при среднем коэффициенте вскрыши 1 : 1. Это значит, что для извлечения одного кубического метра угля требуется переместить один кубический метр вскрышных пород.

3.1. Энергоэффективность

Для добычи угля на разрезе Дипка используется комплекс оборудования, УПЭ которого рассчитывалось на основании энергопотребления отдельных единиц оборудования, используемых на разрезе, с применением уравнения (1). На рис. 6 показано годовое отклонение среднего показателя УПЭ для каждой единицы оборудования. Для сопоставительного анализа использовалось среднее УПЭ в связи с сезонным колебанием электрических нагрузок. Были проанализированы минимальное, максимальное и среднее УПЭ экскаватора, буровой установки, насосов и установки для перегрузки угля для разреза. Диапазон УПЭ для оборудования разреза показан на рис. 7. Эксплуатационные и энергетические характеристики оборудования представлены в табл. 1.

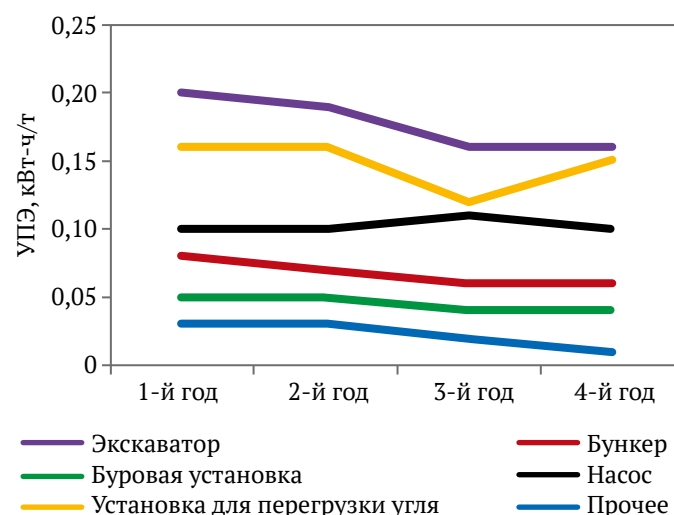


Рис. 6. Анализ прогрессивного показателя УПЭ по оборудованию

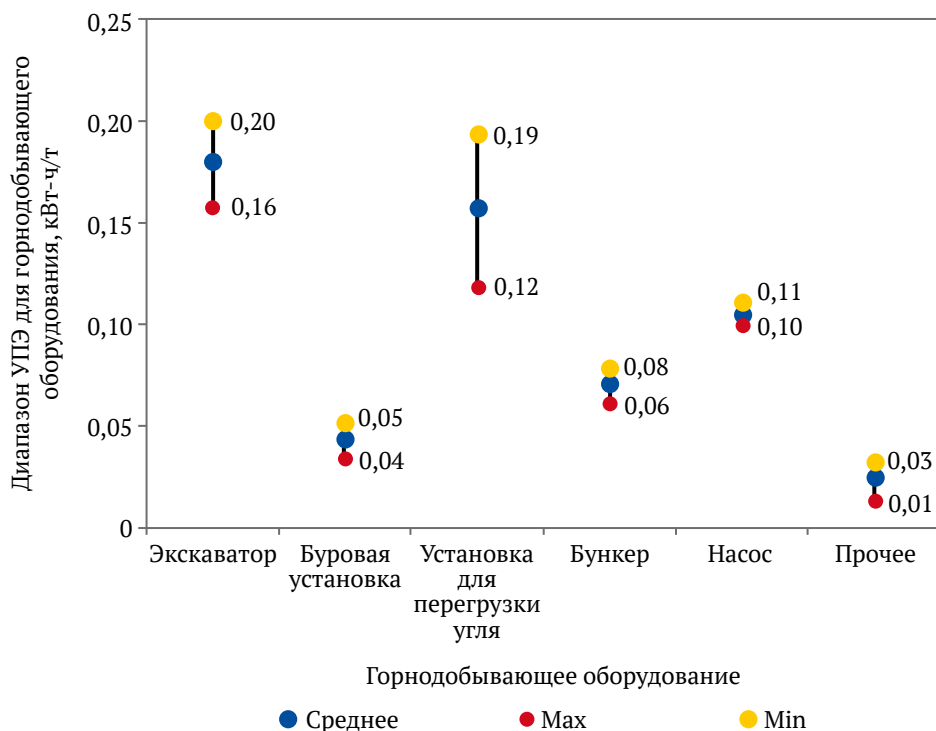


Рис. 7. Диапазон УПЭ горнодобывающего оборудования

Таблица 1

Эксплуатационные и энергетические характеристики разреза (ситуационное исследование)

Наименование оборудования	Технологический процесс	Показатель, определяющий производительность	Производитель	Потребляемая энергия	Энергопотребление, млн ед./тыс. л/год*
Электрический канатный экскаватор	Выемка	42 м ³	P &H and Bucyrus	Электричество (6,6 кВ)	16
Электрический экскаватор		5–10 м ³			
Гидравлические экскаваторы	Выемка	4,3 м ³	BEML BE 1000	Дизельное топливо	1005
Автопогрузчик		0,96–10 м ³			
Электрические буровые установки	Бурение	–	–	Электричество (6,6 кВ)	3
Гидравлические буровые установки	Бурение	Диаметр 6,3 дюйма, глубина 8 м	IDM 30	Дизельное топливо	380
Большегрузные самосвалы	Транспортировка	240 / 120 /100 т	BEML / Caterpillar / Terex	Дизельное топливо	6715
Большие бульдозеры	Транспортировка	320 /410 / 850 л.с.	BH-35-II CAT834B Komatsu	Дизельное топливо	2899
Установка для перегрузки угля и бункеры	Дробление и сортировка угля	–	–	Электричество	20
Насосы	Откачка рудничной воды	2775 л/с	–	Электричество	10
Общее потребление энергии		–	–	–	49 млн ед.

* млн ед. – киловатт-часов в случае энергопотребления; тыс. л/год – расход дизельного топлива.



Таблица 2

Анализ годового прогрессивного УПЭ угольного предприятия

Год	Общее потребление в единицах, кВт-ч · 10 ⁶	Уголь, млн т	Вскрыша, млн т	Общий объем производства, млн т	УПЭ общее, кВт-ч/т
2011–2012	34,87	25,00	31,10	56,10	0,62
2012–2013	37,49	29,13	33,59	62,72	0,60
2013–2014	40,24	29,18	49,10	78,28	0,51
2014–2015	49,30	31,00	63,73	94,73	0,52
Среднее	40,48	28,58	44,38	72,96	0,56

Таблица 3

Анализ годового прогрессивного УПЭ по различным угольным предприятиям

Исследованные предприятия*	Годовое потребление энергии, кВт-ч · 10 ⁶	Добыча угля, млн т	Перемещение вскрышных пород, млн т	Общий объем производства, млн т	УПЭ общее, кВт-ч/т
A	49	31	63,73	94,73	0,517
B	118	41	61,085	102,09	1,156
C	50	18,75	61,46	80,21	0,623
D	16,5	2,51	11,81	14,32	1,15
E	18	2,59	4,0145	6,60	2,727
F	8	1,34	2,077	3,42	2,339

*действующие предприятия, подобные исследуемому здесь, с различной производственной мощностью.

Согласно рис. 7 минимальное УПЭ электрического экскаватора составляет 0,16 кВт-ч/т, минимальное УПЭ установки для перегрузки угля – 0,12 кВт-ч/т, насоса – 0,10 кВт-ч/т. Контрольный показатель УПЭ разреза с учетом горнодобывающего оборудования и прочих инженерных систем – 0,49 кВт-ч/т. Диапазон УПЭ для установки для перегрузки угля весьма широкий в связи с колебанием входящего угольного потока на дробилки и конвейеры. Что касается экскаваторов, то для них диапазон УПЭ также широкий в связи с применением различных методов работ и перемещением различных материалов на предприятии. Контрольный показатель УПЭ для анализа УПЭ по типам оборудования путем сравнения данных удельного расхода энергии по всему оборудованию оценивается равным 0,49 кВт-ч/т.

3.2. Контрольный показатель УПЭ в пределах предприятия

Прогрессивное УПЭ предприятия рассчитывается на основании годового энергопотребления предприятия и соответствующего общего объема производства. Анализ годового прогрессивного УПЭ угледобычи представлен в табл. 2. Среднее прогрессивное УПЭ равняется 0,56 кВт-ч/т от общего объема производства, минимальное – 0,51 кВт-ч/т. С помощью уравнения (9) получаем контрольный показатель УПЭ разреза, равный 0,50 кВт-ч/т.

3.3. Контрольный показатель УПЭ для подобных предприятий

Был проведен перекрестный сопоставительный анализ шести действующих предприятий (предприятия A, B, C, D, E, F) путем сравнения удельного энер-

гопотребления по каждому из них (табл. 3)⁶. Все эти разрезы с различной производственной мощностью добывают уголь и имеют характеристики, подобные таковым исследуемого здесь разреза.

4. Результаты и обсуждение

Расчетный контрольный показатель УПЭ для ситуационного исследования составляет 0,50 кВт-ч/т. Тем не менее месячный показатель УПЭ в течение года может сильно варьироваться в связи с муссонами. Среднее минимальное УПЭ для засушливого сезона составляет 0,43 кВт-ч/т, для сезона дождей – 0,52 кВт-ч/т. Средний прогрессивный показатель УПЭ – 0,56 кВт-ч/т. Если сравнить контрольный показатель УПЭ и среднее УПЭ, то расчетный потенциал энергосбережения составляет 10,7 %. Области энергосбережения можно определить путем детального исследования опытно-промышленной эксплуатации оборудования на предприятии с использованием современных методов энергетического аудита. Опытно-промышленные работы были выполнены на электрическом экскаваторе Р&Н на разрезе Дипка. УПЭ рассчитывалось на основании фактического объема перемещенного материала и потребления энергии для проверки полученного результата. УПЭ только электрического экскаватора оценивается в 0,18 кВт-ч/т и составляет 36 % от общего объема потребляемого электричества.

⁶ CIMFR studies and technical communications on energy efficiency and benchmarking in Opencast mines. 2015.

4.1. Модель энергоэффективности предприятия

Для получения корреляции между удельным потреблением энергии и общим объемом производства Q был применен метод линейной регрессии. Результаты расчетов приведены на рис. 8. Отклонения УПЭ в зависимости от общего объема производства были отображены в виде графика. График рассеяния показывает зависимость между годовым накопленным прогрессивным УПЭ_а и общим объемом производства Q_t и описывается уравнением (значение R^2 линейной регрессии составляет 0,791):

$$\text{УПЭ}_a = -0,002Q_t + 0,771. \quad (10)$$

Линейный тренд имеет отрицательный уклон и указывает на то, что с увеличением общего объема производства УПЭ снижается. Эта линейная модель может быть использована для прогнозирования УПЭ в случае увеличения или уменьшения объема производства. Из рис. 9 следует, что с увеличением общего объема производства энергопотребление также увеличивается. С другой стороны, УПЭ снижается за счет оптимального использования горнодобывающего оборудования на предприятии. Модель может быть использована для прогнозирования УПЭ предприятия при различных показателях перемещения материалов. Схема моделирования была разработана Топно и др. [15] для оценки энергоэффективности электрического экскаватора, работающего на том же разрезе. Полученные данные по УПЭ составили 0,12 кВт-ч/м³.

Для другой модели предприятия использована линейная модель регрессии, основанная на фактических накопленных данных удельного расхода электроэнергии и общего объема производства предприятия с различными топографическими, техническими и энергетическими параметрами прошлых лет, приведенными в табл. 4:

$$\text{УПЭ}_a = -6 \times 10^{-8}Q_t + 1,8995. \quad (11)$$

На рис. 10 показана линейная модель с различными коэффициентом x и константой. Константа и коэффициент x варьируются по предприятиям в зависимости от топографии, используемого на предприятии оборудования и энергетических характеристик.

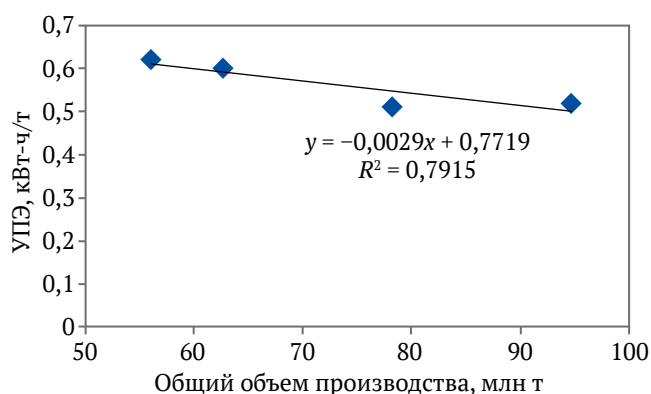


Рис. 8. Отклонение УПЭ в зависимости от объема производства

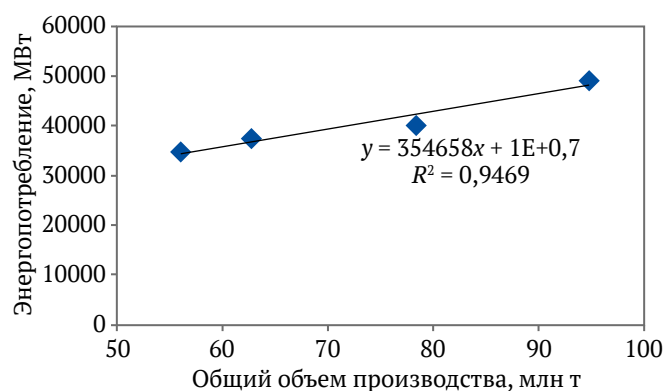


Рис. 9. Изменение потребления электроэнергии

Таблица 4

Оборудование и энергетические характеристики предприятия D

Наименование оборудования	Технологический процесс	Мощность	Потребляемая энергия	Энергопотребление, млн ед./ тыс. л/год*
Электрический экскаватор	Выемка	2,4 / 5 / 10 м ³	Электричество 3,3 кВ и 6,6 кВ	16,5 млн ед.
Электрические буровые установки	Бурение	160 мм		
Установка для перегрузки угля и бункеры	Дробление и сортировка угля	–		
Насосы	Откачка рудничной воды	732 л/с	Электричество 3,3 кВ / 415 В	
Гидравлические экскаваторы Автопогрузчик	Выемка	3,5 м ³ (общ.)	Дизельное топливо	1557,6
Гидравлические буровые установки	Бурение	160 мм	Дизельное топливо	871,6
Самосвалы со средней грузоподъемностью Scania	Транспортировка	60, 50, 35 т	Дизельное топливо	3106,6
Бульдозеры	Транспортировка	320/BD155 410/BD355	Дизельное топливо	978,1

*млн ед. = киловатт-часов в случае энергопотребления; тыс. л/год – расход дизельного топлива.



Удельное энергопотребление в представленных моделях (уравнения (10), (11)) показывает его изменение при различном общем объеме производства для двух разрезов с различной производственной мощностью, характеристиками оборудования, а также профилями энергопотребления. Характеристики оборудования и энергопотребления влияют на энергоэффективность предприятия.

4.2. Сезонный анализ УПЭ

На рис. 11 представлен временной ряд месячных значений показателей УПЭ. Анализ показывает, что удельное потребление электроэнергии в июле–октябре выше, чем в ноябре–июне. В эти месяцы удельный объем производства ниже, что связано с влиянием муссонов на горные работы и низкой загрузкой электрических экскаваторов, буровых установок и т.д. Кроме того, УПЭ выше из-за повышенной нагрузки на насосы, используемые для водоотведения. На графике (рис. 12) видно, что среднемесячное минимальное значение УПЭ в засушливый сезон и в сезон дождей изменяется от 0,43 до 0,52 кВт-ч/т. Сезонный анализ УПЭ позволяет руководству предприятия подготовить план на период муссонов по снижению энергопотребления путем оптимизации графика работы насосов и машин.

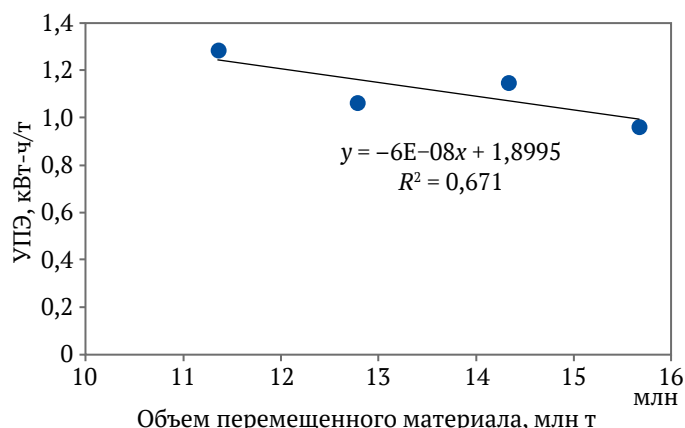


Рис. 10. Линейная модель с различными коэффициентами x и константой

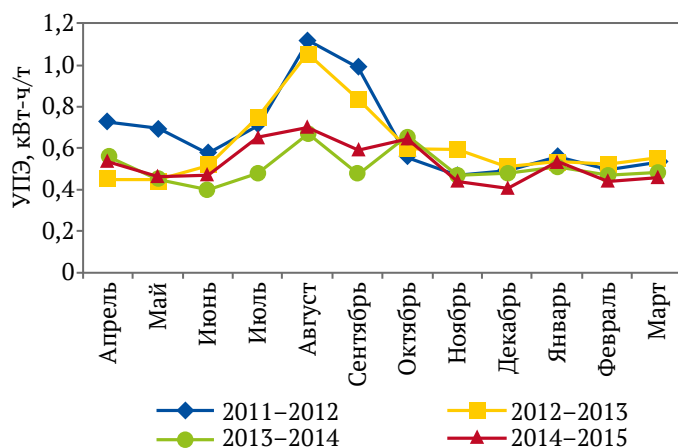


Рис. 11. Сезонный анализ УПЭ

4.3. Сопоставительный анализ подобных угольных предприятий

Результаты, полученные Исследовательским центром Нагпура Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива⁷ путем сравнения различных угольных разрезов для различных проектов энергоэффективности, представлены в табл. 3 и на рис. 13.

Накопленное УПЭ подобных разрезов варьируется от 0,52 до 1,15 кВт-ч/т, минимум 0,52 кВт-ч/т, поскольку на крупных предприятиях (с производственной мощностью более 30 млн т) используются высокопроизводительные электрические экскаваторы, которые являются основным энергопотребителем (36 %). На небольших предприятиях, добывающих от 1,3 до 2,6 млн т угля, УПЭ колеблется в пределах от 1,15 до 2,72 кВт-ч/т.

4.4. Энергосберегающий потенциал

Сравнивая прогрессивный контрольный показатель УПЭ_{п,к} и среднегодовой показатель УПЭ_{а,ср}, можно оценить потенциал энергосбережения для угольного предприятия. Расчет выполняется с использованием уравнения, приведенного ниже:

⁷ CIMFR studies and technical communications on energy efficiency and benchmarking in Opencast mines. 2015.

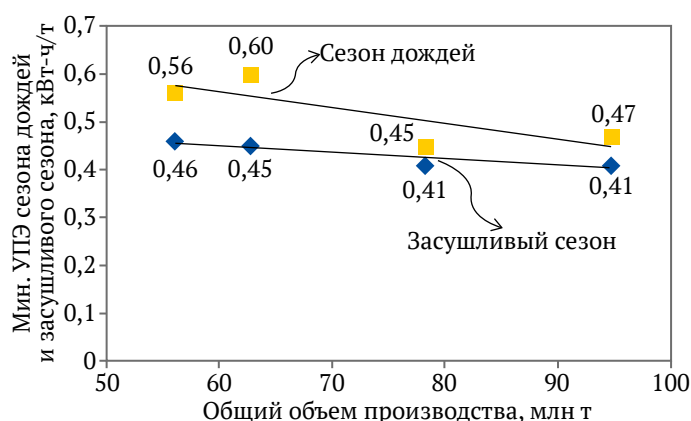


Рис. 12. Ежемесячный показатель УПЭ для засушливого сезона и сезона дождей

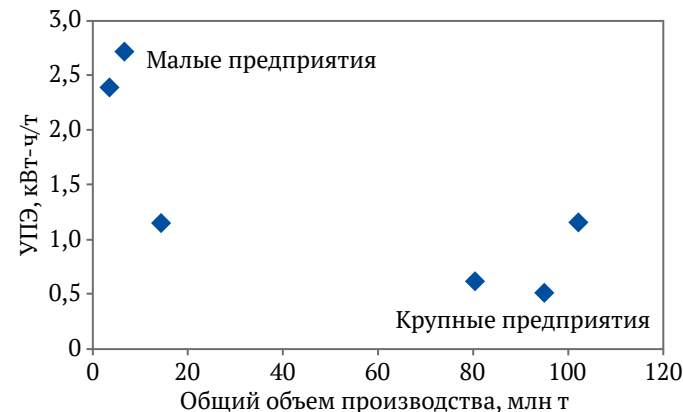


Рис. 13. Результаты, полученные путем сравнения различных угольных разрезов



$$E_c = \text{УПЭ}_{a, \text{cp}} = \frac{(\text{УПЭ}_{a, \text{cp}} - \text{УПЭ}_{p, \kappa}) \cdot 100}{\text{УПЭ}_{a, \text{cp}}}, \quad (12)$$

где $\text{УПЭ}_{a, \text{cp}}$ – среднегодовое прогрессивное УПЭ,

$$\text{УПЭ}_{a, \text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^4 \text{УПЭ}_j}{4}. \quad (13)$$

Согласно уравнению (12) энергосберегающий потенциал предприятия составляет 10,7 %, при этом он может варьироваться по каждому прогрессивному году на основании анализа данных четырех лет и фактических условий эксплуатации предприятия.

Заключение

Сопоставительный анализ энергопотребления является эффективным инструментом оценки и сравнения энергоэффективности предприятий. Карьеры, обрабатывающие уголь (и прочие полезные ископаемые), являются промышленными бенефициарами сопоставительного анализа. Как внутренний сопоставительный анализ, так и перекрестный сопоставительный анализ могут использоваться руководством предприятия для определения ключевых областей, требующих повышения эффективности. Они также способствуют снижению энергопотребления и установлению целевых показателей для горнодобывающего сектора, а также энергопотребления в отрасли. В данной исследовательской работе был выполнен со-

поставительный анализ использования электроэнергии на крупном разрезе в Индии, при этом прогрессивный контрольный показатель УПЭ оценивается равным 0,50 кВт-ч/т.

Новый метод сравнения и моделирования с использованием эксплуатационных данных прошлых периодов по каждому процессу, а также накопленных данных по общему объему производства и энергопотребления был применен к различным угольным разрезам как малого, так и крупного размера. Для получения текущих данных по конкретным предприятиям использовались методы линейной регрессии. В частности, для прогнозирования контрольного УПЭ были выбраны угольные предприятия индийской горнодобывающей отрасли. Контрольные показатели, полученные методом внутреннего сопоставительного анализа, могут быть использованы для оценки энергоэффективности конкретного предприятия, а УПЭ, полученное с помощью перекрестного сопоставительного анализа, может быть применено для оценки наиболее эффективных предприятий, использующих передовые методы. Также была выполнена оценка потенциала энергосбережения предприятия.

В целом можно сделать вывод о том, что оценка энергоэффективности конкретного предприятия или группы предприятий может быть выполнена с использованием предложенных в данной работе моделей сопоставительного анализа для горнодобывающего сектора и применена для оценки и реализации потенциала энергосбережения.

Список литературы / References

1. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy efficiency of opencast mining in India. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Energy Research (ICAER-2013)*. 10–12 December 2013, Mumbai, India. Pp. 1684–1692.
2. Shuzhao C., Qingxian C., Cangyan X., Wang H. Energy consumption comparison and energy-saving measures of open pit development. In: *Proceedings of International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*. 19–20 February 2011, Changsha, China. Pp. 712–715. <https://doi.org/10.1109/CDCIEM.2011.64>
3. Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *Journal of Cleaner Production*. 2008;16(6):709–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.024>
4. Cooke D., Randall C. Energy use benchmarks for open cut coal mines. In: *Proceedings of The AusIMM annual conference*. 23–26 March 1995, Newcastle, Australia. URL: https://old.decoa.com.au/HTMLObj-480/Energy_Use_Benchmarks_Coal_Mines.pdf
5. Sardeshpande V., Gaitonde U.N., Banerjee R. Model-based energy benchmarking for glass furnace. *Energy Conversion and Management*. 2007;48(10):2718–2738. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.013>
6. Beerkens R.G.C., Limpt J.V. Chapter 7. Energy efficiency benchmarking of glass furnaces. In: Kieffer J. (ed.) *62nd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 23*. The American Ceramics Society; 2008. Pp. 93–105. <https://doi.org/10.1002/9780470294727.ch7>
7. Tan Y.S., Tjandra T.B., Song B. Energy efficiency benchmarking methodology for mass and high-mix low-volume productions. *Procedia CIRP*. 2015;29:120–125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.200>
8. Juaidi A., AlFaris F., Montoya F.G., Agugliaro F.M. Energy benchmarking for shopping centres in the Gulf Coast region. *Energy Policy*. 2016;91: 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.012>
9. Wang N., Wena Z., Liu M., Guo J. Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy*. 2016;169:301–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.030>
10. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy consumption of dump trucks in mines. *Applied Energy*. 2014;113:1382–1396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.058>
11. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy consumption of truck haulage. In: Awuah-Offei K. (eds.) *Energy Efficiency in the Minerals Industry. Green Energy and Technology*. Springer, Cham; 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54199-0_9



12. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Water and energy assessment for dewatering in opencast mines. *Journal of Cleaner Production*. 2014;84:736–745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.072>
13. Chan D.Y.L., Huang C.F., Lin W.C., Hong G.B. Energy efficiency benchmarking of energy-intensive industries in Taiwan. *Energy Conversion and Management*. 2014;77:216–220. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.027>
14. Topno S.A., Sahoo L.K., Umre B.S., Jhungare A.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. In: *Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2017)*. 2–6 July 2017, San Diego, California, USA.
15. Topno S.A., Sahoo L.K., Umre B.S. Energy efficiency assessment of electric shovel operating in opencast mine. *Energy*. 2021;230:120703. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120703>

Информация об авторах

Сима Ашишан Топно – главный исследователь, Центральный институт горного дела и топливных исследований CSIR, Нагпурский исследовательский центр, г. Нагпур, Индия; Национальный технологический институт Висвесварая, факультет электротехники, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0003-2941-3047](https://orcid.org/0000-0003-2941-3047), Scopus ID [57202512585](https://scopus.com/authorid/57202512585); e-mail seematopno@rediffmail.com

Бхимрао Ситарам Умре – доктор наук (электротехника), профессор кафедры электротехники, Национальный технологический институт Висвесварая, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0002-9879-2928](https://orcid.org/0000-0002-9879-2928), Scopus ID [24483922300](https://scopus.com/authorid/24483922300); e-mail bsumre@rediffmail.com

Мохан Виталрао Авар – доктор наук (электротехника), профессор кафедры электротехники, Национальный технологический институт Висвесварая, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0003-3806-7908](https://orcid.org/0000-0003-3806-7908), Scopus ID [6602631834](https://scopus.com/authorid/6602631834); e-mail mvaware@eee.vnit.ac.in

Лалит Кумар Саху – главный исследователь, Центральный институт исследований горного дела и топлива, Нагпурский исследовательский центр, Нагпур, Индия; ORCID [0000-0001-8924-6741](https://orcid.org/0000-0001-8924-6741), Scopus ID [55901599900](https://scopus.com/authorid/55901599900); e-mail lalitsahoo@yahoo.co.in

Information about the authors

Seema Ashishan Topno – Principal Investigator, CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India; Visvesvaraya National Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Nagpur, India; ORCID [0000-0003-2941-3047](https://orcid.org/0000-0003-2941-3047), Scopus ID [57202512585](https://scopus.com/authorid/57202512585); e-mail seematopno@rediffmail.com

Bhimrao Sitaram Umre – Ph. D. (Electrical Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India; ORCID [0000-0002-9879-2928](https://orcid.org/0000-0002-9879-2928), Scopus ID [24483922300](https://scopus.com/authorid/24483922300); e-mail bsumre@rediffmail.com

Mohan Vithalrao Aware – Ph. D. (Electrical Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India; ORCID [0000-0003-3806-7908](https://orcid.org/0000-0003-3806-7908), Scopus ID [6602631834](https://scopus.com/authorid/6602631834); e-mail mvaware@eee.vnit.ac.in

Lalit Kumar Sahoo – Principal Investigator, CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India; ORCID [0000-0001-8924-6741](https://orcid.org/0000-0001-8924-6741), Scopus ID [55901599900](https://scopus.com/authorid/55901599900); e-mail lalitsahoo@yahoo.co.in

Поступила в редакцию 23.03.2023
Поступила после рецензирования 17.07.2023
Принята к публикации 15.08.2023

Received 23.03.2023
Revised 17.07.2023
Accepted 15.08.2023