

# Сравнительный анализ характеристик разных типов технических средств для реализации когенерационных технологий в угледобывающем производстве

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-1-21-25>

Рассмотрена процедура выбора и обоснования технических средств когенерационных технологий, реализующих процесс совместной выработки электрической и тепловой энергии на базе газопоршневых модульных установок. Предложен метод многокритериальной оптимизации, суть которого заключается в построении единого обобщающего безразмерного интегрального критерия, по количественной величине которого производится ранжирование всех принятых к учету альтернатив технических средств.

**Ключевые слова:** стирлинг-технологии, шахтный метан, когенерация, модульные газопоршневые установки, интегральная оценка, многокритериальная оптимизация.

**Для цитирования:** Сравнительный анализ характеристик разных типов технических средств для реализации когенерационных технологий в угледобывающем производстве / В.В. Агафонов, А.С. Оганесян, А.Е. Ютяев и др. // Уголь. 2021. № 1. С. 21-25. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-1-21-25.

## ВВЕДЕНИЕ

На технические средства, используемые для обслуживания когенерационных технологий шахтного газа метана, напрямую оказывают влияние такие конструктивные характеристики и основные параметры, как степень сжатия, агрегатная мощность, среднее эффективное давление и, как следствие, наработка на отказ. В связи с этим необходимо провести исследования по сравнительному анализу характеристик разных типов технических средств и разработать практический механизм и рекомендации по выбору оптимальной и наиболее подходящей энергоустановки для реальных условий эксплуатации.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Проведенный анализ исследований, посвященных выбору технических средств, обслуживающих когенерационные технологии, показал, что наиболее эффективны-



### АГАФОНОВ В.В.

Доктор техн. наук, профессор кафедры «Геотехнологии освоения недр» Горного института НИТУ «МИСЦ», 119049, г. Москва, Россия, e-mail: msmu-prpt@yandex.ru



### ОГАНЕСЯН А.С.

Доктор техн. наук, профессор кафедры «Автоматизированного проектирования и дизайна» Института информационных технологий и компьютерных наук НИТУ «МИСЦ», 119049, г. Москва, Россия, e-mail: oganesyan.as@misis.ru



### ЮТЯЕВ А.Е.

Начальник отдела управления проектами АО «СУЭК», 115054, г. Москва, Россия, e-mail: lutiaevAE@suek.ru



### ГОРН Е.В.

Главный специалист отдела стратегического и текущего планирования АО «СУЭК», 115054, г. Москва, Россия, e-mail: GornEV@suek.ru

ми и оптимальными с точки зрения их обслуживания являются электростанции с использованием газопоршневых двигателей Стирлинга (внутреннего сгорания) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В основу этих суждений положены такие составляющие, как самый высокий КПД при производстве тепловой и электрической энергии, самый низкий уровень экологически вредных выбросов в окружающую среду, высокие эксплуатационные характеристики с высокой степенью надежности и большая наработка на отказ. Исследования показали, что наиболее приемлемыми для горного производства являются газопоршневые двигатели в диапазоне мощности от 1 до 4 МВт в зависимости от объемов потребляемой тепловой и электрической энергии, что в свою очередь предопределяется объемами производства основной продукции.

В настоящее время мировая ниша производства газопоршневых двигателей Стирлинга в диапазоне 1-4 МВт представлена такими ведущими корпорациями, как: Waukesha Engine Division (США), GE Jenbacher AG (Австрия), Cummins (США), Caterpillar (США), Rolls-Royce (Великобритания), Deutz – MWM (Германия), MTU Friedrichshafen (Германия), Mitsubishi (Япония), Pielstick S.E.M.T. (Франция).

Российский угледобывающий рынок в этом сегменте мощностей представлен следующими преобладающими производителями: Waukesha Engine Dresser, Caterpillar, GE Jenbacher AG и Cummins. Сравнение отечественных и зарубежных газопоршневых установок с учетом их практического использования обозначило явный приоритет последних.

Для выбора конкретной газопоршневой установки использовался метод многокритериальной оптимизации, суть которого заключается в построении единого обобщающего безразмерного интегрального критерия, по количественной величине производится ранжирование всех принятых к учету альтернатив [7, 8].

Учитывая основной вид топлива газопоршневой электростанции – шахтный метан, график ее работы и характер электрических нагрузок потребителей в работе, рассматривается **следующая категория газовой смеси:** ( $Q_{\text{нр}} = 16,41 \text{ МДж/м}^3$ ,  $r = 1,11 \text{ кг/нм}^3$ ). Алгоритм выполнения необходимых расчетов при этом включал регламентированные плановые остановки технологического оборудования, которые были включены во временной период работы с минимальными электрическими нагрузками 7000 ч/год.

Оценочная матрица включает следующие технические, экономические и эксплуатационные характеристики [9, 10]:

- значение электрического КПД генератора ( $\text{КПД}_{\text{эл}}$ ), % – основополагающий параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует отличительные конструктивные технические и термодинамические особенности газопоршневой установки;

- значение метанового числа (метановый индекс) (безразмерная величина) – параметр, стремящийся к оптимуму-минимуму, характеризует возможность эксплуатационной работы газопоршневой установки без тенденции снижения электрической мощности обеспечивать безостановочную работу на различных концентрациях газа метана;

- значение экологического показателя по концентрации  $\text{NO}_x$ , (оксид азота),  $\text{мг/нм}^3$  (при 5%  $\text{O}_2$ ) – параметр, стремящийся к оптимуму-минимуму, характеризует уровень негативного воздействия работы газопоршневой установки на окружающую экологическую среду;

- значение удельной массы газопоршневой установки (отношение сухой массы/ $N_{\text{эл}}$ ),  $\text{кг/кВт}$  – параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень технического совершенства энергетической установки с учетом габаритов и материалоемкости с учетом одинакового количества рабочих оборотов;

- значения ресурсных показателей (общая продолжительность работы газопоршневой установки до отказа и капитального ремонта с учетом полного заявленного ресурса), ч – параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень технического совершенства технологической конструкции газопоршневой установки и минимальный уровень эксплуатационных издержек в течение ее работы с учетом одинакового количества оборотов;

- значение диапазона, в пределах которого возможно регулирование мощности (отношение, в числителе которого заявляется минимальная электрическая мощность, которая обеспечивает устойчивую работу газопоршневой установки в течение заданного промежутка времени, – в знаменателе представлена номинальная мощность энергоустановки), % – параметр, стремящийся к оптимуму-минимуму, характеризует уровень возможности обеспечения устойчивой работы установки в области номограмм электрических нагрузок, где ярко выражены максимумы и минимумы энергопотребления;

- значение скорости нагружения и разгружения энергоустановки (отношение, в числителе которого заявлена разрешенная заводом-изготовителем величина шага набора/сброса электрической мощности, – в знаменателе представлена номинальная мощность энергоустановки), % – параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует уровень возможности обеспечивающей устойчивую работу газопоршневой установки с учетом возникновения и проявления резкопеременных электрических нагрузок, которые формируются во время пуска приводов технических устройств и механизмов, оснащенных рядом мощных асинхронных электродвигателей);

- значение средневзвешенной стоимости регламентного технического обслуживания газопоршневой установки с учетом стоимости расходных комплектующих и запасных частей в интервале временного периода, предшествовавшего первому капитальному ремонту,  $\text{руб./кВт}\cdot\text{ч}$  – параметр, имеющий оптимум-минимум, в его основу заложен уровень минимальных эксплуатационных издержек (затраты на смазочное масло (удельный суммарный годовой расход, соотнесенный с 1  $\text{кВт}\cdot\text{ч}$  электроэнергии, которая выработана за этот же период,  $\text{л/кВт}\cdot\text{ч}$ ). Показатель показывает уровень конструктивного технического совершенства двигателя газопоршневой установки в сфере потребления дорогого синтетического масла.

В свою очередь оценочная матрица была дополнена следующими экономическими критериями согласно рекомендациям комитета по промышленному развитию ООН ЮНИДО:

- значение внутренней нормы рентабельности проекта, % – параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму. Характеризует доходность инвестиционного проекта;
- значение чистого дисконтированного дохода, млн руб., — параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму. Характеризует доходность инвестиционного проекта за весь период оптимизации;
- значение индекса прибыльности (безразмерная величина), – параметр, стремящийся к оптимуму-максимуму, характеризует относительную величину доходности инвестиционного проекта, характеризует величину суммы прибыли в пересчете на единицу вложенных средств. При реализации инвестиционного проекта величина данного параметра должна быть более единицы.

Сравнение всех альтернативных газопоршневых установок производится с условным гипотетическим эталоном, сформированным из всех лучших параметров, независимо от того, какой энергоустановке они принадлежат. Так как он служит отправной точкой оценки, то в системе координат значение интегрального показателя эталона будет равно нулю. Естественно, чем ближе к эталону будет располагаться объект оценки, тем более преобладающим становится его место в общей оценке. Исходя из этого оптимум интегрального показателя будет стремиться к минимуму.

В целях обеспечения сопоставимости исходных показателей-критериев, имеющих разную размерность, используются их относительные отклонения, не имеющие размерности. Таким образом, сопоставимые относительные отклонения с помощью функции свертки сворачиваются в единый безразмерный интегральный функционал, по количественной величине которого происходит ранжирование всех газопоршневых установок по степени их предпочтения. Так как есть более весомые, менее весомые параметры, для устранения этого недостатка в исходную формулу целевой функции свертки интегрального функционала вводятся весовые коэффициенты значимости каждого из предложенных параметров оценки, которые были определены экспертным путем с помощью итеративной процедуры экспертного процесса типа «ДЕЛФИ».

Результаты проведенных исследований говорят о том, что при работе с таким первоисточником энергии, как шахтный газ метан, лучший интегральный эффект присущ среднеоборотным газопоршневым установкам (частота вращения – 1000 об./мин). Хотя у других типов энергоустановок есть более преобладающие показатели (например, тепловая экономичность), но ряд других, более весомых показателей-индикаторов, например индикатор эксплуатационного ресурса (у MWM и VHP9500GSI – до 500000 ч) и большая наработка до наступления периодов технического обслуживания, показывает их больший приоритет использования.

Рассмотрение ряда газопоршневых установок, которым присуща частота вращения вала в 1000 об./мин, показало, что оптимальные значения интегральных функ-

ционалов при работе на шахтном газе метане присущи энергоустановкам типа MWV концерна Caterpillar, Waukesha серий ATGL и VHP. Выявлено, что их близость к лучшим образцам обусловлена возможностью работать в условиях переменных нагрузок и сравнительно невысокой стоимостью.

Следует отметить, что при использовании шахтного газа метана в качестве первоисточника энергии для газопоршневых установок резко улучшается такая составляющая производства, как экологичность, что в соответствии с условиями Киотского протокола позволяет получить дополнительную экономическую выгоду.

Данные выводы подтверждаются и дополнительным финансово-экономическим анализом, проведенным с использованием прогнозных цен в среде «Альт-Инвест». Период оптимизации (горизонт расчета) ассоциировался с максимальным сроком службы газопоршневых установок (400000 ч) с учетом реновации оборудования.

По результатам экономического ранжирования наилучшими являются мощные газопоршневые установки MWM, Waukesha и Jenbacher J620GS.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенной интегральной оценки всех принятых к учету альтернативных вариантов газопоршневых установок показали, что **наиболее предпочтительным и оптимальным вариантом являются среднеоборотные MWM, входящие в концерн Caterpillar, затем следуют компании Waukesha серий ATGL и VHP.**

Синергический эффект этих энергоустановок обеспечивают следующие основные преимущества:

- соответствующая степень надежности эксплуатации ГПУ, связанной с большим объемом камеры сгорания;
- обеспечение щадящего режима работы при низком среднеэффективном давлении;
- снижение уровня эксплуатационных затрат за счет увеличенных временных интервалов технического обслуживания (замена масла через 3000-4000 ч);
- высокий эксплуатационный ресурс газопоршневых энергоустановок – 72000 ч до первого капитального ремонта, обозначенный заводом-изготовителем – до 360000-400000 ч.

С учетом вышеизложенного, в современных реалиях научно-технического прогресса лучшими газопоршневыми установками для утилизации шахтного газа метана, исходя из технических параметров, уровня надежности и привлекательности соотношения цена/качество, являются немецкие MWM, входящие в концерн Caterpillar.

## Список литературы

1. Мишина Е.А., Яворовский Ю.В., Куличихин В.В. Анализ характеристик газопоршневых установок, представленных на российском рынке // Надежность и безопасность энергетики. 2012. № 2(17). С. 55-58. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17795626> (дата обращения: 15.12.2020).
2. Крупин Д.Ф., Суворов Д.М. сравнительная оценка микрогазотурбинных и газопоршневых установок при работе в составе локальных систем энергоснабжения // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-

технической конференции студентов, аспирантов, ученых. 2013. Т. 1. № 1. С. 186-189. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21094225> (дата обращения: 15.12.2020).

3. Байрамгулова Л.З. Сравнение газопоршневых установок различных мощностей и производителей // Научному прогрессу – творчество молодых. 2017. № 2. С. 108-110. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30675522> (дата обращения: 15.12.2020).

4. Прутчиков И.О., Камлюк В.В., Маккавеев А.В. Расчет параметров автономного теплоэлектрогенератора на базе термоэлектрических модулей при работе в составе системы гарантированного энергоснабжения // Морской вестник. 2014. № 4. С. 51-54. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22629899> (дата обращения: 15.12.2020).

5. Султанов Р.Ф., Сенюшкин Н.С. Влияние основных параметров цикла на показатели эффективности перспективных газотурбинных установок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8. С. 41-44. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22513212> (дата обращения: 15.12.2020).

6. Першин С.А. Оптимизация параметров когенерационной установки // Новый университет. Серия: Технические науки. 2014. № 5-6. С. 82-95. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21961972> (дата обращения: 15.12.2020).

7. Курочкин Д.С., Михеев Д.В. Методический подход к выбору газопоршневых энергоустановок по кри-

терию минимальной совокупной стоимости владения для различных условий эксплуатации // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Серия: Социально-экономические науки. 2014. № 4. С. 4-10. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22011449> (дата обращения: 15.12.2020).

8. Щинников П.А., Томилов В.Г., Синельников Д.С. Методика оценки технико-экономической эффективности когенерационных установок на базе ДВС с воздушным охлаждением // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. 2. С. 134-142. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24157349> (дата обращения: 15.12.2020).

9. Малая Э.М., Николаева Е.И. Создание оптимальных проектных решений при использовании комбинированной генерации различных видов энергии // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 4. С. 222-226. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38196094> (дата обращения: 15.12.2020).

10. Дикарев П.В., Макаров А.М. Расчет эффективности когенерационной электромеханической системы с адаптивной системой управления // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2019. № 2. С. 31-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38018461> (дата обращения: 15.12.2020).

Original Paper

UDC 622.013.3:622.684 © V.V. Agafonov, A.S. Oganessian, A.E. Lutiaev, E.V. Gorn, 2021  
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2021, № 1, pp. 21-25  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2021-1-21-25>

**Title**  
**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF TECHNICAL MEANS FOR THE IMPLEMENTATION OF CO-GENERATION TECHNOLOGIES IN COAL MINING**

#### Authors

Agafonov V.V.<sup>1</sup>, Oganessian A.S.<sup>1</sup>, Lutiaev A.E.<sup>2</sup>, Gorn E.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

<sup>2</sup>SUEK" JSC, Moscow, 115054, Russian Federation

#### Authors' Information

**Agafonov V.V.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor of "Geotechnologies of mineral development" department of the Mining Institute, e-mail: [msmu-prpm@yandex.ru](mailto:msmu-prpm@yandex.ru)

**Oganessian A.S.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Computer-aided design and design department of Institute of information technology and computer science, e-mail: [oganesyan.as@misis.ru](mailto:oganesyan.as@misis.ru)

**Lutiaev A.E.**, Chief of projects control department, e-mail: [lutiaevAE@suek.ru](mailto:lutiaevAE@suek.ru)

**Gorn E.V.**, Chief specialist of strategic and current planning department, e-mail: [GornEV@suek.ru](mailto:GornEV@suek.ru)

#### Abstract

The paper reviews the procedure for selecting and justifying the technical means of co-generation technologies that enable combined production of electrical and thermal energy using modular gas fueled reciprocating-engine plants. The method of multi-criteria optimization is proposed that basically produces a unified generalizing dimensionless integral criterion, the quantitative value of which is used to rank all the reviewed technical alternatives.

#### Keywords

Stirling-cycle technologies, Coalmine methane, Co-generation, Modular gas fueled reciprocating-engine plants, Integral estimation, Multi-criteria optimization.

#### References

- Mishina E.A., Yavorovsky Yu.V. & Kulichikhin V.V. Analysis of characteristics of the gas fueled reciprocating-engine plants available in the Russian market. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2012, (2), pp. 55-58. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17795626> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
- Krupin D.F. & Suvorov D.M. Comparative assessment of micro-gas-turbine and gas fueled reciprocating-engine units when operated as a part of local power supply systems. *Energy and Resource Saving in Heat Power Engineering and Social Sphere*. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Postgraduate Students and Scientists. 2013, Vol. 1, (1), pp. 186-189. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21094225> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
- Bairamgulova L.Z. Comparison of gas fueled reciprocating-engine units of various capacities and produced by different manufacturers. *Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodyh*, 2017, (2), pp. 108-110. Available at:

MINING EQUIPMENT

- <https://elibrary.ru/item.asp?id=30675522> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
4. Prutchikov I.O., Kamlyuk V.V. & Makkaveyev A.V. Parameter calculation of an autonomous thermoelectric generator built on thermoelectric modules when operated as a part of uninterruptible power system. *Morskoy vestnik*, 2014, (4), pp. 51-54. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22629899> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  5. Sultanov R.F. & Senyushkin N.S. Effect of the key cycle parameters on the efficiency indicators of advanced gas-turbine plants. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2014, (8), pp. 41-44. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22513212> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  6. Pershin S.A. Optimization of co-generation plant parameters. *Novyi universitet. Seria: Tehničeskie nauki*, 2014, (5-6), pp. 82-95. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21961972> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  7. Kurochkin D.S. & Mikheyev D.V. Methodological approach to selection of gas fueled reciprocating-engine plants based on the minimum total cost of ownership for different operating conditions. *Vestnik Iuzhno-Rossiyskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, Seria: Social'no-ekonomicheskie nauki*, 2014, (4), pp. 4-10. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22011449> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  8. Shinnikov P.A., Tomilov V.G. & Sinelnikov D.S. Assessment methodology of technical and economic efficiency of co-generation plants based on air-cooled internal combustion engines. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2015, (2), pp. 134-142. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=24157349> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  9. Malaya E.M. & Nikolaeva E.I. Development of optimal design solutions for using combined generation of different types of energy. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*, 2019, (4), pp. 222-226. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38196094> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).
  10. Dikarev P.V. & Makarov A.M. Efficiency calculation of co-generation electromechanical system with adaptive control. *Energo- i resursosberazhenie: promyshlennost' i transport*, 2019, (2), pp. 31-36. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38018461> (accessed 15.12.2020). (In Russ.).

**For citation**

Agafonov V.V., Oganesyana A.S., Iutiaev A.E. & Gorn E.V. Comparative analysis of the characteristics of different types of technical means for the implementation of co-generation technologies in coal mining. *Ugol*, 2021, (1), pp.21-25. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-1-21-25.

**Paper info**

Received October 12, 2020  
 Reviewed November 14, 2020  
 Accepted December 11, 2020