

УДК 621.1

**Вячеслав Викторович Бухмиров**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

**Анатолий Константинович Соколов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Россия, Иваново, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

**Сергей Николаевич Ярунин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: yarunin-sn@yandex.ru

**Наталья Николаевна Ярунина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий, Россия, Иваново, e-mail: yarunina.ispu@yandex.ru

**Николай Николаевич Смирнов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: nsmirnov@bk.ru

## Повышение эффективности использования твердого топлива на промышленных ТЭЦ

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В настоящее время в нашей стране твердое топливо на промышленных ТЭЦ, как правило, сжигается слоевым или факельным способом в котлах с выработкой пара, который направляется в паровую турбину. Данная технология выработки тепловой и электрической энергий характеризуется относительно низким КПД и значительными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу. Вместе с тем использование твердого топлива в промышленной энергетике с его предварительной газификацией позволяет значительно повысить КПД выработки электроэнергии и одновременно уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

**Материалы и методы.** В качестве материала исследования использованы результаты аналитического сравнения двух схем использования твердого топлива в промышленной энергетике: традиционной и альтернативной, основанной на его предварительной газификации. Для оценки эффективности рассматриваемых схем применена научная методология системного анализа, позволяющая рассмотреть любой энергетический объект как единую систему, состоящую из взаимосвязанных элементов. Системный анализ выполнен на основе математического моделирования технологического процесса получения тепловой и электрической энергии.

**Результаты.** Разработана комплексная балансовая математическая модель промышленной ТЭЦ с предварительной газификацией угля. Произведены расчеты с использованием математической модели, которые показали, что строительство промышленных парогазовых ТЭЦ с предварительной газификацией угля вместо традиционных паротурбинных позволит увеличить основной показатель энергетической эффективности ТЭЦ – коэффициент использования топлива – с 60 до 74 %. На основе методологии системного анализа разработана оптимальная тепловая схема промышленной парогазовой ТЭЦ с предварительной газификацией угля. С помощью математической модели определены численные значения основных рабочих параметров ТЭЦ и показателей энергетической эффективности.

**Выводы.** Использование твердого топлива на промышленных ТЭЦ с его предварительной газификацией является весьма перспективным направлением развития промышленной энергетике в России, в силу того что данный способ извлечения связанной химической энергии твердого топлива позволяет значительно увеличить коэффициент использования топлива и производство электрической энергии и одновременно снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

**Ключевые слова:** твердое топливо, газификация угля, генераторный газ, промышленная ТЭЦ, когенерационная парогазовая установка, показатели энергетической эффективности, коэффициент использования топлива

**Vyacheslav Viktorovich Buhmirov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

**Anatoly Konstantinovich Sokolov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Life Safety Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

### Sergey Nikolaevich Yarunin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: yarunin-sn@yandex.ru

### Natalia Nikolaevna Yarunina

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies Department, Russia, Ivanovo, e-mail: yarunina.ispu@yandex.ru

### Nikolay Nikolaevich Smirnov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nsmirnov@bk.ru

## Improvement of efficiency of solid fuel use at industrial thermal power plants

### Abstract

**Background.** Currently, in this country solid fuel at industrial thermal power plants, as a rule, is burned by a layer or flaring method in boilers with generation of steam which is directed to a steam turbine. This technology of generating thermal and electrical energy is characterized by relatively low efficiency and significant emissions of pollutants into the atmosphere. At the same time, the use of solid fuel in industrial energy with its preliminary gasification can significantly increase the efficiency of electricity generation and at the same time reduce the negative impact on the environment.

**Materials and methods.** The results of an analytical comparison of two schemes to use solid fuel in industrial energy are used as the material of the research. These two schemes are a traditional scheme and an alternative one based on its preliminary gasification. In this paper, to assess the effectiveness of the schemes under consideration, the scientific methodology of system analysis is applied. It allows us to consider any energy object as a unified system consisting of interrelated elements. The system analysis is carried out based on mathematical modeling of the technological process to obtain thermal and electrical energy.

**Results.** A complex balance mathematical model of an industrial thermal power plant with preliminary coal gasification is developed. The results of calculation using a mathematical model have shown that the construction of industrial combined-cycle thermal power plants with preliminary coal gasification instead of traditional steam turbine ones will increase the key indicator of the energy efficiency of thermal power plants, coefficient of fuel utilization from 60 to 74 %. Based on the methodology of system analysis, an optimal thermal scheme of an industrial combined-cycle thermal power plant with preliminary coal gasification has been developed. Numerical values of the basic operating conditions of the thermal power plants and energy efficiency indicators have been determined using a mathematical model.

**Conclusions.** The use of solid fuel at industrial thermal power plants with its preliminary gasification is a very promising direction to develop industrial energy in Russia since this method to extract the bound chemical energy of solid fuel can significantly increase the fuel utilization coefficient and the production of electrical energy and at the same time reduce emissions of contamination material into the atmosphere.

**Key words:** solid fuel, coal gasification, generator gas, industrial thermal power plant, combined-cycle cogeneration plant, energy efficiency indicators, coefficient of fuel utilization

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.012-018

**Введение.** В ряде регионов России для выработки тепловой и электрической энергии на промышленных ТЭЦ широко применяется твердое топливо – каменный уголь, антрацит, бурый уголь, торф и биомасса.

Применение твердого топлива оказывает негативное влияние на окружающую среду. Сжигание углей в топках котлов сопровождается значительным выбросом в атмосферу золы и оксидов серы. Образующиеся при работе ТЭЦ обширные золошлакоотвалы занимают большие территории.

С энергетической точки зрения при сжигании твердого топлива в котле имеют место потери тепла с химическим и механическим недожогом, а также с отводимым из топки шлаком. Также происходит загрязнение золой наружных поверхностей топочных экранов и трубных пучков. Все это приводит к тому, что КПД котла на твердом топливе значительно ниже КПД котла на газе.

Таким образом, сжигание твердого топлива по традиционной схеме в паровом котле сопровождается значительными потерями энергии и оказывает негативное влияние на окружающую среду. Для устранения указанных недостатков был предложен альтернативный метод сжигания твердого топлива на промышленных ТЭЦ, который является более эффективным с энергетической и экологической точек зрения. Суть разработанного способа сжигания заключается в том, что в начале твердое топливо проходит термохимическую обработку (газификацию), а затем полученный генераторный газ после очистки используется в газопоршневых или газотурбинных установках. Эти установки могут работать по когенерационным, тригенерационным и парогазовым циклам, что повышает общую энергетическую эффективность предлагаемой альтернативной схемы использования твердого топлива.

Объектом исследования является когенерационная схема применения твердого топлива, основанная на его газификации.

Известно, что термохимическая газификация твердого топлива представляет собой процесс частичного окисления углерода при недостатке окислителя с получением газообразного энергоносителя – генераторного газа [1–3]. В качестве окислителя могут использоваться кислород, воздух, водяной пар или смесь этих веществ. Процесс термохимической газификации твердого топлива протекает в реакторе, который в технической литературе получил название «газификатор» или «газогенератор». Максимальная температура процесса составляет 800–1200 °С.

Полученный генераторный газ состоит из монооксида углерода (CO), водорода (H<sub>2</sub>), углекислого газа (CO<sub>2</sub>), небольшого количества углеводородных соединений (метан, этан и др.), азота (N<sub>2</sub>), паров воды и различных примесей, таких как смолы, частицы углистого вещества и золы [1–3].

При воздушной газификации производится низкокалорийный генераторный газ с теплотой сгорания 3,5–6,5 МДж/нм<sup>3</sup> [1]. Этот газ после очистки можно сжигать в газопоршневых или газотурбинных двигателях, но он не пригоден для транспортировки по трубопроводу из-за низкой энергетической плотности.

Очистка генераторного газа производится в специальных скрубберах, где из газа удаляются частицы золы, смолы и оксиды серы. В результате получают экологически чистое топливо, сжигание которого не приводит к загрязнению окружающей среды [2, 3].

Газификация твердого топлива с использованием в качестве окислителя кислорода или водяного пара позволяет получить среднекалорийный генераторный газ с теплотой сгорания 10–15 МДж/нм<sup>3</sup> [1], который уже пригоден для транспортировки по трубопроводу. Однако процесс получения и использования кислорода связан с определенными трудностями и дополнительными финансовыми затратами.

По способу подачи твердого топлива в газогенератор и по направлению перемещения потоков окислителя внутри него можно классифицировать следующие промышленно освоенные способы газификации:

- а) газификация в плотном неподвижном слое;
- б) газификация в кипящем слое;
- в) газификация в пылевом потоке.

Каждый из вышеперечисленных способов газификации имеет свою область применения, достоинства и недостатки. Для каждого способа были созданы и запущены в эксплуатацию промышленные газогенераторы. Схемы и конструктивные особенности этих газогенераторов подробно описаны в технической литературе [5–10].

**Методы исследования.** В основу исследования положен многолетний опыт работы авторов в области математического моделирования и системного анализа сложных энерготехнологических систем. В связи с этим для решения поставленных задач применена научная методология системного анализа, позволяющая рассмотреть любой энергетический объект как единую систему, состоящую из взаимосвязанных элементов. Методология системного анализа подразумевает комплексную оценку эффективности энергетического объекта как с энергетической, так и с экологической точки зрения.

Была разработана комплексная балансовая математическая модель промышленной ТЭЦ с предварительной газификацией угля, которая учитывает все возможные связи между локальными элементами тепловой схемы ТЭЦ. При помощи оригинальной математической модели появляется возможность разработать наиболее рациональную конфигурацию схемы с оптимальными теплоэнергетическими и экологическими параметрами.

Комплексная математическая модель промышленной ТЭЦ включает в себя расчетные модули локальных теплоэнергетических объектов – газогенератора, охладителя газа, скруббера, газотурбинной установки, котла-утилизатора, паровой турбины. Каждый расчетный модуль основан на уравнениях материального и теплового балансов и имеет информационные каналы обмена данных с другими расчетными модулями в соответствии с тепловой схемой.

В расчетном модуле газогенератора моделируют процессы газификации твердого топлива и определяют выход генераторного газа (нм<sup>3</sup>/т) и его теплотворную способность (кДж/нм<sup>3</sup>).

Расчетный модуль газотурбинной установки моделирует ее работу в условиях сжигания в камере сгорания низкокалорийного генераторного газа и позволяет определить мощность и КПД ГТУ, оптимизировать основные рабочие параметры и тепловую схему.

В качестве оптимизируемого параметра может быть выбрана степень сжатия воздуха в осевом компрессоре ГТУ ( $\pi$ ), которая входит в формулу для расчета работы сжатия воздуха, кДж/кг:

$$H_k = C_k T_{нк} \left( \pi^{[(k-1)/k]-1} \right) / \eta_k, \quad (1)$$

где  $C_k$  – удельная изобарная теплоемкость воздуха при средней температуре сжатия в компрессоре, кДж/(кг·К);  $T_{нк}$  – температура воздуха на входе в компрессор, К;  $k$  – показатель адиабаты воздуха в компрессоре;  $\eta_k$  – политропный КПД компрессора.

Оптимизируемым параметром может быть и коэффициент избытка воздуха в камере сгорания ГТУ ( $\alpha$ ), который входит в формулу для расчета количества тепла, переданного газовому потоку при сжигании генераторного газа:

$$Q_{КС} = Q_{н}^p \cdot \eta_{КС} / \alpha / m_0, \quad (2)$$

где  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания генераторного газа, кДж/кг;  $\eta_{КС}$  – КПД камеры сгорания, учитывающий потери в окружающую среду;  $m_0$  – массовый теоретический расход воздуха, необходимый для горения генераторного газа, кг/кг.

При расчетах с применением разработанной комплексной математической модели промышленной ТЭЦ можно выбрать либо энергетический, либо экологический критерий оптимальности:

– максимальный КПД по выработке электрической энергии;

– максимальный коэффициент использования топлива (КИТ);

– минимальные выбросы вредных веществ в атмосферу.

КПД по выработке электроэнергии, %, рассчитывают по формуле

$$\eta_{э} = (N_{ГТУ} + N_{ПТУ}) / (B_{Т,Т} Q_{н}^p) \cdot 100, \quad (3)$$

где  $N_{ГТУ}$  и  $N_{ПТУ}$  – мощность генераторов газотурбинной и паротурбинной установок ТЭЦ соответственно, кВт;  $B_{Т,Т}$  – расход твердого топлива в газогенераторе, кг/с;  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания исходного твердого топлива, кДж/кг.

Коэффициент использования топлива (КИТ) является для ТЭЦ самым важным показателем эффективности, так как учитывает комбинированную выработку тепловой и электрической энергий. Коэффициент использования топлива, %, рассчитывают по формуле

$$КИТ = (N_{ГТУ} + N_{ПТУ} + Q_{ПТУ}) / (B_{Т,Т} Q_{н}^p) \cdot 100, \quad (4)$$

где  $Q_{ПТУ}$  – количество тепловой энергии, отпущенной из отборов паровой турбины потребителям, кВт.

**Результаты исследования.** При практическом внедрении газогенераторов на ТЭЦ необходимо дать ответ на вопрос о том, какое преимущество дает газификация по сравнению с традиционным способом сжигания твердого топлива в топке котла. Ответ на этот вопрос можно получить, если рассмотреть и проанализировать схемы использования твердого топлива на промышленных ТЭЦ с энергетической и экологической точек зрения, сравнив традиционную и альтернативную схемы.

При использовании традиционной схемы твердое топливо сжигают в топке пылеугольного барабанного котла и выработанный в котле пар направляется в паровую турбину с промышленным отбором пара для выработки тепловой и электрической энергии.

Следуя альтернативной схеме ТЭЦ (рис. 1), твердое топливо после газификации превращается в генераторный газ, который сжигается в камере сгорания ГТУ. Уходящие газы ГТУ направ-

ляются в котел-утилизатор для выработки перегретого пара с давлением 4 МПа, а пар поступает в паровую турбину с противодавлением. При этом электроэнергия вырабатывается в генераторах обеих турбин – и паровой, и газовой.

Для сравнительного анализа был проведен расчет энергетических и экологических показателей двух вышеуказанных схем применения твердого топлива для выработки тепловой и электрической энергии. Результаты расчетов сведены в таблицу (см. таблицу).

Анализ представленных в таблице данных показывает, что альтернативная схема сжигания твердого топлива с его предварительной газификацией на промышленной ТЭЦ имеет ряд существенных преимуществ с энергетической и экологической точек зрения:

- из одинакового количества твердого топлива (5,5 т/ч) по альтернативной схеме можно выработать почти в 1,7 раза больше электроэнергии (14,2 МВт вместо 8,2 МВт), в связи с чем получается достаточно высокий КПД по выработке электроэнергии (32,8 %);

- применение газификации позволяет повысить основной показатель энергетической эффективности на промышленной ТЭЦ – коэффициент использования топлива (КИТ) с 60,8 до 74,4 %;

- полученный в газификаторе генераторный газ проходит предварительную очистку от смол, серы и золы, что приводит к существенному снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. Естественно, и при использовании традиционной схемы можно организовать очистку продуктов от серы и золы, но ее стоимость возрастает в два раза, потому что объем продуктов сгорания в традиционной схеме вдвое превышает объем генераторного газа в альтернативной схеме получения тепла и электроэнергии (8,6 против 4,4 м<sup>3</sup>/кг).

При проектировании промышленной ТЭЦ с предварительной газификацией угля очень важно правильно подобрать оптимальные параметры работы теплоэнергетических установок. Для этого с использованием разработанной математической модели был выполнен расчетный анализ влияния степени сжатия воздуха в осевом компрессоре газотурбинной установки на энергетическую эффективность всей ТЭЦ. Результаты представлены на графиках (рис. 2).

Анализ графиков показывает, что с увеличением степени сжатия в компрессоре ГТУ показатели эффективности промышленной ТЭЦ увеличиваются. Однако при повышении степени сжатия более 18 этот прирост становится незначительным, поэтому на промышленных ТЭЦ целесообразно применять ГТУ со степенью сжатия в компрессоре, равной 18.

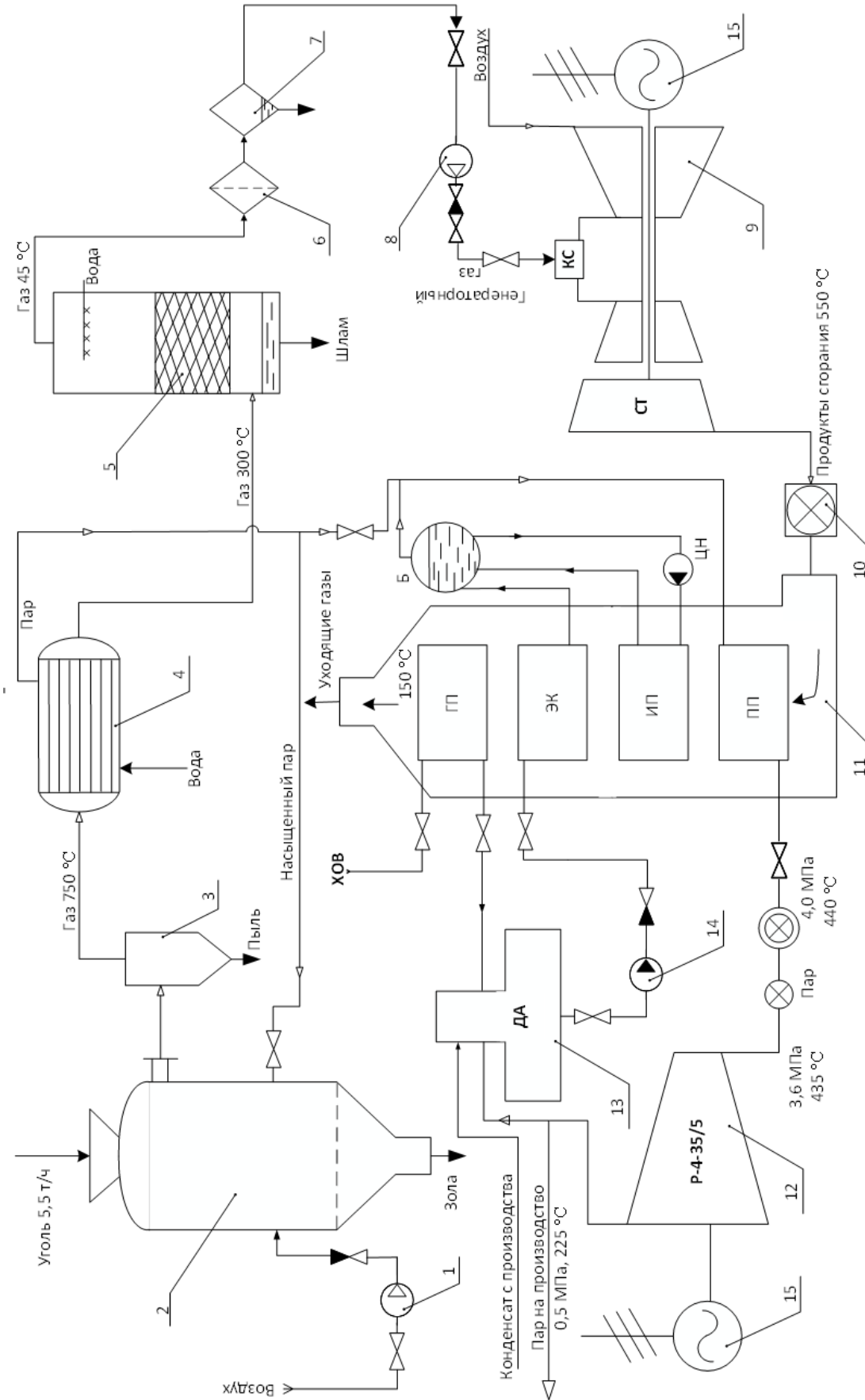


Рис. 1. Схема промышленной парогазовой ТЭЦ с предварительной газификацией угля: 1 – воздушный компрессор; 2 – газогенератор слоевого типа; 3 – циклон; 4 – газотрубный котел; 5 – скруббер; 6 – механический фильтр; 7 – влагоделитель; 8 – турбина дожимной; 9 – двухвальная газотурбинная установка; 10 – дожигающее устройство; 11 – барабанный одноконтурный котел-утилизатор; 12 – турбина паровая с противодавлением; 13 – деаэратор атмосферный; 14 – питательный насос; 15 – электрогенератор; Б – барабан; ГП – газовый подогреватель; ЭК – экономайзер; ИП – испарительные поверхности; ПП – пароперегреватель; КС – камера сгорания; СТ – силовая турбина; ХОВ – химочищенная вода; ЦН – циркуляционный насос

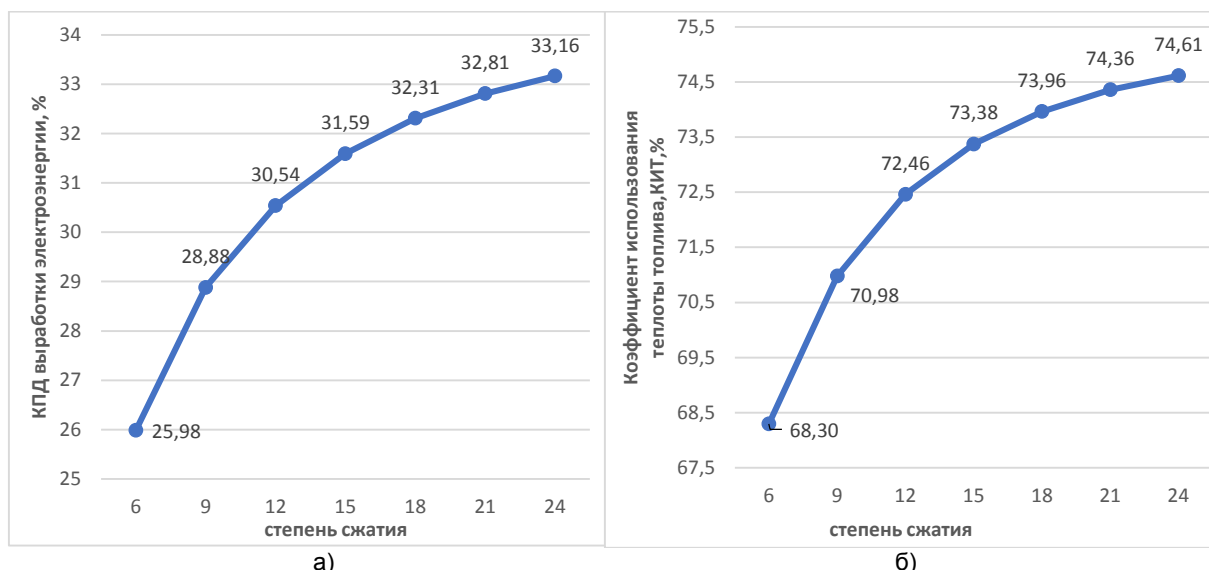


Рис. 2. Зависимости КПД выработки электроэнергии (а) и КИТ (б) от увеличения степени сжатия в компрессоре

### Энергетические и экологические показатели схем использования твердого топлива

Показатель	Единицы измерения	Схема	
		традиционная	альтернативная
Вид твердого топлива		Каменный уголь	Каменный уголь
Теплота сгорания твердого топлива	кДж/кг	28260	28260
Расход твердого топлива	т/ч	5,5	5,5
Располагаемая теплота топлива	МВт	43,2	43,2
Тепловая мощность установки (пар на производство)	МВт	18,1	18,1
Электрическая мощность установки	МВт	8,2	14,2
КПД выработки электроэнергии	%	18,9	32,8
Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ)	%	60,8	74,4
Выбросы вредных веществ в атмосферу:			
SO <sub>2</sub>	г/с	16,5	–
CO		77,9	26,8
NO <sub>x</sub>		7,3	9,0
зола		49,5	–

**Выводы.** Расчетное исследование двух схем использования твердого топлива на ТЭЦ позволяет сделать вывод о том, что использование твердого топлива в когенерационных паровых установках с его предварительной газификацией является весьма перспективным направлением развития энергетики в России и позволяет существенно снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, повышая экологическую безопасность производства энергии.

#### Список литературы

1. **Алешина А.С., Сергеев В.В.** Газификация твердого топлива: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 202 с.

2. **Газификация** твердых топлив: учеб. пособие / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, С.В. Лавриненко и др. – Томск: ТПУ, 2021. – 172 с.

3. **Газогенераторные** технологии в энергетике / А.В. Зайцев, А.Ф. Рыжков, В.Е. Силин и др.; под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург: Сократ, 2010. – 612 с.

4. **Парогазовые** технологии на твердом топливе: учеб. пособие / А.Ф. Рыжков, Т.Ф. Богатова, Е.И. Левин и др.; под ред. Б.В. Берг. – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 160 с.

5. **Пучков Л.А., Воробьев Б.М., Васючков Ю.Ф.** Углеэнергетические комплексы будущего. – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2007. – 245 с.

6. **Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А.** Анализ технологий газификации твердого топлива // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 194–205.

7. **Мракин А.Н., Селиванов А.А., Стрибулевич В.А.** Разработка установки с газификацией твердого топлива для комбинированного производства энергоносителей // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12-1. – С. 36–39.

8. **Ольховский Г.Г.** Газификация твердых топлив в мировой энергетике (обзор) // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 7. – С. 3–11.

9. **Ольховский Г.Г.** Новые проекты ПГУ с газификацией угля (обзор) // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 10. – с. 3–13.

10. **Филиппов С.П., Кейко А.В.** Газификация угля: на перепутье. Технологические факторы // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 3. – С. 45–48.

### References

1. Aleshina, A.S., Sergeev, V.V. *Gazifikatsiya tverdogo topliva* [Gasification of solid fuel]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 202 p.

2. Gvozdyakov, D.V., Gubin, V.E., Lavrinenko, S.V., Larionov, K.B., Pak, A.Ya., Slyusarskiy, K.V., Tsibul'skiy, S.A., Yankovskiy, S.A. *Gazifikatsiya tverdykh topliv* [Gasification of solid fuels]. Tomsk: TPU, 2021. 172 p.

3. Zaytsev, A.V., Ryzhkov, A.F., Silin, V.E. *Gazogeneratorye tekhnologii v energetike* [Gas-generating technologies in the energy sector]. Ekaterinburg: Sokrat, 2010. 612 p.

4. Ryzhkov, A.F., Bogatova, T.F., Levin, E.I. *Parogazovye tekhnologii na tverdom toplive* [Combined-cycle solid fuel technologies]. Ekaterinburg: UrFU, 2018. 160 p.

5. Puchkov, L.A., Vorob'ev, B.M., Vasyuchkov, Yu.F. *Ugleenergeticheskie komplekсы budushchego* [Coal-energy complexes of the future]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2007. 245 p.

6. Afanas'ev, V.V., Kovalev, V.G., Tarasov, V.A. *Analiz tekhnologiy gazifikatsii tverdogo topliva* [Analysis of solid fuel gasification technologies]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 194–205.

7. Mrakin, A.N., Selivanov, A.A., Stribulevich, V.A. *Razrabotka ustanovki s gazifikatsiey tverdogo topliva dlya kombinirovannogo proizvodstva energonositeley* [Development of a solid fuel gasification plant for combined energy production]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2016, no. 12-1, pp. 36–39.

8. Ol'khovskiy, G.G. *Gazifikatsiya tverdykh topliv v mirovoy energetike (obzor)* [Gasification of solid fuels in the global energy sector (review)]. *Teploenergetika*, 2015, no. 7, pp. 3–11.

9. Ol'khovskiy, G.G. *Novye proekty PGU s gazifikatsiey uglya (obzor)* [New CCGT projects with coal gasification (overview)]. *Teploenergetika*, 2016, no. 10, pp. 3–13.

10. Filippov, S.P., Keyko, A.V. *Gazifikatsiya uglya: na pereput'e. Tekhnologicheskie faktory* [Coal gasification: at a crossroads. Technological factors]. *Teploenergetika*, 2021, no. 3, pp. 45–48.