

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ
БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ»
КеАҚ



КӨЛІК-ЭНЕРГЕТИКА ФАКУЛЬТЕТІ



**«КӨЛІК ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАНЫҢ ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ:
ИННОВАЦИЯЛЫҚ ШЕШУ ТӘСІЛДЕРІ» XIV ХАЛЫҚАРАЛЫҚ
ҒЫЛЫМИ-ТӘЖІРИБЕЛІК КОНФЕРЕНЦИЯСЫНЫҢ
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ: «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТА И
ЭНЕРГЕТИКИ: ПУТИ ИХ ИННОВАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ»**

**PROCEEDINGS OF THE XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC- PRACTICE
CONFERENCE «ACTUAL PROBLEMS OF TRANSPORT AND ENERGY:
THE WAYS OF ITS INNOVATIVE SOLUTIONS»**

Астана, 2026

УДК 656:620.9

ББК 65.37+65.305.1

A43

Редакционная коллегия:

Председатель – Талтенов А.А., член Правления – Проректор по науке и коммерциализации, д.х.н., профессор; Заместитель председателя – Кокаев У.Ш. декан транспортно-энергетического факультета, к.т.н., ассоциированный профессор; Тлепиева Г.М. – заместитель декана по научной работе, к.т.н., доцент; Султанов Т.Т. – заведующий кафедрой «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта», к.т.н., доцент; Тогизбаева Б.Б. – заведующая кафедрой «Транспортная инженерия», д.т.н., профессор; Байхожаева Б.У. – заведующая кафедрой «Стандартизация, сертификация и метрология», д.т.н., профессор; Жумажанов С.К.– заведующий кафедрой «Электроэнергетика», к.т.н., доцент; Садыкова С.Б. – заведующая кафедрой «Теплоэнергетика», PhD, доцент.

A43 Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения: XIV Международная научно-практическая конференция, 19 марта 2026г. / Подгот. А.А. Талтенов, У.Ш. Кокаев, Г.М. Тлепиева – Республика Казахстан, г.Астана, НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», 2026. – 632 с.

ISBN 978-601-385-216-4

В сборник включены материалы XIV Международной научно-практической конференции на тему: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения», проходившей в г. Астана 19 марта 2026 года.

Тематика статей и докладов участников конференции посвящена актуальным вопросам логистики, организации перевозок, движения и эксплуатации транспорта, стандартизации, метрологии и сертификации, транспорту, транспортной техники и технологии, теплоэнергетики и электроэнергетики.

Материалы конференции дают отражение научной деятельности ведущих ученых дальнего и ближнего зарубежья, Республики Казахстан и могут быть полезными для докторантов, магистрантов и студентов.

ISBN 978-601-385-216-4

УДК 656:620.9
ББК 65.37+65.305.1

© НАО «ЕНУ имени Л.Н. Гумилева», 2026

**Секция 4 «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

Айтмагамбетова М. Б., Мергалимова А.К. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗА ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА ДЛЯ РАСТОПКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ	502
Айтмагамбетова Г.А., Никифоров А.С. АНАЛИЗ ПОТОКОВ В КОМПЛЕКСЕ ПРОКАЛКИ НЕФТЯНОГО КОКСА НА ОСНОВЕ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА	506
Алибеков Р.К., Оришевская Е. В. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА	509
Гуськов Н.К., Отаншыл А.Б., Карабекова Д.Ж. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ	512
Zhumagulov M.G., Sadykova S.B., Romanenko S.V. MODERN TECHNOLOGIES IN THERMAL POWER ENGINEERING EDUCATION IN KAZAKHSTAN	516
Жұманазар Н.Д., Әкімбек Г.Ә. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ	520
Карманов А.Е., Никифоров А.С., Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Габдулов А.У. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ	530
Қасен Т.Т., Мерзудинова Г.Т. ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ МЕН ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ НЕГІЗІНДЕ АЙМАҚТЫҚ ЭНЕРГИЯ ТАПШЫЛЫҒЫН АЗАЙТУ ӘДІСТЕМЕСІ	533
Мирза О.Ф. ПОДГОТОВКА СУБСТРАТА ДЛЯ АНАЭРОБНОГО БРОЖЕНИЯ В БИОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ: ОБЗОР МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ	537
Попп Д.А., Кинжибекова А.К. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООЧИСТКИ НА ТЭЦ: ПЕРЕХОД ОТ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ К РУКАВНЫМ ФИЛЬТРАМ В РАМКАХ НДТ	541
Сейтжаппаров Н.Қ., Мергалимова А.К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ	545
Таранов П.П., Арипова Н.М., Приходько Е.В., Оришевская Е.В., Кажобаева А.Т. АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОвой РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ	549
Умирзаков Р.А., Атякшева А.В. ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЮЧЕГО ГАЗА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ УГЛЕЙ КАЗАХСТАНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	552
Умирзаков Р.А., Абдирова М.Т., Карибекұлы Ш. КӨМІРДЕ ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ЖЫЛУ ЭЛЕКТР ОРТАЛЫҚТАРЫН ГАЗ ОТЫНЫНА АУЫСТЫРУ АРҚЫЛЫ ШЫҒАРЫНДЫЛАРДЫ АЗАЙТУДЫҢ МҰМКІНДІГІН ТАЛДАУ	555

Чарыков В.И., Евдокимов А.А. МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАБОТАННЫХ ОСЕВЫХ МАСЕЛ	561
--	-----

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВКАХ

Жұманазар Нұртуған Дәуірұлы

zhumanazarannn@gmail.com

Магистрант кафедры «Теплоэнергетика»
ЕНУ им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Научный руководитель: Әкімбек Г.Ә.

Аннотация. Работа посвящена всестороннему анализу потенциала использования солнечной энергии в парогазовых установках (ПГУ) на примере интегрированных солнечно-парогазовых комплексов. В статье рассматриваются технические и экономические аспекты гибридных электростанций, основанных на совмещении газовой турбины, паровой турбины и концентрирующих солнечных установок. Статистический анализ верифицированных данных источников показывает, что интеграция солнечной тепловой части позволяет увеличить энергетическую и эксергетическую эффективность ПГУ на 1–18 п.п., снизить удельный расход топлива, уменьшить выбросы CO₂ и сократить уровень себестоимости электроэнергии на 35–40 % по сравнению с автономными солнечными электростанциями. В работе обоснованы возможности внедрения ISCC в Республике Казахстан, оценены солнце-энергетические ресурсы, динамика развития ВИЭ, стратегия декарбонизации и необходимость повышения гибкости генерирующих мощностей. В результате предлагается ряд мер для поддержки интеграции солнечных тепловых технологий в новые ПГУ, строящиеся в Казахстане, и представлены рекомендации по дальнейшим исследованиям и пилотным проектам.

Ключевые слова: парогазовые установки; концентрирующая солнечная энергетика; интегрированные солнечные циклы; энергетическая эффективность; Казахстан; выбросы CO₂.

Введение

В современном мире энергосистема переживает эпоху трансформации, вызванной необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и перехода от исчерпаемых ископаемых ресурсов к возобновляемым источникам энергии. Парогазовые установки (ПГУ), объединяющие газотурбинный и паротурбинный циклы, зарекомендовали себя как высокоэффективные технологии для производства электроэнергии: их коэффициент полезного действия (КПД) при оптимальных условиях достигает 50–60 %, а в рекордных установках – до 62,22 % [1]. Однако, несмотря на относительную экологичность и гибкость, ПГУ всё же основаны на сжигании природного газа, что ограничивает их способность соответствовать целям декарбонизации.

Одним из направлений повышения эффективности и экологичности ПГУ является интеграция концентрирующих солнечных технологий (CSP) в состав паротурбинного цикла. Такой гибрид, известный как интегрированный солнечно-парогазовый цикл (Integrated Solar Combined Cycle, ISCC), позволяет использовать тепловую энергию солнца для подогрева рабочей среды котла-утилизатора, вырабатывая дополнительный пар без сжигания топлива. За счёт этого повышается выход электрической энергии, снижается удельный расход газа и уменьшается выброс углерода [2]. Казахстан, располагающий значительным потенциалом солнечной радиации (особенно в южных регионах), взял курс на снижение углеродной интенсивности энергетики. Согласно докладу RIFS, к 2023 г. суммарная установленная мощность возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) в стране превысила 2 ГВт (957 МВт ветра и 1149 МВт солнечной энергии), а к 2035 г. планируется ввод 11,7 ГВт ВИЭ [3].

Тем не менее, доля угольных электростанций в структуре генерации остаётся высокой (около 70 %), что требует новых технологических решений для гарантированной и гибкой замены угольной генерации. Гибридные ISCC-станции могут стать эффективным инструментом сокращения выбросов и повышения надёжности энергообеспечения, особенно

в южных областях, где строятся новые ПГУ (Туркестан, Кызылорда, Алматы) мощностью более 2,6 ГВт.

Обзор литературы

Идея совмещения солнечной тепловой энергии с парогазовым циклом была предложена ещё в конце XX в., но широкое развитие получила в последнем десятилетии благодаря совершенствованию технологий CSP и повышению цен на топливо. Пионерские исследования показали, что добавление солнечного коллектора в схему ПГУ позволяет увеличивать паропроизводительность в котле-утилизаторе и, следовательно, мощность паровой турбины без дополнительного сжигания газа [3, с. 15]. Дальнейшие работы продемонстрировали, что уровень удельных капиталовложений солнечной части в ISCC приблизительно в 4,5 раза ниже, чем для автономной солнечной электростанции такой же мощности [4]. Дальнейшие исследования сосредоточились на термодинамическом и экзергетическом анализе гибридных циклов. Работа в журнале *Entropy* (2018) показала, что применение двухступенчатой схемы прямого парообразования на солнечной стороне позволяет повысить солнечно-электрический коэффициент полезного действия на 1,2 п.п. и эксергетическую эффективность на 2,5 п.п., а расход газа снижается за счёт рекуперации тепла [5]. Исследование 2024 г. в *Applied Energy* рассмотрело комбинированную схему CSP с каскадным тепловым накопителем на соли для ПГУ мощностью 328 МВт: результаты показали увеличение эксергетической эффективности на 1,99 п.п., экономию природного газа $4,41 \times 10^7$ м³ и снижение выбросов CO₂ на 172 260 т/год [6].

Особое внимание уделяется анализу на уровне эксплуатации конкретных проектов. На базе электростанции Al-Qayara в Ираке было проведено эксергоэкономическое исследование гибридной системы с солнечной башней. Там солнечная составляющая 68 МВт позволила увеличить тепловую эффективность на 17,96 п.п. и эксергетическую – на 17,34 п.п., при этом уровень LCOE составил 12,39 USD/MWh [7, с. 154].

Например, на марокканском объекте Ain Beni Mathar 20 МВт солнечной мощности дают лишь около 1,2 % от годовой генерации станции, однако экономят примерно 22 988 т выбросов CO₂ в год. Наиболее крупный в мире проект Martin NGSEC (США) имеет солнечную долю 75 МВт при общей мощности 1150 МВт; однако даже такая относительно небольшая доля позволяет снизить расход газа и демонстрирует коммерческую реализуемость технологии [7, с. 32].

Данный пример показывает, что при развитых технологиях концентрирующей солнечной тепловой энергии даже в относительно небольших интеграциях (13–15 % от общей мощности) достигается значительный прирост эффективности. Помимо термодинамических параметров, ряд работ исследует экологические и экономические выгоды.

В отчёте Всемирного банка по проекту Ain Beni Mathar указано, что в 2012 г. Солнечная часть станции обеспечила 1,2 % общего объёма генерации, что позволило сэкономить 22 988 т выбросов CO₂. Аналогичные результаты получены на станции Agua Prieta II (12 МВт CSP плюс 464 МВт ПГУ) – солнечная доля невелика, но экономит топливо и демонстрирует технологию [8].

В то же время исследование RIFS отмечает, что масштабное внедрение ВИЭ в Казахстане сталкивается с проблемами маневренности и сетевой интеграции [9, с. 13], именно гибридные ISCC-установки могут частично решить эти проблемы. Анализ мирового опыта интегрированных солнечных парогазовых станций. Международный опыт показывает, что успешная реализация ISCC требует синергии между проверенными газотурбинными технологиями и надёжными солнечными коллекторными системами. Таблица 1 суммирует характеристики ключевых проектов, введённых в эксплуатацию в последние двадцать лет.

Таблица 1 - Основные действующие интегрированные проекты в мире

Страна	Проект	Парогазовая, МВт	Солнечная, МВт	Год
--------	--------	------------------	----------------	-----

Марокко	Ain Beni Mathar	452.0	20	2010
Алжир	Hassi R'me	130.0	25	2011
Египет	Kuraymat	150.0	20	2010
Иран	Yazd	478.0	17	2011
США	Martin NGSEC	1150.0	75	2010
Мексика	Agua Prieta II	464.0	12	2013
Италия	Archimede	760.0	5	2010
Ирак	Al-Qayara	493.5	68	2023

Примечание: сделано автором на основе источников [3, с. 23]

Из таблицы следует, что мощности парогазовой части значительно превышают мощности солнечной, что обусловлено назначением солнечного сегмента как вспомогательного источника.

Такие гибридные комплексы, объединяют газовую турбину, паровую турбину и концентраторную солнечную установку, что позволяет повысить энергетическую и эксергетическую эффективность установки на 1–18 п.п., снизить удельный расход топлива, уменьшить выбросы углекислого газа и сократить себестоимость вырабатываемой электроэнергии на 35–40 % по сравнению с автономными солнечными станциями [10, с. 21–36]. В долгосрочной перспективе предлагается предусмотреть пилотную гибридизацию с небольшой долей солнечного тепла, по результатам которой возможно масштабирование проекта.

Нарастающие климатические вызовы и необходимость наращивания экологически чистой генерации приводят к поиску новых решений для энергетики Казахстана. Одной из перспективных технологий является интеграция солнечных тепловых установок в состав парогазовых станций [11].

Необходимо также разработать нормативно-технические документы, стимулирующие интеграцию возобновляемых источников в традиционные генерирующие мощности, а также программы обучения персонала для работы с новыми технологиями.

Методика и материалы

Настоящее исследование основано на комплексном анализе существующих литературных источников, отчётов международных организаций, научных статей и технических документов. В качестве базы данных использованы сведения о действующих и проектируемых ISCC-станциях по всему миру, статистические данные об энергетическом балансе Казахстана, а также результаты термодинамических расчётов, представленных в научных публикациях. Анализ и визуализация выполнены с использованием средств Python, библиотеки pandas для построения диаграмм. Исследование базируется на моделировании работы парогазовой установки мощностью 1000 МВт, работающей круглосуточно при КПД 55 %. Для анализа рассматриваются сценарии интеграции солнечной тепловой части, соответствующие долям солнечного тепла от общей тепловой нагрузки: 0 %, 5 %, 10 %, 15 % и 20 %. Принимаются следующие допущения:

Предполагаемая номинальная мощность ПГУ – 1000 МВт. Эффективность обычной ПГУ без солнечной интеграции принята на уровне 52 % (типовое значение), а эффективность интегрированной солнечно-парогазовой установки (ISCC) с накопителем – 67,57 % (по результатам исследования). Коэффициент использования установленной для газовой части предполагается 85 %, для солнечной – 30 %.

Годовая выработка энергии определяется как произведение номинальной мощности, коэффициента использования и числа часов в году (8 760 ч) с учётом эффективности:

$$E = P \times Efficiency \times CF \times 8760 \quad (1)$$

Тепловой эквивалент расхода топлива рассчитывается исходя из электрической мощности и эффективности. Чем выше эффективность, тем меньше требуется топлива для производства заданной мощности.

Выбросы CO₂, для оценки выбросов используется удельный коэффициент выбросов природного газа 0,202 кг CO₂/кВт·ч. Общие выбросы определяются как произведение потребляемой энергии топлива (в МВт·ч) на этот коэффициент.

Для ориентировочного расчёта экономии приняты следующие значения: средняя цена природного газа 40 USD/МВт·ч и условный налог на выбросы 50 USD за 1 т CO₂. Эти цифры используются для оценки потенциальной экономии от снижения расхода газа и выбросов.

Результаты и обсуждение

В Казахстане энергосистема также столкнулась с задачами декарбонизации и повышения гибкости генерации. В Туркестанской области реализуется проект строительства электростанции на базе ПГУ мощностью до 1000 МВт. Проект направлен на обеспечение южных регионов страны маневренной генерацией и включает возможность интеграции солнечных тепловых технологий. В рамках настоящего исследования выполняется практическая оценка потенциала ISCC для Туркестанского проекта с учётом местных климатических условий, динамики развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и целей декарбонизации.

Цель данной работы – оценить возможности применения гибридной схемы ISCC на примере проекта строительства парогазовой установки мощностью до 1000 МВт в Туркестанской области. Инициативу по строительству этой электростанции выдвинуло ТОО «ПГУ Туркестан», дочерняя компания АО «Самрук - Қазына». Согласно общенациональному плану, станция должна обеспечить маневренную генерацию для южных регионов республики. Одновременно с этим ведётся разработка стратегии декарбонизации, которая предусматривает расширение доли возобновляемых источников энергии и повышение гибкости генерирующих мощностей.

Совмещение газовой турбины, паровой турбины и солнечной тепловой части может сыграть ключевую роль в достижении этих целей. Практическая часть исследования базируется на математическом моделировании суточной работы установки с различной долей солнечного тепла и оценке результатов по эффективности, расходу топлива, выбросам CO₂ и экономическим показателям.

Модель рассматривает пять сценариев, в которых доля солнечного тепла от общего теплового потока ПГУ изменяется от 0 до 20 %. Базовый КПД парогазовой установки принят равным 55 % – такой уровень характерен для современных станций мощностью порядка 1 ГВт. Данные по солнечной радиации для Туркестана взяты из исследований, которые показывают годовой ресурс 2200–3000 ч солнечного сияния и средний показатель прямой солнечной радиации (DNI) около 5,5 кВт·ч/м²·сут. Удельный выброс диоксида углерода для электроэнергии, произведённой на природном газе, принят 0,435 кг/кВт·ч. В каждом сценарии рассчитывались новый КПД, суточный тепловой поток, распределение тепловых потоков между газом и солнечной частью, суточная и годовая выработка, а также выбросы CO₂.

Таблица 2 - ISCC–ПГУ Туркестан: входные параметры и допущения

Параметр	Значение
Номинальная мощность ПГУ, P (МВт)	1000
Длительность моделирования (час)	24
Суточная выработка, (МВт·ч)	24000
Базовый КПД ПГУ, η_0	0,55
Базовая углеродоёмкость (газ), CI ₀ (кг/кВт·ч)	0,435

Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Эти цифры показывают, что регион обладает высокой солнечной активностью, поэтому интеграция солнечной энергии в парогазовую установку представляет большой потенциал. Кроме того, строительство 300 МВт солнечной электростанции увеличит долю «зелёной» энергии, что важно для декарбонизации.

Таблица 3 - Сценарии (доля солнечного тепла и принятый КПД)

Сценарий	Доля солнца, s	s , %	КПД η_s
S0	0	0	0,55
S5	0,05	5	0,565
S10	0,1	10	0,58
S15	0,15	15	0,595
S20	0,2	20	0,61

Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Солнечно-ресурсные условия Туркестанской области в модели заданы на основе усреднённых характеристик, применимых для предварительных технико-экономических оценок: 2200–3000 часов солнечного сияния в год и среднесуточный уровень прямой нормальной радиации DNI порядка 5,5 кВт·ч/м²·сут. Суточный профиль DNI в Python формировался как гладкая функция с нулевыми значениями в ночные часы и максимумом около солнечного полудня, после чего суточная интегральная энергия приводилась к указанному среднему значению. Далее для каждого часа вычислялся эквивалентный солнечный тепловой вклад (в долях от суммарного теплоподвода), а оставшаяся часть требуемого теплоподвода обеспечивалась природным газом. Логика расчёта теплоподвода и связи мощности с расходом топлива соответствует общепринятой постановке для ПГУ и совпадает с методологией, используемой при анализе ISCC, где эффект гибридизации интерпретируется через снижение удельного расхода топлива и последующее снижение CO₂.

Расход топлива в каждом сценарии определялся из энергетического баланса по КПД: при заданной суточной выработке электроэнергии E_{el} суммарный теплоподвод равен

$$Q_{in}E_{el}/\eta \quad (2)$$

А газовая часть составляет:

$$(1 - s)Q_{in} \quad (3)$$

где s – доля солнечного тепла. Выбросы диоксида углерода оценивались через удельный показатель для электроэнергии на природном газе 0,435 кг/кВт·ч (базовое значение для сценария без солнечной интеграции) с последующей корректировкой на рост КПД и уменьшение доли газового теплоподвода. Такой подход согласуется с идеей статьи: экологическая составляющая напрямую следует из расчёта расхода топлива и продуктов сгорания, а затем может быть переведена и в экономическую плоскость через платежи/налоги за CO₂.

Солнечная ресурсная часть для Туркестана задавалась через показатель прямой нормальной радиации. Входным допущением служил среднесуточный уровень $DNI_{day} \approx 5,5$ кВт/м²·сут. для юга Казахстана продолжительность солнечного сияния порядка 2200–3000 часов в год, что подтверждается открытыми аналитическими источниками по региону. В Python суточный профиль DNI формировался на часовом шаге как гладкая функция «дневной колокол» (нулевые значения ночью и максимум около полудня), после чего нормировался так, чтобы интеграл по суткам совпадал с заданным DNI_{day} .

Для нормировки использовалась стандартная процедура: задаётся безразмерная форма $f(t)$ (например, половина синуса на интервале светового дня), затем рассчитывается коэффициент масштаба k из условия $\sum DNI(t)\Delta t = DNI_{day}$, где $DNI(t) = k \cdot f(t)$.

Эта часть нужна для корректной имитации суточной изменчивости солнечного вклада, однако в данной работе солнечная компонента использовалась не для детального расчёта поля РТС, а для задания доли s в тепловом балансе ПГУ, что соответствует уровню предварительной экологической оценки.

Далее в каждом сценарии рассчитывался тепловой поток, который должен быть подведён к установке для обеспечения заданной выработки. При известном КПД η_s суммарный теплоподвод на сутки равен:

$$Q_{in,day}(s) = \frac{E_{el,day}}{\eta_s} \quad (4)$$

Поскольку по сценарию доля солнечного тепла равна s , доля тепла от природного газа составляет $(1 - s)$, и тогда газовая часть теплоподвода:

$$Q_{gas,day}(s) = (1 - s) \cdot Q_{in,day}(s) = (1 - s) \cdot \frac{E_{el,day}}{\eta_s} \quad (5)$$

Величина выбросов CO_2 определялась через удельный показатель для электроэнергии на природном газе. В исходных условиях был принят удельный выброс $CI_0=0,435$ кг/кВт, как базовый для «чистой» ПГУ без солнечной интеграции. Тогда базовые суточные выбросы при $s=0$ вычисляются прямым умножением:

$$M_{CO_2,day}(0) = CI_0 \cdot E_{el,day} = 0,435 \cdot 24000000 = 10440000 \text{ кг} = 10440 \text{ т/сут}$$

Для сценариев ISCC важен тот факт, что при одинаковой выработке электричества расход топлива и соответствующие выбросы пропорциональны газовой доле теплоподвода и обратно пропорциональны КПД. Поэтому скорректированная углеродоёмкость (удельные выбросы на 1 кВт·ч) в сценарии s записывается как:

$$CI_s = CI_0 \cdot (1 - s) \cdot \frac{\eta_0}{\eta_s} \quad (6)$$

А суточные выбросы:

$$M_{CO_2,day}(s) = CI_s \cdot E_{el,day} \quad (7)$$

Эти выражения являются компактной формой того же принципа, который используется в работах по ISCC: выбросы восстанавливаются через расход топлива и продукты сгорания при сравнении конфигураций, а экологическое преимущество возникает из снижения газовой составляющей и улучшения эффективности.

Покажем вычисление на наиболее показательном сценарии $s=0,20$ (20% солнечного тепла). Для него $\eta_s=0,61$. Тогда:

$$CI_{0,20} = 0,435 \cdot (1 - 0,20) \cdot \frac{0,55}{0,61} = 0,435 \cdot 0,8 \cdot 0,9016 \approx 0,3138 \text{ кг/кВтч}$$

Суточные выбросы составят:

$$M_{CO_2,day}(0,20) = 0,3138 \cdot 24000000 \approx 7530500 \text{ кг} = 7530,5 \text{ т/сут. ч}$$

Снижение относительно базового варианта:

$$\Delta M_{CO_2,day} = 10440 - 7530,5 = 2909,5 \text{ т/сут,}$$

$$R = \frac{2909,5}{10440} \cdot 100\% \approx 27,9\%.$$

Аналогично были рассчитаны остальные сценарии; итоговые значения (суточная выработка фиксирована 24 000 МВт·ч) приведены ниже и воспроизводятся прямой подстановкой в формулы CI_s и $M_{CO_2,day}(s)$. Далее на таблице 4 показаны результаты сценарного моделирования

Таблица 4 - Результаты сценарного моделирования (суточная работа, P=1000 МВт)

Сценарий	s, %	η_s	МВт·ч	CI_s , кг/кВт·ч	CO ₂ day, т	Снижение, т/сут	Снижение, %
S0	0	55,0%	24 000	0,4350	10 440,0	0,0	0,0%
S5	5	56,5%	24 000	0,4023	9 654,7	785,3	7,5%
S10	10	58,0%	24 000	0,3713	8 910,0	1 530,0	14,7%
S15	15	59,5%	24 000	0,3418	8 202,9	2 237,1	21,4%
S20	20	61,0%	24 000	0,3138	7 530,5	2 909,5	27,9%

Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Из таблицы видно, что при увеличении солнечной доли наблюдается устойчивое снижение углеродоёмкости выработки и суточных выбросов. В базовом сценарии S0 удельные выбросы.

Далее построен график 1 по данным таблицы 1 и отражает изменение удельных выбросов CI_s (кг/кВт·ч) при росте доли солнечного тепла s от 0 до 20% в условиях фиксированной суточной выработки 24 000 МВт·ч.

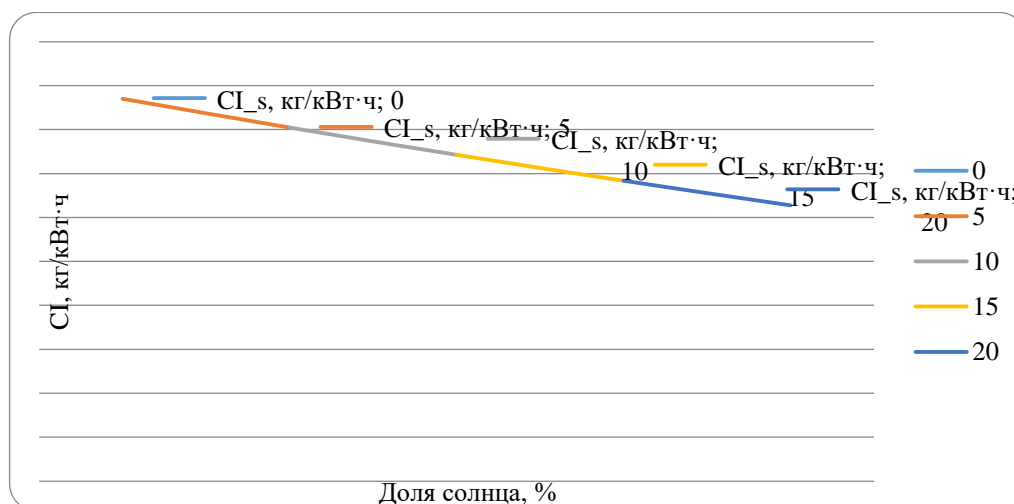


Рисунок 1 – Удельные выбросы CO₂ (CI) в зависимости от доли солнечного тепла

Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

По графику видно монотонное снижение удельных выбросов с ростом s: от 0,4350 кг/кВт·ч в S0 до 0,3138 кг/кВт·ч в S20. Характер зависимости близок к линейному в заданном диапазоне, что объясняется принятой постановкой: солнечная часть замещает часть теплопровода от топлива, а увеличение η_s усиливает эффект снижения расхода газа на единицу выработки.

На Диаграмме 2 построена на основе расчётных значений CO_{2day} (т/сут) из таблицы 1 и демонстрирует, как меняются абсолютные суточные выбросы при одинаковой суточной выработке электроэнергии и фиксированной мощности 1000 МВт, но при различной доле солнечного тепла s.

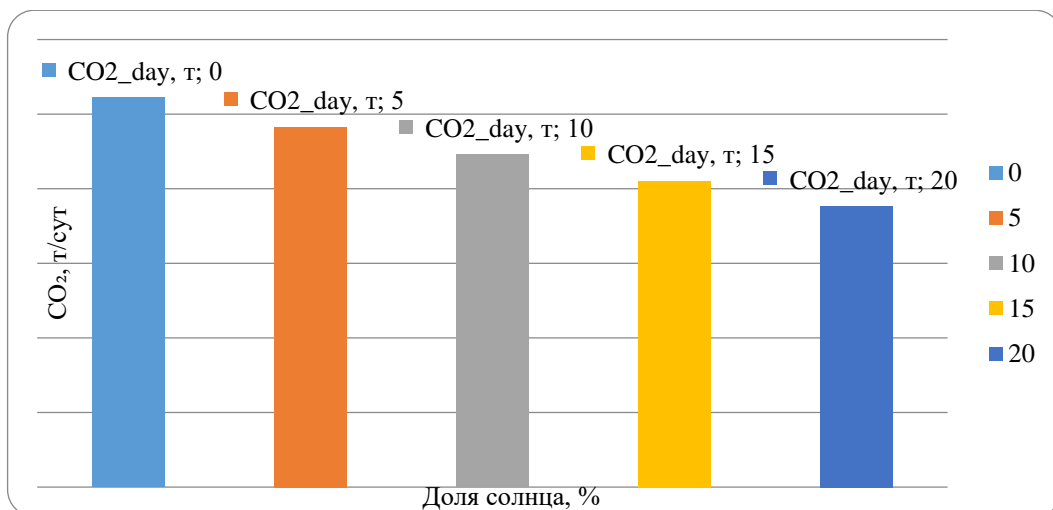


Рисунок 2 – Суточные выбросы CO₂ в зависимости от доли солнечного тепла
Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Из диаграммы видно, что переход от S₀ к S₂₀ снижает выбросы с 10 440,0 до 7530,5 т/сут. Падение носит систематический характер: при каждом увеличении доли солнечного тепла на 5 п.п. происходит дополнительное сокращение выбросов, что соответствует логике расчёта через уменьшение газового теплоподвода и рост КПД. Следовательно, экологический эффект в абсолютных единицах (т/сут) становится особенно значимым при масштабах 1 ГВт, что важно именно для проекта Туркестанской области.

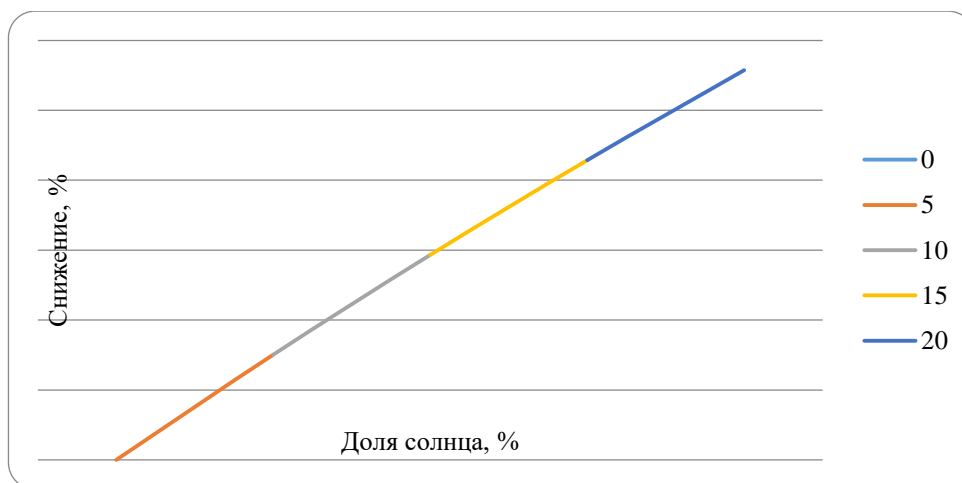


Рисунок 3 – Снижение выбросов CO₂, % в зависимости от доли солнечного тепла
Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Данный график отображает относительный экологический эффект R (в процентах) как функцию доли солнечного тепла s, где базой сравнения является сценарий S₀. Относительная форма удобна для сопоставления с целевыми показателями декарбонизации и для интерпретации результатов как доли сокращения выбросов без привязки к конкретному уровню нагрузки.

В представленном упрощённом профиле CI_s задан как сценарный среднесуточный показатель (0,3138 кг/кВт·ч) и поэтому остаётся постоянным по часам; при усложнении модели (учёт часовой эффективности и режимов) возможна вариация CI внутри суток, однако в данной работе акцент сделан на итоговой суточной экологической оценке.

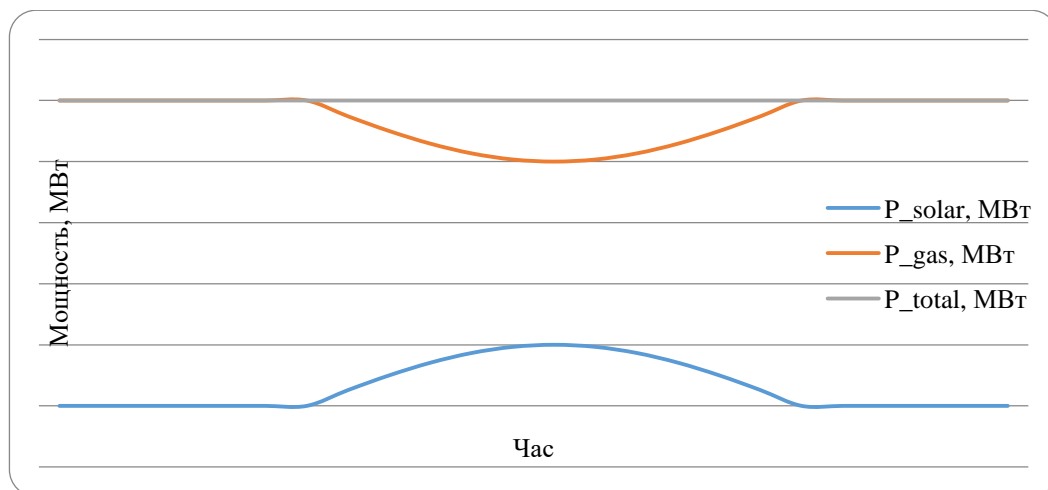


Рисунок 4 – Профиль мощности: P_{total} , P_{solar} , P_{gas} (сценарий S20)

Примечание: составлено автором на основе индивидуального исследования

Из графика видно, что P_{solar} имеет характерный дневной максимум около полудня (до 200 МВт), тогда как P_{gas} в эти часы минимален (до 800 МВт). В ночные часы солнечный вклад равен нулю, и газовая часть полностью обеспечивает нагрузку. Линия P_{total} остаётся постоянной, что подтверждает корректность баланса мощности и демонстрирует практическое преимущество ISCC с точки зрения эксплуатации: снижение расхода газа происходит без потери управляемости и без провалов суммарной мощности. Следовательно, именно такое внутрисуточное перераспределение мощности является непосредственным источником экологического эффекта, зафиксированного в таблице 1 и на графиках по снижению выбросов.

В целом, внедрение ISCC в Казахстане позволит не только сократить выбросы и повысить долю ВИЭ, но и создать новую высокотехнологичную отрасль (производство зеркал, стальных конструкций, теплообменного оборудования, систем контроля). Кроме того, гибридные станции могут стать полигоном для разработок отечественных инженеров и учёных.

Успешность ISCC во многом определяется правильным выбором и компоновкой солнечных технологий. Рассмотрим основные разновидности CSP и способы их интеграции:

- Наиболее распространённый тип CSP, использующий вытянутые отражатели с фокусировкой на трубку с теплоносителем. Температура теплоносителя достигает 390–450 °С. Такие коллекторы использованы в Ain Beni Mathar, Kuraymat и Agua Prieta II. Их плюс – проверенные технологии и относительная простота, минус – необходимость большого поля и ограничение температуры [12].

- Используют плоские или слегка изогнутые зеркальные полосы. Обеспечивают температуру до 350 °С при низкой себестоимости. В исследовании *Applied Energy* использовались LFC с каскадным накопителем, что привело к приросту эффективности на ~2 %.

- Предполагают расположение поля гелиостатов, направляющих солнечный поток на приёмник на вершине башни. Температуры могут превышать 600–800 °С, что позволяет достигать высоких эксергетических коэффициентов. Примером служит проект Al-Qayara, где такая технология обеспечивает рекордную эффективность и низкую себестоимость. Недостаток – сложность управления, высокая стоимость отдельных компонентов и требования к стабильному DNI.

- В схеме DSG вода нагревается и испаряется непосредственно в коллекторе, минуя промежуточный теплоноситель. Это повышает эффективность передачи тепла и снижает потери. Работа *Entropy* показала, что двухступенчатая DSG улучшает солнечно-электрический КПД на 1,2 п.п. и эксергетическую эффективность на 2,5 п.п [13].

Выбор оптимальной точки подключения солнечного тепла также зависит от схемы ПГУ. Наиболее распространённая схема – подача тепла в котёл-утилизатор, где оно нагревает воду или пар перед паровой турбиной. В некоторых вариантах теплота может подаваться на вход компрессора или в камеру сгорания газовой турбины для повышения температуры воздуха и снижения расхода газа. Эти решения требуют сложной модернизации оборудования и пока мало реализованы в промышленных установках [14].

Работа гибридных ISCC-станций сопряжена с рядом особенностей, которые следует учитывать при проектировании и эксплуатации.

1. Выработка CSP зависит от времени суток и погодных условий. Для сглаживания пиков и впадин применяются системы накопления тепла, обычно на расплавленной соли. В проекте *Applied Energy* использование каскадного теплоаккумулятора обеспечило дополнительную гибкость, позволяя передавать часть тепла в вечерние часы. Газовая турбина обеспечивает быстрый набор мощности при снижении солнечной нагрузки. Оптимальная конфигурация гибрида позволяет снизить минимальную нагрузку ПГУ и увеличить диапазон регулирования.

2. Высокие температуры и интенсивная радиация вызывают деградацию зеркал и приёмников. Требуется регулярный мониторинг и замена, что должно быть учтено в планах эксплуатации. ISCC-станции должны отвечать стандартам по стабилизации напряжения и частоты. Управление сочетанием солнечного и газового тепла требует развитых систем автоматики и прогнозирования.

Несмотря на успехи первых проектов, технология ISCC остаётся сравнительно молодой и требует дальнейших исследований и усовершенствований. Разработка высокотемпературных теплоносителей (солей, жидких металлов, CO₂ в сверхкритическом состоянии) позволит увеличить температуру пара и тем самым повысить эффективность. Предлагаются двухконтурные циклы с рекуперацией, интеграция CSP в комбинированные циклы с Каллином или супер-критическим CO₂. Возможна комбинация CSP, солнечной фотогальваники и ветровых турбин. Например, в Жанаозене планируется гибридный комплекс 50 МВт СЭС, 77 МВт ВЭС и 120 МВт газовой генерации. Это демонстрирует потенциал мультигибридных систем.

Развитие ISCC в Казахстане потребует производства зеркал, конструкций, теплообменников. Создание локального кластера снизит стоимость проектов и создаст рабочие места. Объединяя международный опыт и собственный анализ, можно сделать вывод, что технология ISCC является перспективным направлением для Казахстана и других стран, стремящихся к декарбонизации при сохранении надёжности энергосистемы.

Заключение

В данной работе рассмотрен широкий спектр вопросов, связанных с использованием солнечной энергии в парогазовых установках. На основе анализа мирового опыта показано, что интеграция концентрирующих солнечных технологий в ПГУ позволяет повысить эффективность на 1–18 п.п., снизить удельный расход газа и уменьшить выбросы CO₂. Экономические расчёты подтверждают, что при определённых ценах на газ гибридные станции имеют более низкую LCOE, чем автономные ПГУ и CSP. Анализ потенциала Казахстана показывает, что страна располагает необходимыми природными ресурсами и инфраструктурой для успешного внедрения ISCC. Рекомендуется разработка пилотных проектов в южных регионах, создание национальной программы поддержки гибридных технологий и развитие научно-образовательных центров по концентрирующей солнечной энергетике. Внедрение ISCC может стать ключевым элементом стратегии декарбонизации и обеспечить надёжное энергоснабжение на переходном этапе.

Список использованных источников

1. Алькалтани Б. Дж.. Интегрированные солнечно-парогазовые электростанции (ISCC): путь к развитию тепловой солнечной энергетики. Отчёт (Duke University). – 2015. – 71 с. – URL:

<https://dukespace.lib.duke.edu/server/api/core/bitstreams/268ad3c4-a2c6-4769-9eaf-b213f4f9a15e/content>

(дата обращения: 03.03.2026).

2. Алькахани Б. Дж., Патиньо-Эчеверри Д.. Интегрированные солнечно-парогазовые электростанции: путь к развитию тепловой солнечной энергетики // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 169. – С. 927–936. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.083.

3. Браун К. Э., Лафлин Д. Х.. Чувствительность рынка солнечно-газовой гибридной генерации к ценам, эффективности, политике и топливным прогнозам // *Clean Technologies and Environmental Policy*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 591–604. – DOI: 10.1007/s10098-018-1659-3.

4. Праманик С., Равикришна Р. В.. Обзор гибридных технологий концентрированной солнечной энергетики (CSP) // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Т. 127. – С. 602–637. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.038.

5. Дженкинс П., Рамамоорти Г. Проектирование, сравнение термодинамических характеристик и анализ стоимости электростанций PV, CSP, WT, NGCC и ISCC // *Energy and Power Engineering*. – 2020. – Т. 12, № 6. – С. 288–313. – DOI: 10.4236/epe.2020.126018.

6. Пауэлл К. М., Рашид К., Эллингвуд К., Таттл Дж., Айверсон Б. Д.. Гибридные солнечные тепловые энергосистемы на основе концентрированной солнечной энергии: обзор // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Т. 80. – С. 215–237. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.067.

7. Бехар О., Келлаф А., Мохаммеди К., Айт-Каси С.. Обзор интегрированной солнечно-парогазовой системы (ISCCS) с параболическим желобом // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Т. 39. – С. 223–250. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.066.

8. Центр «Содействие устойчивому развитию Республики Казахстан». Стратегия достижения углеродной нейтральности Республика Казахстан до 2060 года. – 2023. – URL: <https://csd-center.kz/baza-znaniy/strategiya-dostizheniya-uglerodnoy-neytralnosti-respubliki-kazahstan-d.html> (дата обращения: 03.03.2026).

9. КазМунайГаз и Eni запустили солнечную электростанцию в Жанаозене: пресс-релиз. – 27.09.2025. – URL: <https://www.kmg.kz/ru/press-center/press-releases/solnechnuya-elektrostantsiya-zhanaozen-zapusk/> (дата обращения: 03.03.2026).

10. LADA.kz. Солнечная электростанция в Жанаозене: первый гибрид в Казахстане // *LADA.kz*. – 29.09.2025. – URL: https://www.lada.kz/aktau_news/143885-solnechnaia-elektrostantsiia-v-zhanaozene-pervyi-gibrid-v-kazakhstane.html (дата обращения: 03.03.2026).

11. Франкини Г., Пердичкици А., Равелли С., Бариготци Г.. Сравнительное исследование параболических желобов и солнечных башен в солнечном ранкиновском цикле и интегрированных солнечно-парогазовых установках // *Solar Energy*. – 2013. – Т. 98, Part C. – С. 302–314. – DOI: 10.1016/j.solener.2013.09.033.

12. Пэн С., Ван Ц., Хун Х., Сюй Д., Цзинь Х.. Эксергетическая оценка типичной солнечно-гибридной угольной электростанции мощностью 330 МВт в Китае // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – Т. 85. – С. 848–855. – DOI: 10.1016/j.enconman.2013.12.073.

13. Бабаелахи М., Мофидипур Э., Рафат Э.. Совместный энерго-эксерго-управленческий (СЕЕС) анализ и многокритериальная оптимизация паротурбинной электростанции, питаемой параболическими желобными солнечными коллекторами // *Energy*. – 2020. – Т. 201. – Ст. 117641. – DOI: 10.1016/j.energy.2020.117641.

14. Бехар О., Келлаф А., Мохаммеди К., Белхамель М.. Мгновенная эффективность первой интегрированной солнечно-парогазовой системы в Алжире // *Energy Procedia*. – 2011. – Т. 6. – С. 185–193. – DOI: 10.1016/j.egypro.2011.05.022.

УДК 662.654

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Карманов Амангельды Ерболович, Никифоров Александр Степанович, Кинжибекова Акмарал Кабиденевна, Приходько Евгений Валентинович, Габдулов Асет Уралбаевич
aman270685@mail.ru

НАО «Торайгыров университет», г. Павлодар, Казахстан