

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2134>**М. Г. Жумагулов¹, *А. Ө. Өмірбаева²**^{1,2}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2702-7292>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5008-5135>*e-mail: a.omerbaeva@mail.ru

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СОЛНЕЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ. ЧАСТЬ 2

В данной статье проанализирована технология солнечной газификации углеродсодержащего сырья (угля или биомассы), которая является перспективным методом получения высококачественного синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$) путем применения концентрированного солнечного излучения в качестве источника теплоты. Основное внимание уделяется термодинамическим и кинетическим аспектам процесса, позволяющим трансформировать нестабильную солнечную энергию в тепловую способность топлива и сниженным углеродным следом по сравнению с традиционной автотермической газификацией. Рассматриваются ключевые конструкции солнечных реакторов, классифицируемые по способу подвода энергии на системы прямого и косвенного облучения. Проведен детальный сравнительный анализ различных типов установок, включая реакторы с плотным и кипящим слоем, вихревые реакторы и системы на расплавах солей. Обобщены существующие экспериментальные данные по таким ключевым показателям, как степень конверсии углерода (до 94,4 %), КПД преобразования солнечной энергии в топливо (до 45 %) и пр. Особое внимание уделено инженерным аспектам, ограничивающим промышленное внедрение технологии: термическим нагрузкам на кварцевые окна, загрязнению оптических поверхностей и необходимости эффективного управления системой в условиях нестабильной солнечной инсоляции. Предложены пути решения описанных технических проблем, такие как гибридные солнечно-автотермические режимы и интеграция систем аккумулирования тепла.

Ключевые слова: газификация угля, газификатор, синтез-газ, уголь, солнечный концентратор, солнечная газификация угля, солнечный реактор, концентрированная солнечная энергия.

Введение

Ранее авторами данной работы уже была опубликована статья по газификации [1]. Данная публикация анонсировала продолжение исследований с применением концентрированной солнечной энергии как основного источника теплоты для газификации.

В условиях глобального энергетического перехода и нарастания дефицита традиционных органических топлив (уголь, нефть, газ и др.) поиск технологий производства «зеленого» топлива стал одной из приоритетных задач мировой энергетики [2]. Углерод является основным компонентом в угле, биомассе и органических отходах. Традиционно эта органическая масса перерабатывается методом газификации для получения синтез-газа (H_2 и CO). Синтез-газ является универсальным промежуточным продуктом для производства электроэнергии (через горение) или водорода [2]. Однако классическая автотермическая газификация имеет существенный недостаток: для обеспечения эндотермических реакций процесса требуется сжигать до 30–45 % самого исходного сырья [3]. Так энергетическая эффективность неизбежно снижается на фоне загрязнения целевого продукта и окружающей среды балластом CO_2 , составляющим около 1 кг на каждый кВт·ч произведенной электроэнергии [2; 3].

Инновационным решением является концентрация солнечной энергии в качестве источника теплоты для газификации. В итоге часть энергетических затрат покрывается за счёт оптической фокусировки солнечного излучения извне [2]. В ходе данного аллотермического процесса солнечная энергия поглощается эндотермическими реакциями и «запасается» в виде химических связей продуктов, повышая их суммарную теплотворную способность на 20–45 % по сравнению с исходным сырьём [3; 4]. В результате синтез-газ становится аккумулятором энергии солнца и органического топлива, что актуально в силу прерывистости солнечного света [2; 5; 6].

Преимущества использования солнечной энергии в газификации:

Максимальный выход продукта: отсутствие внутреннего горения позволяет получать почти в два раза больше синтез-газа на тонну углеродсодержащего сырья [3; 4; 7].

Высокая чистота газа: продукт содержит меньше азота и продуктов сгорания, что значительно упрощает последующую очистку и переработку в жидкие топлива [2; 4].

Экологический фактор: процесс позволяет сократить удельные выбросы CO_2 вдвое по сравнению с традиционными станциями, т.к. горение заменяется на «солнечный» источник [8].

Впервые солнечная технология газификации упоминается в литературе в 1980 году, начиная с экспериментов Грегга и Тейлора на солнечных установках, доказавших техническую осуществимость процесса [7; 9]. С течением времени простые реакторы периодического действия превратились в сложные динамические системы непрерывного действия мощностью от 5 кВт до 150 кВт [2]. Несмотря на существенные достижения в лабораториях, переход к установкам промышленного масштаба остаётся затруднительным и требует решения вопросов, связанных с нестабильностью солнечного потока, устойчивостью применяемых в конструкциях материалов к высоким температурам (до 1800 К) и загрязнением кварцевых окон [5; 8; 10].

Материалы и методы

Любая газификация углеродсодержащего сырья – это сложная совокупность последовательных и параллельных химических превращений, которые можно разделить на две основные стадии: первичный пиролиз и вторичную газификацию углистого остатка [7]. На первой стадии (300–1000 °С) происходит термическое разложение макромолекул топлива с выделением летучих веществ (H_2 , CO , CO_2 , CH_4), смол, масел и образованием твердого коксового остатка [8]. Вторая стадия протекает при более высоких температурах (>1000 °С) и включает преимущественно эндотермические реакции взаимодействия углерода с газифицирующими агентами [2; 6]:

- Паровая газификация: $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ ($\Delta H = +131,3$ кДж/моль)
- Восстановления CO_2 до CO (Реакция Будуара): $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ ($\Delta H = +172,5$ кДж/моль)

Более подробное изложение химических реакций газификации по стадиям представлено в первой части [1].

Термодинамический анализ, основанный на минимизации свободной энергии Гиббса, показывает, что состав продуктов сильно зависит от температуры и давления [2; 11]. При атмосферном давлении и температурах ниже 800 К в равновесии преобладают CH_4 , CO_2 и непрореагировавший углерод [5; 11]. Повышение температуры свыше 1200 К смещает равновесие в сторону образования высококачественного синтез-газа с минимальным содержанием балласта [2]. Согласно принципу Ле Шателье, повышение давления в системе крайне нежелательно, так как оно требует более высоких температур для достижения полной конверсии углерода [4; 8; 11].

Ключевое отличие солнечной технологии от традиционной заключается в источнике теплоты. Автотермические газификаторы получают теплоту за счет сжигания части исходного сырья, что приводит к снижению теплотворной способности продукта [2; 3]. Аллотермический солнечный процесс использует внешнюю энергию, не учитываемую в общем балансе затрат [7].

Новейшие исследования 2025 года указывают на существование нетермических эффектов концентрированного излучения [12]. Прямое облучение коксового остатка высокоинтенсивным потоком (фотокаталитический эффект) способно снижать энергию активации процесса на 150–170 кДж/моль и уменьшать температуру начала реакции на 150 °С по сравнению с чисто термическим нагревом [12]. Это открывает перспективы для проведения газификации при более умеренных температурах, что значительно снижает требования к материалам солнечных реакторов.

Результаты и обсуждение

1. Технологии концентрации и поглощения излучения

Реактор газификации является ключевым звеном конструкции для преобразования солнечной энергии в химическую [2;8]. Солнечные реакторы газификации подразделяются по двум основным признакам: методу передачи тепловой энергии (прямое или косвенное облучение).

Реакторы прямого облучения (Рисунок 1) принимают концентрированный поток солнечного излучения непосредственно на частицы углеродсодержащего сырья через прозрачное кварцевое окно [2; 6; 7]. Основным преимуществом таких систем является отсутствие промежуточного термического сопротивления стенок, что обеспечивает экстремально высокие скорости нагрева частиц (до 1000 К/с) и позволяет достигать более высоких температур непосредственно в зоне реакции [2]. Однако эксплуатация кварцевых окон сопряжена с серьезными технологическими трудностями: риском загрязнения продуктами пиролиза (смолами) и пылью, а также ограничением по давлению [2; 5; 8].



Рисунок 1 – Реакторы прямого и косвенного облучения

Реакторы косвенного облучения (Рисунок 1) используют непрозрачную стенку-абсорбер или пластину-эмиттер (например, из карбида кремния SiC), которая поглощает солнечное излучение и передает тепло реагентам за счет теплопроводности, конвекции и вторичного переизлучения [3; 4]. Такая технология не имеет проблем с загрязнением окна и позволяет повышать давление внутри реактора до 6 бар и выше, что необходимо в случае синтеза жидких топлив [2; 4]. Но данный тип конструкции имеет более низкий КПД из-за температурных ограничений материала абсорбера и потерь при теплопередаче через стенку [8].

В зависимости от гидродинамического режима работы выделяют следующие типы конструкций:

Реакторы с плотным слоем (рисунок 2): исторически первые системы периодического действия, отличающиеся простотой и надежностью [3; 7; 13]. Основной проблемой является «усадка» слоя в процессе газификации и, как следствие, «ускользание» фокуса [12; 14].

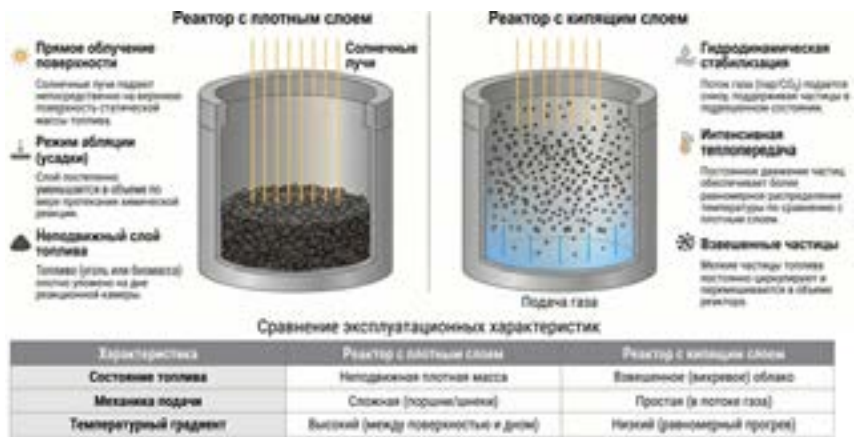


Рисунок 2 – Реакторы с плотным и кипящим слоем

Реакторы с кипящим слоем (рисунок 2): обеспечивают улучшенный тепло- и массообмен за счет интенсивного перемешивания (инфильтрации) частиц газифицирующим агентом [6; 10]. Особое развитие получили системы с внутренней циркуляцией теплоносителя, которые минимизируют температурные градиенты в зоне облучения [6; 15]. Недостаток данной технологии заключается в чувствительности установки к размеру частиц сырья (<1 мм), что также создаёт риск выноса пыли и эрозии стенок реактора.

Вихревые реакторы (рисунок 3): частицы сырья движутся в потоке газа по спиральной траектории вдоль стенок полости [4], что увеличивает время пребывания частиц в зоне высокого потока при компактных размерах реактора [8].

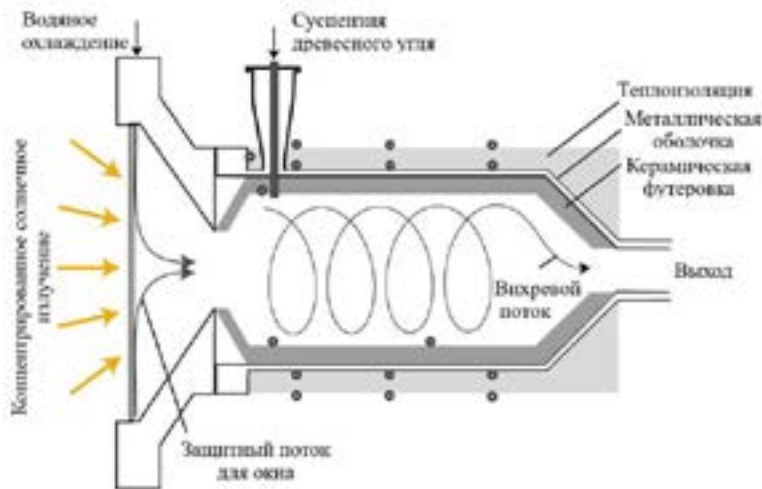


Рисунок 3 – Солнечный вихревой реактор [4]

Реакторы на расплавах солей: сырьё подается в объем расплавленных карбонатов щелочных металлов [5]. Расплав выступает одновременно теплоносителем и мощным катализатором, препятствующим образованию смол и аккумулирует теплоту при переменных солнечных нагрузках [5].

Современные разработки направлены на создание гибридных систем и реакторов, которые позволяют перерабатывать органические частицы, обеспечивая непрерывность производства за счет комбинации солнечной теплоты с частичным сжиганием сырья.

2. Режимы работы и динамика процесса

Эксплуатационные характеристики солнечных реакторов-газификаторов существенно отличаются от традиционных промышленных установок (Lurgi и др.) из-за высокой плотности тепловых потоков и частых переходных процессов, вызванных нестабильностью солнечного излучения [6]. По характеру организации процесса выделяют два основных режима: периодический и непрерывный [3].

Периодический и непрерывный режимы. Реакторы с плотным слоем чаще всего работают в периодическом режиме [3]. В таких системах

загрузка сырья происходит однократно, после чего слой подвергается облучению до полной конверсии углерода [7; 13]. Напротив, например, вихревые и реакторы с кипящим слоем проектируются для непрерывной подачи мелкодисперсного сырья [6]. Непрерывный режим обеспечивает стабильный по составу и количеству выход синтез-газа, что критически важно для последующего применения продуктов в технологических или энергетических процессах, например, в газовых турбинах [5].

Динамика плотного слоя и эффект усадки. Существенным недостатком газификации плотного слоя в солнечных реакторах является «эффект усадки» [3; 14]. По мере протекания эндотермических реакций объем твердого топлива уменьшается, что приводит к изменению геометрии зоны нагрева и перераспределению тепловых потоков [3; 14]. Современные методы численного моделирования, такие как метод фазового поля, позволяют учитывать не только потребление углерода, но и процессы движения внутри слоя [14]. При моделировании следует учитывать, что теплопередача через пористый слой является ограниченной (абляционный режим), а радиационный теплообмен внутри пор становится доминирующим при температурах выше 1300 К [3].

Управление непостоянством солнечного излучения. Основным вызовом для солнечных систем является нестабильность солнечного потока из-за облачности и смены времени суток [2; 10]. Для обеспечения бесперебойной работы применяются две основные стратегии:

1. Гибридизация: В периоды нехватки солнечной энергии в реактор подается воздух (или кислород) для частичного сжигания сырья. Эксперименты показали, что гибридизация позволяет компенсировать падение солнечной мощности на 40 %, поддерживая температуру в зоне реакции на уровне 1200–1300 °С. Однако переход в гибридный режим временно снижает КПД процесса и меняет отношение $H_2:CO$.

2. Тепловое аккумулирование: Использование твердых частиц или расплавов солей в качестве промежуточного буфера-теплоносителя позволяет поддерживать солнечный приемник химического реактора в случае снижения солнечной активности [8; 10]. Системы на расплавах солей обладают высокой тепловой инерцией, предотвращая резкое падение температуры (не более 40 К за минуту отсутствия солнца) [5; 6].

Динамическое управление. Эффективная работа солнечного газификатора требует регулирования подачи реагентов в реальном времени. Простые стратегии (включение/выключение) показывают низкую эффективность по сравнению с методами динамической регулировки скорости подачи сырья и пара. Кроме того, варьирование соотношения пара

и кислорода позволяет гибко настраивать качество получаемого синтез-газа для конкретных задач (например, $H_2:CO=2$ для синтеза Фишера-Тропша) даже в условиях меняющейся инсоляции [5].

3. Эффективность и ключевые показатели производительности

Для оценки технических и экономических перспектив солнечных систем газификации в литературе используется ряд стандартизированных показателей, которые позволяют сравнивать различные конструкции реакторов и режимы их работы [2].

Степень конверсии углерода (X_c). Этот показатель определяет полноту превращения углерода исходного сырья в газообразные продукты (CO , CO_2 , CH_4). В солнечных реакторах прямого облучения при температурах выше 1300 К степень конверсии достигает 87% за один проход при времени пребывания около 1 секунды. В реакторах с плотным слоем для биомассы и различных отходов значения X_c варьируются от 56 % до 100 %, причем неполнота часто объясняется уносом мелких частиц или нестабильностью излучения [3;2]. Применение катализаторов (например, K_2CO_3) в сочетании с прямым облучением позволяет достигать конверсии 99 % даже при умеренных температурах около 1073 К [16].

Коэффициент преобразования теплотворной способности (U). Одним из наиболее важных преимуществ солнечной газификации является возможность повышения теплотворной способности топлива за счет химического аккумулирования солнечной энергии [7; 2]. Данный коэффициент – это отношение низшей теплоты сгорания ($Q_{\text{дсин-газа}}^l$) полученного синтез-газа к исходного сырья:

$$U = \frac{Q_{\text{дсин-газа}}^d}{Q_{\text{сырья}}^r}$$

Для автотермических процессов этот показатель всегда ниже единицы ($U \approx 0,75-0,85$), так как часть энергии тратится на внутреннее горение. Солнечная газификация обеспечивает U в диапазоне 1,15–1,4 [2; 4; 17]. Это означает, что калорийность полученного газа на 15–40 % выше, чем у исходного топлива. В стехиометрических условиях реагирования «уголь-пар» при 1300 К теоретический предел составляет 1,33 [7].

Важным показателем является доля солнечной энергии (η_{solar}) – отношение поглощенной солнечной энергии к полной энергии синтез-газа, которая в оптимизированных системах может достигать 25–35 % [2; 10]:

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{Q_{\text{solar}}}{Q_{\text{дсин-газа}}^d}$$

КПД преобразования солнечной энергии в топливо ($\eta_{\text{solar-to-fuel}}$). Этот интегральный показатель учитывает как солнечную энергию (Q_{solar}), так и энергию сырья в качестве входных параметров [4].

$$\eta_{\text{solar to fuel}} = \frac{Q_{\text{сгор-газ}}}{Q_{\text{сырья}} + Q_{\text{solar}}}$$

Экспериментальные значения на лабораторных установках мощностью 1,5–5 кВт обычно составляют 16–28 %. Низкие значения объясняются значительными теплопотерями через стенки в малом масштабе [4;2].

Солнечная эффективность ($\eta_{\text{solar-to-chem}}$) определяет долю входящей солнечной энергии Q_{solar} , которая была непосредственно сохранена в виде энтальпии химических реакций $\Delta H_{\text{реакц}}$ [7;6]:

$$\eta_{\text{solar to chem}} = \frac{\Delta H_{\text{реакц}}}{Q_{\text{solar}}}$$

В ранних работах 1980-х годов сообщалось о значениях до 40–48 % [7] а в современных исследованиях с использованием псевдооживленного слоя возможно увеличить коэффициент на 14 % [6].

Экзергетический анализ. Экзергетический КПД системы (η_{exergy}) учитывает не только энергетический баланс, но и качество (работоспособность) энергии [2]. Основными источниками экзергетических потерь (необратимости) являются процессы охлаждения синтез-газа (35–41 % от входящей солнечной энергии) и потери на переизлучение из реактора (>9 %) [2]. Повышение коэффициента концентрации до 5000 солнц способно увеличить экзергетический КПД на несколько процентов [2].

Влияние условий процесса. Эффективность газификации чувствительна к размеру частиц и расходу пара. Уменьшение размера частиц биомассы с 18 mesh (число отверстий на 1 дюйм²) до 80 mesh повышает выход водорода на 106 % и увеличивает коэффициент U на 0,41 за счет интенсификации теплообмена [17]. Избыточная подача пара (соотношение пар/сырьё > 3) может снижать общий КПД из-за затрат энергии на нагрев влаги [8;17]. Для коммерческой реализации критически важно поддержание баланса между скоростью подачи сырья и плотностью солнечного потока: отклонение от оптимальной точки ведет либо к перегреву реактора, либо к резкому падению степени конверсии.

Сводный анализ существующих технологий. На основе вышеприведенных сведений составим сводную таблицу ключевых показателей эффективности для различных технологий солнечной газификации.

Таблица 1 – Сравнение технологий солнечной газификации

Реактор	Температура внутри реактора	Коэффициент преобразования теплотворной способности (U)	Степень конверсии углерода (X_c)	КПД преобразования солнечной энергии в топливо ($\eta_{\text{solar-to-fuel}}$)	Солнечная эффективность ($\eta_{\text{solar-to-chem}}$)	Литература
Реакторы прямого облучения	1027–1527 °C	1,21–1,25	69,1 %	16,9 %	0,5–9 %	[4]
Реакторы косвенного облучения	1009–1273 °C	1,35	94,4 %	19,7 %	—	[4]
Реакторы с плотным слоем	902–1302 °C	1,07–1,30	77–87 %	22–35 %	17,3–29 %	[3;2]
Реакторы с кипящим слоем	1000–1177 °C	1,15–1,20	73–80 %	—	8–14 %	[6]
Вихревые реакторы	1027–1527 °C	1,20	87 %	20 %	9–20 %	[4]
Реакторы на расплавах солей	927–977 °C	1,26*	47–93 %	30–45 %	30–55 %*	[5]

Примечание: Значения, отмеченные звездочкой, представляют собой проектные или теоретически достижимые показатели, обоснованные в литературе.

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что коэффициент преобразования теплотворной способности (U) имеет приблизительно одинаковые значения, что демонстрирует зависимость данного показателя больше от солнечной концентрации нежели от конструкции реактора. Наилучшие значения по конверсии углерода (X_c) имеют реакторы косвенного облучения и вихревые реакторы, как замкнутые системы, способные более эффективно аккумулировать тепловую энергию внутри. Реакторы с кипящим слоем и реакторы, работающие на расплавах солей имеют также высокие показатели. Но данные варианты отличаются сложностью конструкции и эксплуатации.

4. Экономический и экологический анализ

Экологический эффект. Исследования показывают, что аллотермический процесс позволяет снизить удельные выбросы CO_2 как минимум на 30–45 % по сравнению с автотермическим [2]. При производстве электроэнергии на базе солнечного синтез-газа в комбинированных циклах выбросы диоксида углерода могут быть сокращены вдвое – до уровня

0,49–0,56 кг/кВт·ч по сравнению с типичным 1 кг/кВт·ч для угольных станций [2]. Кроме того, отсутствие балластного азота и продуктов сгорания в синтез-газе значительно упрощает очистку от оксидов серы и азота (SO_x , NO_x), обеспечивая в 10 раз более низкую концентрацию этих загрязнителей в дымовых газах [2].

Экономический эффект. Экономика определяется балансом между высокой стоимостью солнечной инфраструктуры и существенной экономией на сырье и вспомогательном оборудовании. Расчеты показали, что солнечная установка потребляет 57% угля по сравнению с процессом Lurgi для производства того же объема газа, что делает её актуальной в условиях роста цен на ископаемое топливо [7]. Важным фактором является исключение энергоёмкой и дорогостоящей установки разделения воздуха (ASU) для получения кислорода, что частично компенсирует затраты на установку гелиостатов [7; 8; 9].

Согласно современным оценкам:

Стоимость солнечного водорода оценивается в 3,95–6,05 у.е./кг при мощности переработки 1–10 тонн органического сырья в час [8].

Для систем солнечного риформинга метана себестоимость водорода составляет около 2,5 у.е./кг [18].

Интеграция солнечных башен в комбинированные циклы ПГУ позволяет снизить нормированную стоимость электроэнергии с 197,7 у.е./МВт·ч до 161,5 у.е./МВт·ч при масштабном внедрении [19].

Экономический анализ подтверждает, что при введении углеродного налога (свыше 80 у.е./т CO_2) солнечная газификация становится конкурентоспособной по сравнению с традиционными методами переработки углеводородов даже без государственных субсидий [5].

Несмотря на ряд успешных исследований, масштабирование солнечной технологии газификации от лабораторных исследований к промышленному внедрению сопряжен с рядом критических вызовов. Препятствия связаны как с материалами, так и с инженерными особенностями [8].

Проблема конструкционных материалов и термостойкости. Эксплуатация солнечных реакторов при температурах выше 1300 К накладывает жесткие требования к материалам [5]. Использование керамической футеровки обеспечивает необходимую теплоизоляцию, однако такие массивные огнеупоры крайне чувствительны к термическому разрушению, вызванному резкими колебаниями солнечного потока [6]. Металлические сплавы, такие как Inconel 601 или X-750, демонстрируют лучшую стойкость к термоциклированию, но ограничены в рабочих температурах из-за ползучести и ускоренной коррозии, особенно в агрессивных средах расплавов солей

[5]. Разработка новых композитных материалов и селективных покрытий, способных выдерживать экстремальный нагрев и химическое воздействие продуктов газификации, остается актуальной задачей [8].

Оптические окна. Для реакторов прямого облучения слабым местом остается кварцевое окно. В процессе газификации мелкие частицы угля, зола и конденсирующиеся смолы (пиролизные масла) оседают на внутренней поверхности окна, снижая его прозрачность, приводя к локальному перегреву и разрушению стекла [7;4]. Системы активной защиты с помощью «газовых завес» требуют значительных расходов инертного газа или пара, что снижает общую эффективность системы за счет оттока тепла к инертному газу [4]. Косвенный нагрев через эмиттерные пластины из SiC решает проблему окон, но сопровождается дополнительными потерями, связанными с тепловым сопротивлением стенок (потери на теплопередачу) [3;8].

Масштабирование и гидродинамика. Переход от лабораторных прототипов к промышленным установкам требует корректировки конструкции реакторов [6]. В реакторах, рассчитанных на мегаватты энергии, с плотным слоем возникают значительные температурные градиенты, ограничивающие глубину газификации объемом материала [14]. Системы с кипящим слоем обеспечивают лучший теплообмен, но их масштабирование затруднено сложностью поддержания стабильного режима псевдосжиженного слоя при неравномерном солнечном нагреве [6;10]. Одним из перспективных путей развития считается переход к системам с внутренней циркуляцией теплоносителя, где солнечный приемник отделен от зоны реакции, что позволяет осуществлять каждый процесс независимо [10;15].

Термодинамическая стабильность. Прерывистость солнечной энергии - это главное препятствие для стабильности работы систем особенно в комплексных системах с потребителем (ГТУ, синтез водорода, синтез жидкого топлива и т.д.). Исследования показывают, что использование гибридных солнечно-автотермических систем является наиболее надежным решением, однако это требует внедрения сложных автоматизированных систем управления, способных мгновенно переключаться между солнечным и топливным источником нагрева с сохранением качества газа. Современная наука даёт потенциальное решение данной проблемы в виде высокотемпературных аккумуляторов теплоты на базе материалов с фазовым переходом [8; 10].

Нетермические эффекты. Прорывным направлением последних лет стали исследования фотокаталитических и фототермических эффектов концентрированного излучения [12]. Фотоны солнечного света поглощаются графитовыми структурами (коксовый остаток), в результате чего электроны переходят на более высокий энергетический уровень, образуя пары

«электрон–дырка» (e^- и h^+). Эти возбужденные электроны и дырки вступают во взаимодействие с газифицирующими агентами (паром H_2O или CO_2), создавая на поверхности высокореактивные свободные радикалы и формы активного кислорода (например, $OH^\cdot$, $O_2^\cdot$, $H_2O_2^\cdot$). Они атакуют стабильные ароматические кольца в структуре угля, вызывая их «раскрытие» и превращение в более простые и реакционноспособные алифатические углеродные цепочки. Для лигнинового кокса средняя энергия активации реакции восстановления CO_2 снижается более чем в два раза – с 217 кДж/моль (без облучения) до 92 кДж/моль (при 150 «солнцах»). Реакция газификации начинается при температуре 500 °С, в то время как при обычном нагреве (без прямого света) она запускается только при 650 °С. То есть экспериментально доказано, что прямое солнечное облучение углеродного остатка способно активировать химические связи не только за счет нагрева, но и через активацию электронов, что снижает температурный порог реакции Будуара на 150 °С [12].

Это открытие может кардинально изменить конструкцию будущих реакторов, позволяя проводить процессы декарбонизации при более умеренных температурах, снижая износ материалов и стоимость всей установки.

Информация о финансировании

Авторы выражают благодарность Министерству культуры и информации Республики Казахстан за общую поддержку исследования. Публикация данной статьи финансируется в рамках грантовой программы «Тәуелсіздік ұрпақтары – 2025» по направлению «Наука» по теме исследования «Усовершенствование технологии газификации угля из угольных месторождений Казахстана с использованием солнечной энергии».

Выводы

Исследования в области «солнечной» газификации, начавшиеся более сорока лет назад с переработки угля [7], к 2026 году превратились в одно из наиболее перспективных направлений «зеленой» энергетики.

Проведенный обзор подтверждает, что аллотермический режим работы позволяет достичь значения коэффициента преобразования теплотворной способности выше 1,2, эффективно превращая нестабильное излучение в химическое топливо с повышенной калорийностью [2;4;17]. Значения температур в реакторах достигают свыше 1300 К, что гарантирует высокую степень конверсии углерода (>90 %) и минимальное содержание смол в синтез-газе [6]. Экологический анализ демонстрирует потенциал снижения удельных выбросов CO_2 на 30–50 % [2;8]. Определены потенциальные пути решения основных проблем нестабильности солнечного излучения: гибридные установки и тепловые аккумуляторы на принципе фазового перехода.

Таким образом, солнечная газификация углеродсодержащего сырья представляет собой один из наиболее предпочтительных путей: – перевода твёрдого топлива в газообразное; – получения водорода; – повышения эффективности генерации электрической энергии путем применения синтез-газа в ПГУ.

На основании данного обзора авторы предложили собственную концепцию, описанную подробно в [20].

Использование генеративного искусственного интеллекта. Генеративный ИИ использовался исключительно в следующих ограниченных целях:

1. Поиск литературных источников в интернете.
2. Генерация иллюстраций по текстовому заданию от авторов.
3. Составление и оформление списка литературы в точном соответствии со стилем, требуемым типовым научным журналом.

Все научные факты, показатели эффективности работы, эксплуатационные характеристики, интерпретации, таблицы и выводы были проверены авторами вручную путем вычитки оригинальных публикаций, представленных в списке литературы. В окончательный вариант рукописи не были включены данные, ссылки, гипотезы или выводы, сгенерированные искусственным интеллектом. Авторы несут полную ответственность за точность и целостность содержания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Жумагулов, М. Г., Өмірбаева, А. Ө.** Обзор технологий газификации угля и их применимость в условиях Казахстана. Часть 1. // Вестник Торайғыров университета. Энергетическая серия. – 2025. – № 1. – С. 132–146.

2 **Wieckert, C., Obrist, A., von Zedtwitz, P., Maag, G., Steinfeld, A.** Syngas production by thermochemical gasification of carbonaceous waste materials in a 150 kWth packed-bed solar reactor // *Energy & Fuels*. – 2013. Vol. – T. 27, № 8. – С. 4770–4776.

3 **Piatkowski, N., Steinfeld, A.** Solar gasification of carbonaceous waste feedstocks in a packed-bed reactor – Dynamic modeling and experimental validation // *AIChE Journal*. – 2011. – T. 57, № 12. – С. 3522–3533.

4 **Müller, F., Poživil, P., van Eyk, P. J.** A pressurized high-flux solar reactor for the efficient thermochemical gasification of carbonaceous feedstock // *Fuel*. – 2017. – T. 193, – С. 432–443.

5 **Hathaway, B. J., Davidson, J. H.** Solar steam gasification of cellulose in a molten alkali salt: salt chemistry and reactor performance // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2021. – T. 143, № 5. – С. 052304.

6 **Gokon, N., Kumaki, S., Miyaguchi, Y., Bellan, S., Kodama, T., Cho, H.** Development of a 5 kWth internally circulating fluidized bed reactor containing quartz sand for continuously-fed coal-coke gasification and a beam-down solar concentrating system // *Energy*. – 2019. – Т.166. – С. 1–16.

7 **Gregg, D. W., Taylor, R. W., Campbell, J. H.** Solar gasification of coal, activated carbon, coke and coal and biomass mixtures // *Solar Energy*. – 1980. – Т. 25, № 4. – С. 353–364.

8 **Fang, Y., Paul, M. C., Varjani, S.** Concentrated solar thermochemical gasification of biomass: Principles, applications, and development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Т. 150, – С. 111484.

9 **Mathur, V. K., Breault, R. W., Lakshmanan, S.** Coal gasification using solar energy // *Solar Energy*. – 1983. – Т. № 5. – С. 433–440.

10 **Suárez-Almeida, M., Gómez-Barea, A., Salinero, J.** Design and performance analysis of a solar dual fluidized bed gasifier // *Chemical Engineering Journal*. – 2022.

11 **Kruesi, M., Jovanovic, Z. R., dos Santos, E. C.** Solar-driven steam-based gasification of sugarcane bagasse in a combined drop-tube and fixed-bed reactor // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – Т. 52, – С.173–183.

12 **Zhang, A., Li, D., Zhu, X.** Molten salt-based solar gasification of biomass with in situ CO₂ capture for hydrogen-rich syngas production // *Fuel*. – 2024.

13 **Taylor, R. W., Berjoan, R., Coutures, J. P.** Solar gasification of carbonaceous materials // *Solar Energy*. – 1983. – Т. 30, № 6. – С. 513–525.

14 **Zuo, H., Zeng, K., Zhong, D.** Irregular shrinkage models developed by phase field method for gasification of carbonaceous feedstock in packed-bed solar reactor // *Fuel*. – 2023. – Т. 331. – С. 125749.

15 **Li, X., Chen, J., Hu, Q., Chu, P., Dai, Y., Wang, C.H.** Solar-driven gasification in an indirectly-irradiated thermochemical reactor with a clapboard-type internally-circulating fluidized bed // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Т. 248. – С. 114765.

16 **Zhang, Q., Shan, S., Yu, J.** Coal gasification process driven by concentrated solar radiation for carbon neutralization: reaction and energy characteristics // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Т. 450. – С. 138286.

17 **Wang, S., Zhu, X., Liu, Q.** Design and experimental study of solar-driven biomass gasification based on direct irradiation solar thermochemical reactor // *Fuel*. – 2024.

18 **Anikeev, V. I., Bobrin, A. S., Ortner, J., Schmidt, S., Funken, K. H., Kuzin, N. A.** Catalytic thermochemical reactor/receiver for solar reforming of natural gas: Design and performance // *Solar Energy*. – 1998. – Т.63. – С. 97–104.

19 **Adnan, M., Zaman, M., Ullah, A.** Thermo-economic analysis of integrated gasification combined cycle co-generation system hybridized with concentrated solar power tower // *Renewable Energy*. – 2022.

20 **Zhumagulov, M., Omirbayeva, A., Papurello, D.** Analysis of Fuel Gasification Using Solar Technology: A Patent Review. *Gases*. – 2026. – 6 (3).

REFERENCES

1 **Zhumagulov, M., Omirbayeva, A.** Obzor tekhnologiy gazifikatsii uglya i ikh primenimost v usloviyakh Kazakhstana. Chast 1. [Review of coal gasification technologies and their applicability in the conditions of Kazakhstan. Part 1]. // *Vestnik Toraygyrov universiteta. Energeticheskaya seriya*. – 2025. № 1. – P. 132–146.

2 **Wieckert, C., Obrist, A., von Zedtwitz, P., Maag, G., Steinfeld, A.** Syngas production by thermochemical gasification of carbonaceous waste materials in a 150 kWth packed-bed solar reactor // *Energy & Fuels*. -2013. Vol. – Vol. 27, № 8. – P. 4770–4776.

3 **Piatkowski, N., Steinfeld, A.** Solar gasification of carbonaceous waste feedstocks in a packed-bed reactor – Dynamic modeling and experimental validation // *AIChE Journal*. – 2011. – Vol. 57, № 12. – P. 3522–3533.

4 **Müller, F., Poživil, P., van Eyk, P. J.** A pressurized high-flux solar reactor for the efficient thermochemical gasification of carbonaceous feedstock // *Fuel*. – 2017. – Vol. 193, – P. 432–443.

5 **Hathaway, B. J., Davidson, J. H.** Solar steam gasification of cellulose in a molten alkali salt: salt chemistry and reactor performance // *Journal of Energy Resources Technology*. – 2021. – Vol. 143, № 5. – P. 052304.

6 **Gokon, N., Kumaki, S., Miyaguchi, Y., Bellan, S., Kodama, T., Cho, H.** Development of a 5 kWth internally circulating fluidized bed reactor containing quartz sand for continuously-fed coal-coke gasification and a beam-down solar concentrating system // *Energy*. – 2019. – Vol. 166. – P. 1–16.

7 **Gregg, D. W., Taylor, R. W., Campbell, J. H.** Solar gasification of coal, activated carbon, coke and coal and biomass mixtures // *Solar Energy*. – 1980. – Vol. 25, № 4. – P. 353–364.

8 **Fang, Y., Paul, M. C., Varjani, S.** Concentrated solar thermochemical gasification of biomass: Principles, applications, and development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 150, – P. 111484.

9 **Mathur, V. K., Breault, R. W., Lakshmanan, S.** Coal gasification using solar energy // *Solar Energy*. – 1983. – Vol. № 5. – P. 433–440.

10 **Suárez-Almeida, M., Gómez-Barea, A., Salinero, J.** Design and performance analysis of a solar dual fluidized bed gasifier // *Chemical Engineering Journal*. – 2022.

11 **Kruesi, M., Jovanovic, Z. R., dos Santos, E. C.** Solar-driven steam-based gasification of sugarcane bagasse in a combined drop-tube and fixed-bed reactor // *Biomass and Bioenergy*. – 2013. – Vol. 52, – P. 173–183.

12 **Zhang, A., Li, D., Zhu, X.** Molten salt-based solar gasification of biomass with in situ CO₂ capture for hydrogen-rich syngas production // *Fuel*. – 2024.

13 **Taylor, R. W., Berjoan, R., Coutures, J. P.** Solar gasification of carbonaceous materials // *Solar Energy*. – 1983. – Vol. 30, № 6. – P. 513–525.

14 **Zuo, H., Zeng, K., Zhong, D.** Irregular shrinkage models developed by phase field method for gasification of carbonaceous feedstock in packed-bed solar reactor // *Fuel*. – 2023. – Vol. 331. – P. 125749.

15 **Li, X., Chen, J., Hu, Q., Chu, P., Dai, Y., Wang, C.H.** Solar-driven gasification in an indirectly-irradiated thermochemical reactor with a clapboard-type internally-circulating fluidized bed // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – Vol. 248. – P. 114765.

16 **Zhang, Q., Shan, S., Yu, J.** Coal gasification process driven by concentrated solar radiation for carbon neutralization: reaction and energy characteristics // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 450. – P. 138286.

17 **Wang, S., Zhu, X., Liu, Q.** Design and experimental study of solar-driven biomass gasification based on direct irradiation solar thermochemical reactor // *Fuel*. – 2024.

18 **Anikeev, V. I., Bobrin, A. S., Ortner, J., Schmidt, S., Funken, K. H., Kuzin, N. A.** Catalytic thermochemical reactor/receiver for solar reforming of natural gas: Design and performance // *Solar Energy*. – 1998. – Vol. 63. – P. 97–104.

19 **Adnan, M., Zaman, M., Ullah, A.** Thermo-economic analysis of integrated gasification combined cycle co-generation system hybridized with concentrated solar power tower // *Renewable Energy*. – 2022.

20 **Zhumagulov, M., Omirbayeva, A., Papurello, D.** Analysis of Fuel Gasification Using Solar Technology: A Patent Review. *Gases*. – 2026. – 6 (3).

Поступило в редакцию 30.04.26.

Поступило с исправлениями 18.05.26.

Принято в печать 08.06.26.

*М. Г. Жумагулов¹, *А. Ө. Өмірбаева²*

^{1,2} Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

30.04.26 ж. баспаға түсті.

18.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОМІРТЕКТІ ШИКІЗАТТЫ КҮН ЭНЕРГИЯСЫ АРҚЫЛЫ ГАЗИФИКАЦИЯЛАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА ШОЛУ. 2-БӨЛІМ

Бұл мақалада көміртегі бар шикізаттарды (көмір немесе биомасса) күн энергиясымен газификациялау технологиясы талданады, бұл жылыту көзі ретінде шоғырланған күн радиациясын пайдалана отырып, жоғары сапалы синтезделген газды ($\text{CO} + \text{H}_2$) өндірудің перспективалы әдісі болып табылады. Негізгі назар процестің термодинамикалық және кинетикалық аспектілеріне аударылады, бұл тұрақсыз күн энергиясын отын қыздыру құндылығына айналдыруға және дәстүрлі автотермиялық газдандырумен салыстырғанда көміртегі ізін азайтуға мүмкіндік береді. Тікелей және жанама сәулелендіру жүйелеріне энергия беру әдісі бойынша жіктелген негізгі күн реакторларының конструкциялары талқыланады. Тығыз қабатты және сұйық қабатты реакторларды, құйынды реакторларды және балқытылған тұз жүйелерін қоса алғанда, әртүрлі жүйе түрлерінің егжей-тегжейлі салыстырмалы талдауы берілген. Бұл мақалада көміртекті түрлендіру (94,4 %-ға дейін), күннен отынға айналу тиімділігі (45 %-ға дейін) және басқалары сияқты негізгі өнімділік көрсеткіштері бойынша қолданыстағы эксперименттік деректер қорытындыланған. Бұл технологияны өнеркәсіптік енгізуді шектейтін инженерлік аспектілерге ерекше назар аударылады: кварц терезелеріндегі жылыту жүктемелері, оптикалық беттердің ластануы және тұрақсыз күн инсоляциясы кезінде тиімді жүйені басқару қажеттілігі. Бұл техникалық қиындықтарға соның ішінде гибриді күн-автотермиялық режимдер және жылыту сақтау жүйелерін біріктіру шешімдері ұсынылады.

Кілтті сөздер: көмір газификациясы, газификатор, синтез-газ, көмір, күн концентраторы, күнді көмір газификациясы, күн реакторы, шоғырланған күн энергиясы.

M. G. Zhumagulov¹, *A. O. Omirbayeva²

^{1,2}L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana

Received 30.04.26.

Received in revised form 18.05.26.

Accepted for publication 08.06.26.

A REVIEW OF SOLAR GASIFICATION TECHNOLOGIES FOR CARBON-CONTAINING FEEDSTOCKS. PART 2

This article analyzes solar gasification technology for carbon-containing feedstocks (coal or biomass), which is a promising method for producing high-quality syngas ($\text{CO} + \text{H}_2$) using concentrated solar radiation as a heat source. The focus is on the thermodynamic and kinetic aspects of the process, which enable the transformation of unstable solar energy into fuel heating value and a reduced carbon footprint compared to traditional autothermal gasification. Key solar reactor designs are discussed, classified by the method of energy supply to direct and indirect irradiation systems. A detailed comparative analysis of various system types is provided, including dense-bed and fluidized-bed reactors, vortex reactors, and molten salt systems. This paper summarizes existing experimental data on key performance indicators such as carbon conversion (up to 94.4 %), solar-to-fuel efficiency (up to 45 %), and others. Particular attention is paid to engineering aspects limiting the industrial implementation of this technology: thermal loads on quartz windows, contamination of optical surfaces, and the need for efficient system control under unstable solar insolation. Solutions to these technical challenges are proposed, including hybrid solar-autothermal modes and the integration of heat storage systems.

Keywords: coal gasification, gasifier, synthesis gas, coal, solar concentrator, solar coal gasification, solar reactor, concentrated solar power.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz